

УДК 621.787.6.004

DOI: 10.12737/article_59353e2965a8c6.82426503

А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЙ 45, 40Х И 35ХГСА УПРОЧНЕНИЕМ ВОЛНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Представлены данные о влиянии упрочнения волной деформации на прочность сталей 45, 40Х и 35 ХГСА. Для повышения прочности данных сталей предлагается в их поверхностном слое волной деформации создавать структурированные гетеро-

генно упрочненные области, состоящие из чередующихся твердых и вязкопластичных участков.

Ключевые слова: волна деформации, твердость, гетерогенно упрочненная структура, прочность.

A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin

STRENGTH INCREASE IN STEEL 45, 40H AND 35HGSA BY DEFORMATION WAVE STRENGTHENING

Strength increase by a deformation wave is more advantageous in comparison with other ways of strengthening as it allows ensuring in a surface layer a larger depth of strengthening with a smooth transition from a strengthened surface to a non-strengthened one which is especially significant for materials operating under conditions of static loading. The paper reports the fulfilled investigations of the impact of strengthening heterogeneity with a deformation wave upon strength of steel 45, 40H, 35HGSA. The investigations of strength properties were carried out both on samples strengthened only on one side (on contact one), and on samples strengthened on two sides (on contact and supporting ones). As a result of investigations it is defined that at one-sided treatment of steel 45 with strengthening uniformity increase a strength limit increased by 8%, the ductility decreased by 37%, an elas-

tic limit increased by 43%. The strengthening uniformity increase in steel 40H resulted in strength limit increase by 13%, elasticity decrease by 38% and elasticity limit increase by 81%. At steel 35HGSA strengthening with uniformity increase there was observed a strength limit increase by 4.2%, plasticity decrease by 28% and elasticity limit increase by 51%. In case of two-sided strengthening with a deformation wave the values of strength properties of steel 40H did not actually change in comparison with one-sided treatment. The two-sided strengthening of samples made of steel 35HGSA brought to the growth of their strength limit by 2.8% and ductility limit by 20% as compared with one-sided treatment.

Key words: deformation wave, hardness, heterogeneously strengthened structure, strength.

Введение

Разрушение поверхности вследствие потери прочности критично для огромного числа изделий в разных отраслях. Повышение прочности металла, при сохранении достаточной пластичности и вязкости, увеличивает надежность и долговечность машин, что имеет важное народнохозяйственное значение.

Прочностные свойства деталей машин могут быть повышены путем изменения химического состава материала, применения упрочняющей термической и деформационной обработки или за счет создания композиционных материалов [1-6]. Так, применение композиционных материалов, сочетающих свойства сравнительно мягкой матрицы и прочных высокомодульных (до 4900 МПа и более) волокон,

мало деформирующихся под нагрузкой, позволило повысить удельную прочность материала на 20-40% [2; 3].

Одним из наиболее перспективных направлений развития современных упрочняющих технологий является формирование гетерогенной структуры модифицированного поверхностного слоя сплошного материала, которая, с одной стороны, не имеет ярко выраженных границ областей с измененными свойствами, а с другой стороны, аналогична по свойствам композиционному материалу с мягкой матрицей и твердыми включениями.

Гетерогенная структура (рис. 1), созданная в гомогенном материале, в основном применяется для повышения износостойкости и долговечности в условиях

контактного циклического нагружения. Известны лишь единичные примеры получения гетерогенной структуры с помощью методов термообработки и химико-термической обработки. С появлением в последнее время волнового деформационного упрочнения стало возможным получение гетерогенной структуры поверхностным пластическим деформированием (ППД) [1-6].

Повышение прочностных свойств поверхностным пластическим деформированием более выгодно по сравнению с другими способами упрочнения, так как обработка имеет ряд преимуществ: во-

первых, она позволяет обеспечить в поверхностном слое большую глубину упрочнения с плавным переходом от упрочненной поверхности к неупрочненной, что особенно важно для материалов, работающих в условиях статического нагружения; во-вторых, имеется возможность обработки деталей любых размеров и конфигураций; в-третьих, появляется возможность локального упрочнения участков деталей.

Однако исследование возможности повышения прочностных свойств материала за счет создания в нем гетерогенной структуры деформационным упрочнением не проводилось.

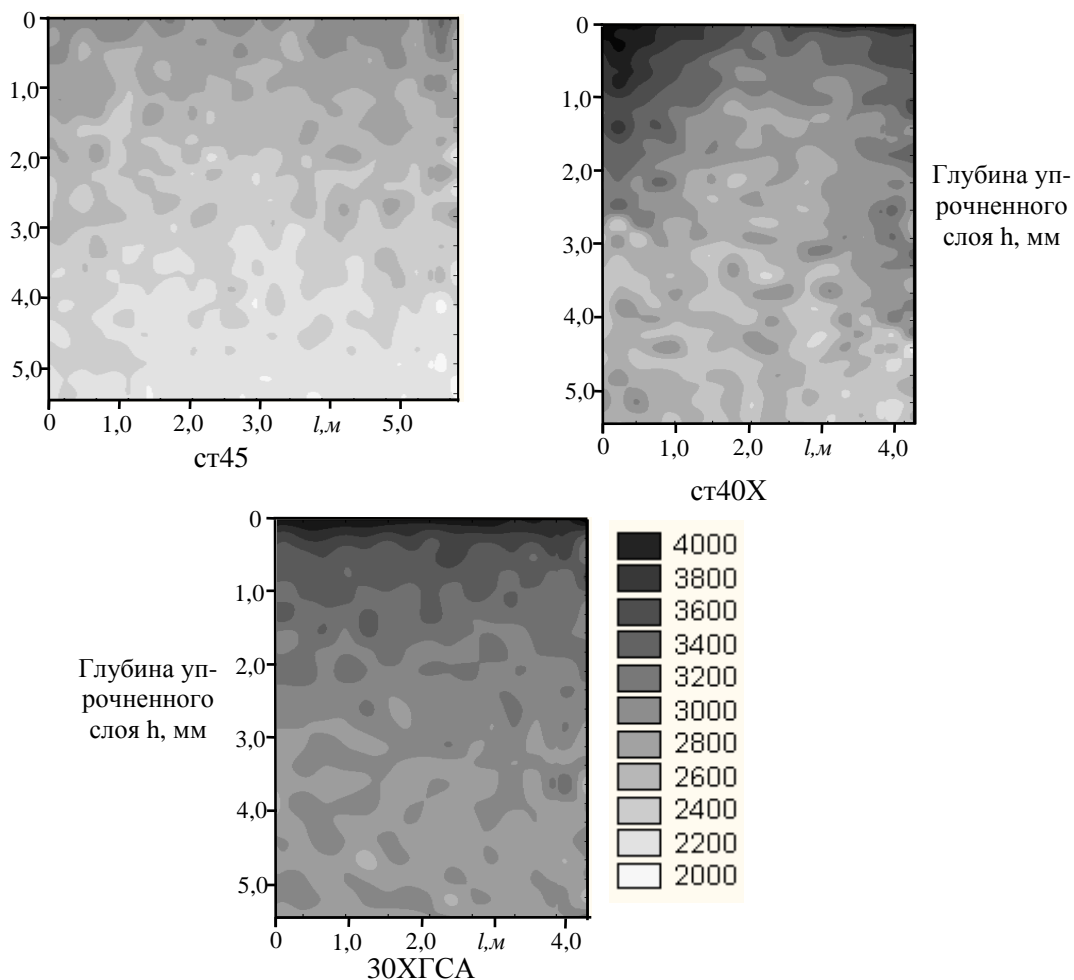


Рис. 1. Примеры распределения микротвердости (МПа) в поверхностном слое с гетерогенной структурой, полученной упрочнением волной деформации, у сталей 45, 40X, 35XГСА (сталь 45 – исходная твердость 2000 МПа; сталь 40X – исходная твердость 2200 МПа; удельная энергия удара $a=4$ Дж/мм; коэффициент перекрытия отпечатков $K=0,4$)

Одними из причин этого являются низкая точность при создании методами ППД упрочненного поверхностного слоя большой толщины, отсутствие исследований равномерности упрочненного наклепанного слоя и его влияния на прочност-

ные свойства деталей, изготовленных из разных сталей. Целью дальнейших исследований является изучение возможности повышения прочности сталей 45, 40Х, 35ХГСА упрочнением волной деформации.

Исследование влияния упрочнения волной деформации на прочность сталей 45, 40Х, 35ХГСА

Для решения поставленной задачи предлагается использовать волновое деформационное упрочнение, которое 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) [1]. 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. Равномерность перекрытия пластических отпечатков оценивается через коэффициент перекрытия K . Диапазон изменения K составляет от 0 до 1: при $K = 0$ отпечатки не перекрываются, края отпечатков граничат друг с другом; при $K = 1$ происходит полное перекрытие отпечатков, удары наносятся в одно и то же место. В результате измерений микротвердости установлено, что при режимах обработки, когда $0 \leq K \leq 0,5$, формируется явно выра-

женная гетерогенная структура упрочненного поверхностного слоя, для которой характерно чередование твердых и мягких областей (рис. 1). При режимах обработки, когда $0,5 < K < 0,8$, поверхностный слой упрочняется достаточно равномерно, а неравномерно упрочненные участки смещаются в подповерхностный слой. При режимах, когда $0,8 \leq K < 1$, формируется практически полностью равномерно упрочненный поверхностный слой, а на поверхности появляются микротрещины – результат перенаклепа [1-6].

Для проведения исследований влияния упрочнения волной деформации на прочность использовались плоские образцы из сталей 45, 40Х и 35ХГСА толщиной 7 мм. Выбор материалов образцов обоснован тем, что стали 40Х и 35ХГСА достаточно часто используются для изготовления деталей машин, работающих в тяжелых условиях, и к ним предъявляются повышенные требования по прочности. Сталь 45 является эталонной в машиностроении. При упрочнении создавалась гетерогенная структура с равномерностью $0,2 < K < 0,9$. В качестве инструмента использовался стержневой ролик шириной и диаметром 10 мм. Удары наносились с энергией 25 Дж. Исследования прочностных свойств выполнялись как на образцах, упрочненных только с одной стороны (контактной), так и на образцах, упрочненных с двух сторон (контактной и опорной).

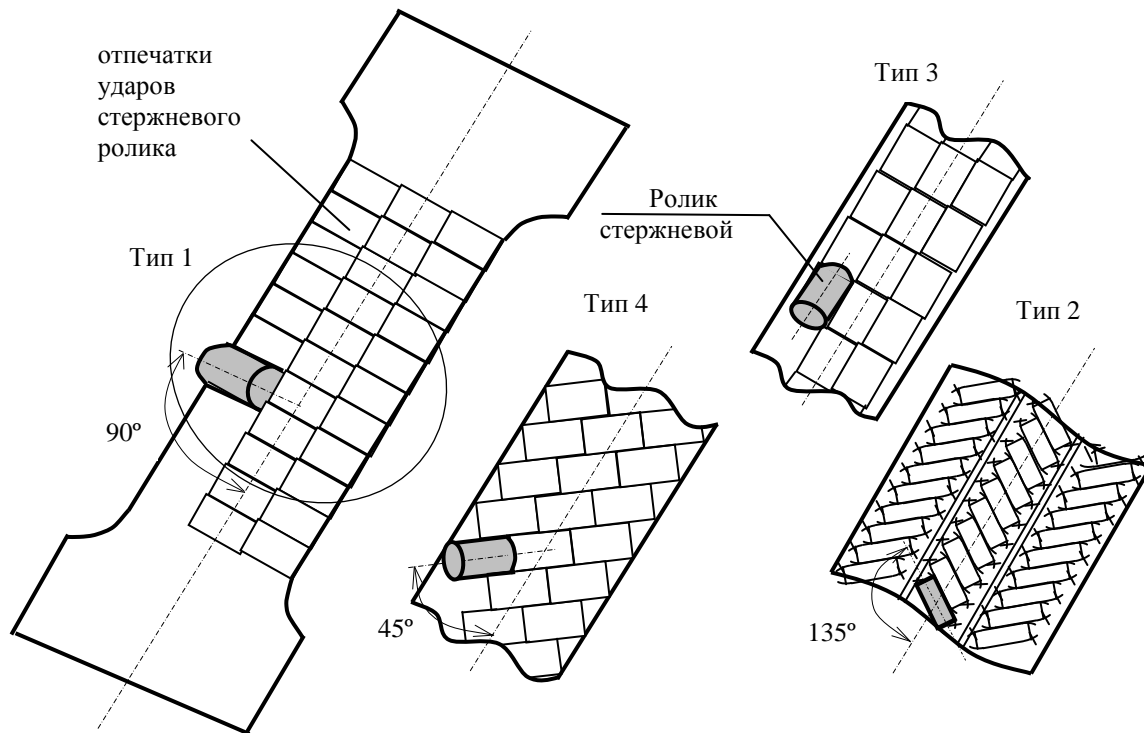


Рис. 2. Типы направлений расположения отпечатков ударов инструмента (стержневого ролика) в поверхностном слое образцов из стали 45, упрочненных с перекрытием $K=0,4$

Прочностные характеристики исследуемых образцов определялись на универсальной электромеханической машине с

компьютерным управлением серии WDW100E.

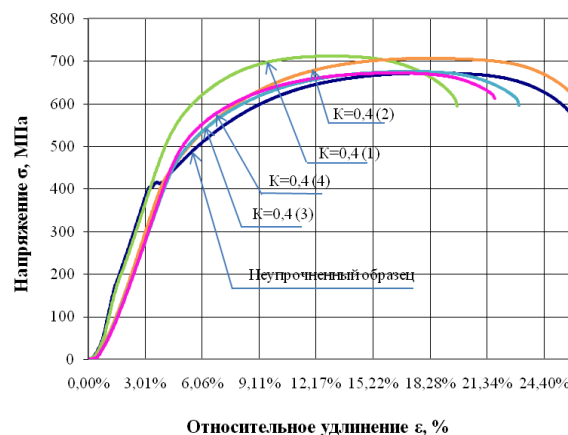


Рис. 3. Диаграмма растяжения образцов из стали 45, упрочненных с перекрытием $K=0,4$, для различных типов нанесения отпечатков ударов инструмента при упрочнении относительно направления его подачи

Также проводились исследования, устанавливающие влияние на прочностные свойства направлений расположения отпечатков ударов инструмента (стержневого ролика) в поверхностном слое (рис. 2). Исследовалось влияние на прочностные свойства четырех типов расположения отпечатков инструмента, полученных при одинаковых режимах упрочнения. Различия между типами нанесения отпечатков

заключалось в их расположении в поверхностном слое относительно оси симметрии упрочняемого образца (рис. 2).

В результате прочностных испытаний было установлено, что за счет нанесения отпечатков по типу 1 и 2 (рис. 3) удалось повысить предел прочности материала на 4-5%. Расположение отпечатков по типу 1, в отличие от типа 2, позволило получить в образцах при сравнительно рав-

ных величинах предела прочности большие значения предела упругости. Поэтому в дальнейшем применяется нанесение отпечатков по типу 1 для упрочнения всех образцов.

Так, в результате одностороннего упрочнения волной деформации стали 45 наибольшее значение повышения предела прочности - 8% (рис. 4) достигнуто при $K=0,7$; при этом предел упругости повы-

сился на 43%, а пластичность уменьшилась на 37% по сравнению с неупрочненными образцами. Также установлено, что при упрочнении стали 45 с увеличением коэффициента перекрытия с 0,1 до 0,7 предел прочности увеличивается от 2,6 до 8%, пластичность снижается на 37%, а предел упругости повышается с 8,6 до 43%.

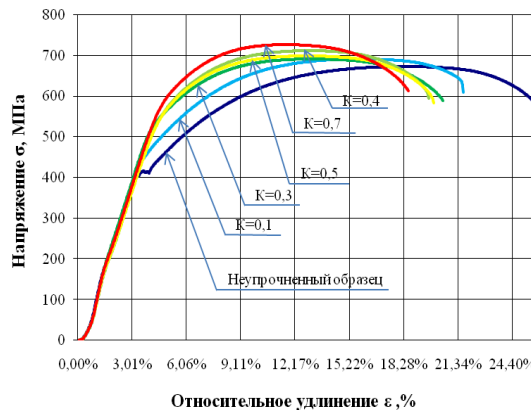
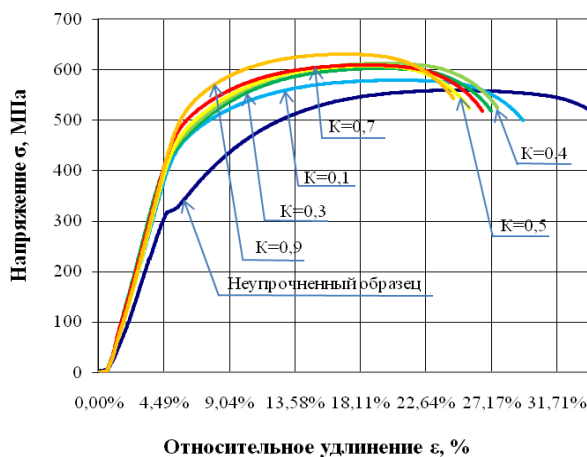


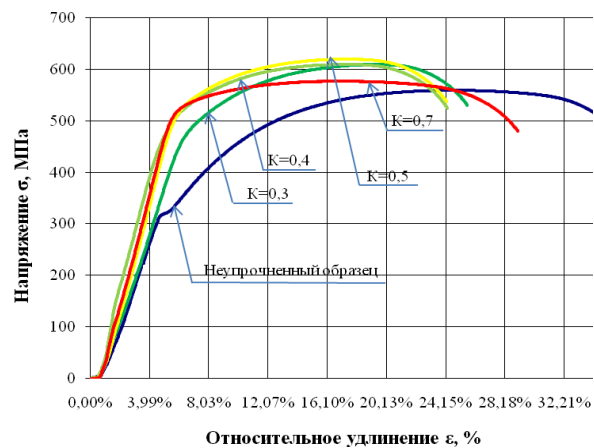
Рис. 4. Диаграмма растяжения образцов из стали 45, упрочненных волной деформации с различным коэффициентом перекрытия отпечатков (K)

При одностороннем упрочнении стали 40X наибольшее значение повышения предела прочности - 13% (рис. 5а) достигнуто при $K=0,9$; при этом предел упругости повысился на 81%, а пластичность уменьшилась на 38% по сравнению с не-

упрочненными образцами. При упрочнении образцов из стали 40X с увеличением коэффициента перекрытия K от 0,1 до 0,9 предел прочности повысился с 3,5 до 13%, пластичность уменьшилась на 38%, а предел упругости увеличился с 39 до 81%.



а)



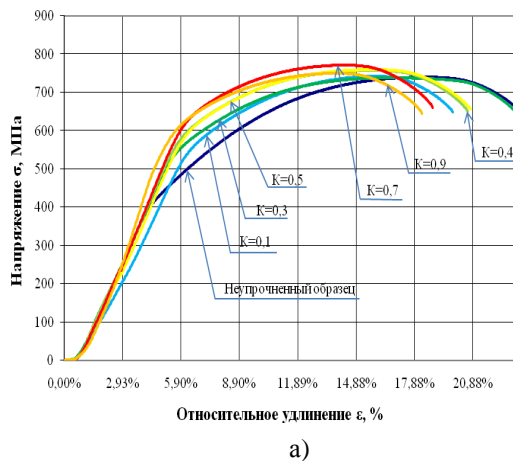
б)

Рис. 5. Диаграмма растяжения образцов из стали 40X, упрочненных с различным перекрытием (K): а - с контактной стороны; б - с контактной и опорной сторон

При двухсторонней обработке (рис. 5б) у образцов из стали 40X, упрочненных с коэффициентом перекрытия K от 0,3 до 0,5, значения пределов прочности, пластичности, упругости практически не из-

менились по сравнению с односторонним упрочнением. Это связано с тем, что уже на стадии односторонней обработки исследуемые образцы из стали 40X (толщиной 7 мм) были упрочнены насквозь. По-

этому двухстороннее упрочнение не повлияло на предел прочности. На образцах с $K=0,7$ при двухстороннем упрочнении в



связи с перенаклёпом наблюдалось снижение предела прочности на 6,5% по сравнению с односторонней обработкой.

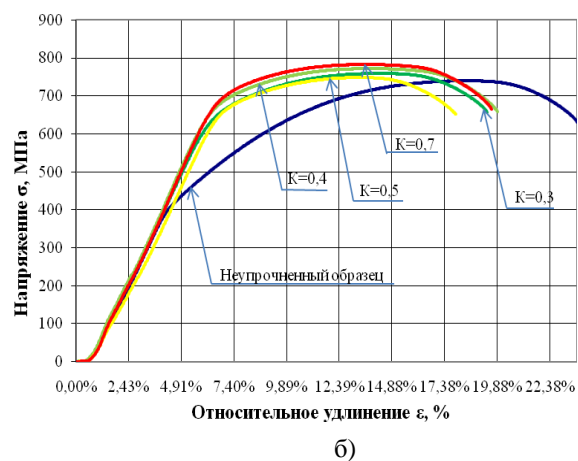


Рис. 6. Диаграмма растяжения образцов из стали 35ХГСА, упрочненных с различным перекрытием (K): а - с контактной стороны; б - с контактной и опорной сторон

Одностороннее упрочнение стали 35ХГСА волной деформации позволило добиться повышения предела прочности лишь на 4,2% (рис. 6а) при $K=0,7$; при этом предел упругости удалось повысить на 51%, а пластичность в результате уменьшилась на 28% по сравнению с неупрочненными образцами. При упрочнении стали 35ХГСА увеличение коэффициента перекрытия с 0,1 до 0,7 приводит к увеличению предела прочности с 0,4 до 4,2%, предела упругости - с 39 до 51% и уменьшению пластичности на 28% по сравнению с неупрочненными образцами. У образца с

$K=0,9$, по сравнению с $K=0,7$, наблюдается уменьшение пределов прочности и пластичности из-за перенаклёпа.

В отличие от стали 40Х сталь 35ХГСА имеет на 50% больший предел текучести, поэтому она может выдерживать большие нагрузки. Это позволило достичь при двухстороннем упрочнении с изменением коэффициента перекрытия с 0,3 до 0,7 роста предела прочности с 2 до 2,8%, предела упругости - с 15,3 до 20% и уменьшения пластичности на 14% по сравнению с односторонней обработкой (рис. 6б).

Выводы

1. Установлено, что при одинаковых режимах упрочнения волной деформации за счет расположения отпечатков инструмента по типу 1 можно повысить предел прочности материала на 5%.

2. Установлено, что за счет применения упрочнения волной деформации образцов из сталей 45, 40Х, 35ХГСА только с одной стороны (контактной) возможно увеличить предел прочности соответственно на 8, 13 и 4,2%, предел упругости - на 37, 81 и 51%.

3. Установлено, что в зависимости от материала и толщины стенки образца не-

обходимо принимать решение о том, какое должно быть упрочнение: одностороннее или двухстороннее. Так, например, для образцов из стали 40Х толщиной 7 мм создавать большую глубину упрочнения за счет двухсторонней обработки не эффективно, так как они при односторонней обработке упрочнялись насквозь. Для стали 35ХГСА - наоборот: из-за ее меньшей склонности к упрочнению пластическим деформированием ее двухсторонняя обработка привела к росту предела прочности на 2,8%, предела упругости - на 20% по сравнению с односторонней обработкой.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №16-38-00698 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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).
2. 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.
3. Kirichek, A.V. Study of Methods Relating to Increase of Contact Pitting Resistance in 45, 40H, 35HGSA Steel due to Development of Heterogeneous Structure Involving Mechanical Hardening Technique / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 756. - P. 65-69
4. Киричек, А.В. Влияние параметров гетерогенной структуры на сопротивление контактному выкрашиванию / А.В. Киричек, С.В. Баринов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 4 (48). - С. 54-58.
5. Kirichek, A.V. Dimensional Effects in Micro- and Nanostructural Changes in Grain and Intragrained Structure of Steel 45 at Static-pulse Treatment / A.V. Kirichek, A.P. Kuzmenko, D.L. Soloviev, S.V. Barinov, A.Yu. Altukhov, S.A. Silantiev, A.N. Grechukhin, Myo Min Than, M.B. Dobromyslov // Journal of Nano and Electronic Physics. - 2015. - Vol. 7. - № 4.
6. Киричек, А.В. Исследование материала с гетерогенными свойствами, полученными волновым деформационным упрочнением / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин, М.Н. Медведев, А.А. Скотников // Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии: сб. тр. по материалам междунар. науч. симп. технологов-машиностроителей (г. Ростов-на-Дону, 14-17 сент. 2016 г.). - Ростов н/Д: ДГТУ, 2016. - 284 с.
1. Kirichek, A.V. Technology and Equipment for Static-Pulse Treatment with Surface Plastic Deformation / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, A.G. Lazutkin. - M.: Mechanical Engineering, 2004. - pp. 288. - (Technologist's Library).
2. Kirichek, A.V. Contact endurance increase in machine parts by heterogeneous deformation strengthening with static-pulse treatment / A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, S.V. Barinov, S.A. Silantiev // Strengthening Technologies and Coatings. - 2008. - № 7 (43). - pp. 9-15.
3. Kirichek, A.V. Study of Methods Relating to Increase of Contact Pitting Resistance in 45, 40H, 35HGSA Steel due to Development of Heterogeneous Structure Involving Mechanical Hardening Technique / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 756. - P. 65-69
4. Kirichek, A.V. Heterogeneous structure parameter impact upon contact spalling resistance / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2015. - № 4 (48). - pp. 54-58.
5. Kirichek, A.V. Dimensional Effects in Micro- and Nanostructural Changes in Grain and Intragrained Structure of Steel 45 at Static-pulse Treatment / A.V. Kirichek, A.P. Kuzmenko, D.L. Soloviev, S.V. Barinov, A.Yu. Altukhov, S.A. Silantiev, A.N. Grechukhin, Myo Min Than, M.B. Dobromyslov // Journal of Nano and Electronic Physics. - 2015. - Vol. 7. - № 4.
6. Kirichek, A.V. Analysis of material with heterogeneous properties obtained by wave deformation strengthening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin, M.N. Medvedev, A.A. Skotnikov // Promising trends in finishing method development of parts machining; vibro-wave technologies: Proceedings of the Inter. Scientific Symposium of Technologist-Mechanists (Rostov-upon-Don, September 14-17, 2016). - Rostov/Don: DSTU, 2016. - pp. 284.

Статья поступила в редколлегию 27.12.16.

Рецензент: д.т.н., профессор МИ ВлГУ

Соловьев Д.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.

Баринов Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Автоматизированное проектирование машин» Муромского института (филиала) Вла-

Kirichek Andrey Victorovich, D. Eng., Prof., Pro-rector for Promising Development of Bryansk State Technical University, e-mail: avk.57@yandex.ru.

Barinov Sergey Vladimirovich, Can. Eng., Assistant Prof., head of the Dep. "Machine CAD", Murom Insti-

турского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: 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.

tute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: box64@rambler.ru.

Yashin Alexander Vasilievich, Head of the Laboratories of the "ET" Dep., Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: yashin2102@yandex.ru.

