

УДК 621.787.6.004

DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-50-57

А.В. Киричек, С.В. Баринов, С.А. Силантьев,
А.В. Яшин, А.М. Константинов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Описаны конструкции экспериментальных стендов для исследования закономерностей процессов волнового деформационного упрочнения. Выявлены достоинства и недостатки известных конструкций. Предложена новая конструкция стенда, позволяющая исследовать влияние на процесс волнового деформационного упрочнения элементов ударной системы, параметры которой варьируются

в широком диапазоне, а также наносить серии отпечатков на исследуемую поверхность образца с обеспечением заданной точности их взаимного расположения.

Ключевые слова: экспериментальный стенд, ударная система, боек, волновод, упрочнение, волна деформации, ВДУ, ударный импульс.

A.V. Kirichek, S.V. Barinov, S.A. Silantiev, A.V. Yashin, A.M. Konstantinov

TEST BENCH FOR INVESTIGATION OF WAVE DEFORMATION STRENGTHENING PROCESSES

In the paper there are described designs of test benches to investigate the regularities of wave deformation strengthening processes. The advantages and disadvantages of well-known designs are revealed. A design of a new advanced test bench having wider technological potentialities and saved from the drawbacks revealed of the equipment created earlier is offered. A new design of the bench allows investigating the influence upon a process of a wave deformation strengthening of the elements of a shock system the parameters of which are varied in a wide range and

applying also a series of marks upon a tested surface of a sample with the assurance of a specified accuracy of their mutual disposition.

The test bench developed is essential for the fulfillment of experimental investigations of the interconnection between wave deformation parameters, a shape, dimensions of samples to be strengthened and a card of micro-hardness of a strengthened surface layer.

Key words: test bench, shock system, head, waveguide, strengthening, deformation wave, WDS, shock pulse.

Одним из наиболее эффективных способов упрочнения поверхностным пластическим деформированием является волновое деформационное упрочнение (ВДУ). Способ заключается в применении ударной системы с промежуточным звеном, генерирующей волну деформации в элементах ударной системы - бойке и волноводе, сообщении ее в очаг деформации, формировании волновых состояний не только в поверхностном слое, но и в объеме материала упрочняемой детали. Высокая эффективность способа обеспечивается за счет наиболее полного использования энергии волны деформации на упруго-пластическую деформацию упрочняемого материала путем предварительного статического поджатия системы «инструмент -

волновод» к обрабатываемой поверхности и последующего динамического нагружения бойком. Статическое поджатие обеспечивает рекуперацию отраженных волн деформации. Значимые эффекты, вызванные деформацией среды, наблюдаются на глубине 6-8 мм, степень упрочнения достигает 150 % [1]. В зависимости от требуемых параметров упрочнения поверхностного слоя подбираются элементы ударной системы, генерирующие ударный импульс требуемой амплитуды и длительности [8; 9]. За счет управления параметрами волны деформации появляется возможность формировать не только равномерно упрочненный поверхностный слой, но и гетерогенно упрочненные области [2; 3].

При проведении инженерных расчетов конечностью габаритных размеров деталей в исследуемых моделях, как правило, пренебрегают. Это позволяет, с одной стороны, значительно упростить алгоритм и сократить время расчета, а с другой - распространить полученные результаты расчета на все без ограничений детали, выполненные из рассматриваемого материала, вне зависимости от их формы и размеров, исключить учет влияния масштабного фактора на исследуемый процесс. Однако вследствие волнового характера упрочнения форма и размеры детали могут оказывать существенное влияние на характер упрочнения, так как на всех границах с различными акустическими жесткостями происходит деление проходящей волны деформации на прямую и отраженную волны. При изготовлении детали из монолитной заготовки однородного материала изменение акустической жесткости связано с изменением размеров конструктивных элементов (толщина стенок, размеры и расположение отверстий, бобышек и т.д.), а также с габаритными размерами, так как на наружных поверхностях исследуемого образца тоже происходят волновые преобразования. Возникающие в каждой элементарной точке детали волновые состояния определяются сложением всех проходящих через точку прямых и отраженных волн. С учетом того, что скорость распространения волны деформации соответствует скорости звука в материале, длительность единичного импульса составляет порядка $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с, а скорость рабочей подачи многократно меньше, волновые состояния в одной и той же элементарной точке детали в процессе обработки непрерывно меняются. Предварительными исследованиями установлено значимое влияние на процесс ВДУ геометрических размеров, так как при равных объемах упрочняемых образцов и аналогичных режимах обработки имеют место разные карты распределения микротвердости в поверхностном слое [4-6]. Следовательно, при исследовании ВДУ ответственных деталей не следует исключать влияние конечных размеров на процесс упрочнения.

Экспериментальное оборудование для исследования процессов ВДУ можно условно разделить на два основных типа.

К первому типу оборудования относится стенд для ВДУ, представляющий собой полноразмерную промышленную установку, позволяющую упрочнять большую номенклатуру изделий разных габаритных размеров [2]. Она позволяет управлять в широком диапазоне энергией удара, формировать серии пластических отпечатков удара инструмента с точной регулировкой их перекрытия между собой. Однако использование данного стенда для исследований взаимосвязей между параметрами волны деформации, формой и размерами упрочняемых образцов невозможно из-за невозможности замены элементов ударной системы, от которых зависит формирование волн деформации с заданными параметрами. Для замены элементов ударной системы необходимо рассчитывать и изготавливать не только новые боек и волновод, но и новый корпус генератора импульсов, что достаточно трудоёмко и дорого.

Ко второму типу относятся стенды, позволяющие моделировать процесс ВДУ за счет одноконтантного воздействия волны деформации на упрочняемую поверхность [2; 7]. Они представляют собой макеты ударных систем, позволяющие производить замены их элементов (бойка и волновода). Данный тип стендов обеспечивает статическое поджатие волновода и инструмента к обрабатываемой поверхности за счет пружин. Стенды данного типа могут работать как в режиме регистрации ударного импульса, так и в режиме формирования единственного отпечатка на обрабатываемой поверхности. Принципиальным отличием данных стендов являются невысокие энергетические характеристики нагружения очага деформации.

Стенд, на котором начиналось исследование процессов нагружения материала волной деформации (рис. 1), состоит из бойка 3 и волновода 1, на конце которого жестко закреплен инструмент 2 [2]. Движение бойка 3 происходит по направляющим 4, выполненным в виде двух натянутых струн, которые с одной стороны за-

креплены на раме 5, а с противоположной - на плите 6. На боковых поверхностях рамы 5 расположены жестко закрепленные втулки 13, являющиеся направляющими для гаек 14. Затяжка гаек 14 позволяет сдвигать пружину 11 через упор 12, создавая таким образом статическое поджатие волновода 1 и инструмента 2 к нагружаемой поверхности 7, которая с помощью болтов зажимается между плитой 6 и основанием 9. В нагружаемом образце 7 размещен пьезоэлектрический датчик 8, изолированный от внешнего воздействия прокладками 15, который с помощью кабелей подключен к осциллографу 16 (модель С8-13). Для записи параметров ударного импульса в память осциллографа необходимо произвести его включение в момент удара бойка 3 по датчику 8. Для этого на раме 5 расположен винт 17 с гайкой 18, на которой установлен фотодиод 19, соединенный через преобразующую электрическую схему 20 с осциллографом 16. Напротив фотодиода 19, на раме 5, расположена электролампа с линзой 21, а на бойке 3 установлен флажок 22, изготовленный из матового материала. Команда для записи параметров ударного импульса поступает после перекрытия флажком 22 светового луча от электрической лампочки 21.

Другой конструкцией стенда предусмотрено более близкое к модернизированному экспериментальному оборудованию исполнение [7]. Стенд состоит из массивной чугунной станины 1, на которую крепится плита 2 и исследуемый образец 3 (рис. 2). Для монтажа образцов цилиндрической формы предусмотрена призма 4. Статическое поджатие волновода 6 с закрепленным на нем инструментом 5 к исследуемому образцу 3 выполняется набором листовых пружин 8 и винтами 7. Перемещение бойка 9 осуществляется тремя направляющими струнами 10, натянутыми между пластиной 13 и кронштейном 14. Взвод бойка 9 производится с помощью троса 11 и устройства 12. Пьезоэлектрический датчик расположен в исследуемом образце 3 и соединен с ЭВМ с помощью аналого-цифрового преобразователя.

Недостатками ранее созданных стендов второго типа являются сложность точ-

ного регулирования величины статического поджатия, узкий диапазон и шаг регулировки. Необходима тщательная изоляция пьезоэлемента от действия влаги, дополнительные сложности возникают при оцифровке параметров ударных импульсов. Отсутствует возможность нанесения на образец серии отпечатков, расположенных относительно друг друга с высокой точностью. Сложно обеспечить повторяемость торцевого контакта бойка и волновода при ударе - вследствие использования гибких струн в качестве направляющих при движении бойка.

Целью данной работы является разработка нового, усовершенствованного экспериментального стенда второго типа с более широкими возможностями, избавленного от перечисленных недостатков и позволяющего легко заменять в процессе исследований элементы ударной системы и обеспечивать нанесение серии отпечатков на исследуемую поверхность образца. Разработанное оборудование необходимо для выполнения экспериментальных исследований взаимосвязи между параметрами волны деформации, формой, размерами упрочняемых образцов и картой микротвердости упрочненного поверхностного слоя.

Разработанная конструкция стенда состоит из портальной рамы 10, в которой по направляющим 15 происходит вертикальное перемещение плиты 8 с помощью гидроцилиндров 11 (рис. 3). Ударная система состоит из бойка 1 и волновода 2. Инструмент 16 закрепляется на нижнем торце волновода 2 и поджимается им к обрабатываемой поверхности 5. Использование трубчатой направляющей 4 позволяет избежать смещения и перекоса при падении бойка 1, обеспечить высокую повторяемость условий торцевого контакта бойка 1 с волноводом 2. Для монтажа направляющей 4 и волновода 2 к плите 8 предусмотрен корпус 3. Возможность смещения обрабатываемой поверхности между ударами в поперечном направлении обеспечивается за счет перемещения стола 7 по поперечным направляющим 9. Перемещение стола осуществляется посредством ходового винта 14, который крепится к упору

12. Контроль величины смещения стола 7 в продольном направлении выполняется индикатором часового типа со щупом 13, установленным на стойке. Для случая изменения диаметров бойка и волновода в корпусе 3 и направляющей 4 предусмотрена установка проставочных втулок, компенсирующих изменение диаметральных размеров.

В случае работы стенда в режиме формирования единичных отпечатков от ударов инструмента 16 образец 5 крепится к столу 7 с помощью прихватов 6. При работе стенда в режиме регистрации ударного импульса вместо образца 5 устанавли-

вается пьезоэлектрический датчик, который подключается к цифровому осциллографу АСК-3107L. Данный тип осциллографа имеет возможность подключения до четырех датчиков одновременно (например, в случае исследования особенностей многоконтактного нагружения при ВДУ) и обработки полученных данных на ЭВМ. При тарировке величины статического поджатия вместо нагружаемого образца 5 устанавливается датчик измерения силы (модель М50-5-С3).

Диапазон изменения технологических факторов процесса ВДУ на экспериментальном стенде представлен в таблице.

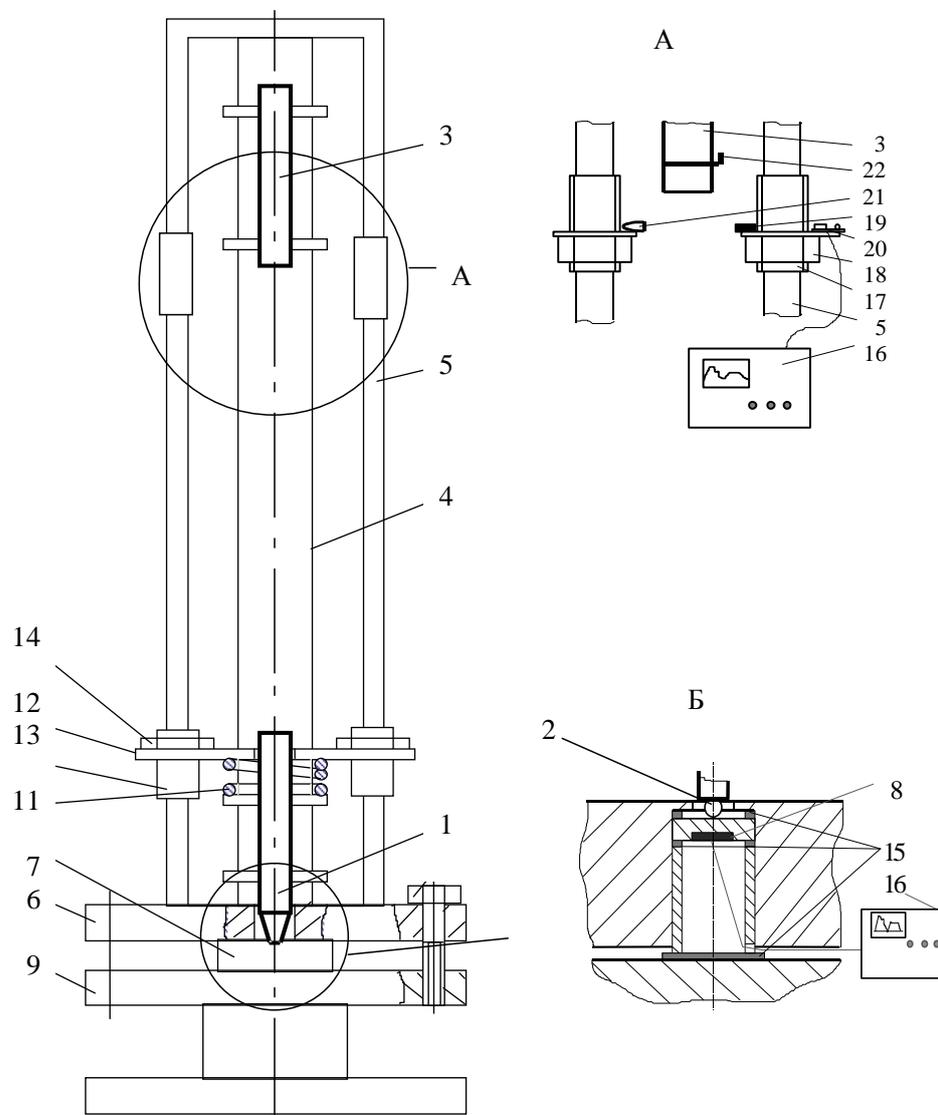


Рис. 1. Схема экспериментального стенда [2]

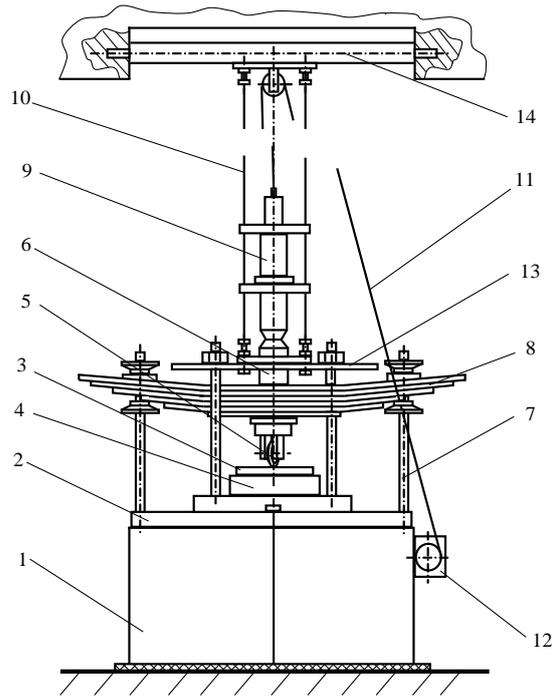


Рис. 2. Схема модернизированного экспериментального стенда [7]

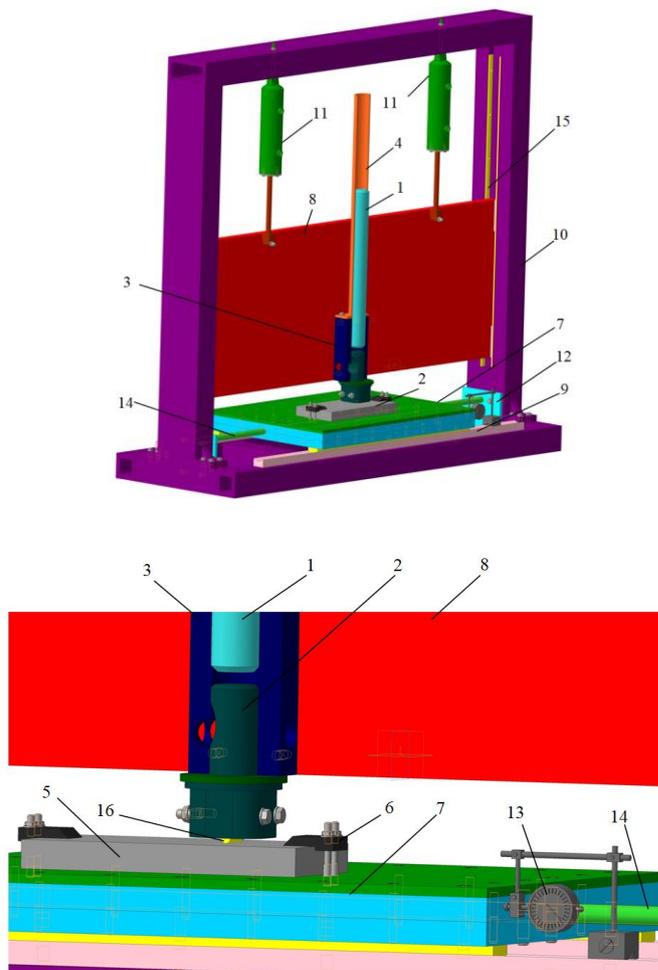


Рис. 3. Схема разработанного экспериментального стенда

Испытания на стенде выполняются следующим образом. Нагружаемый образец 5 закрепляется на столе 7 с помощью прихватов 6. На волноводе 2, расположенном в корпусе 3, закрепляется инструмент 16 и с помощью плиты и гидроцилиндров 11 статически поджимается к нагружаемому образцу 5. Боек 1 с помощью троса (не показан), закрепленного на его торце, взводится на требуемую высоту, которая рассчитывается исходя из массы бойка и заданной энергии удара. После пуска бойка

1 под действием собственного веса наносит удар по торцу волновода 2, на котором жестко смонтирован инструмент 16. В результате на исследуемой поверхности образца 5 формируется отпечаток деформирующей поверхности инструмента. Исходя из размера отпечатка рассчитывается величина подачи и требуемое расстояние между центрами отпечатков, обеспечивающее необходимую величину коэффициента перекрытия.

Таблица

Технологические факторы ВДУ, измеряемые на экспериментальном стенде

№	Фактор	Размерность	Диапазон величин
1	Энергия удара	Дж	До 40
2	Длительность ударного импульса	Н	$10^{-5} \dots 10^{-4}$
3	Скорость удара	м/с	До 8
4	Величина предварительной статической нагрузки	кН	До 40
5	Длины: бойка волновода	мм	100-600
		мм	100-600
6	Диаметры: бойка волновода	мм	16-60
		мм	16-60

Затем с помощью ходового винта 14 выполняется продольное смещение нагружаемого образца 5 на рассчитанную величину. Контроль величины перемещения обеспечивается с помощью индикатора 13. Далее вновь происходит статическое поджатие образца 5 волноводом 2 с инструментом 16 и наносится второй удар бойка

1 по нагружаемой поверхности 5. Таким образом, на обрабатываемом образце 5 формируется упрочненная дорожка, состоящая из отпечатков ударов инструмента, смещенных друг относительно друга на заданное расстояние (рис. 4). Количество наносимых ударов определяется планом эксперимента.

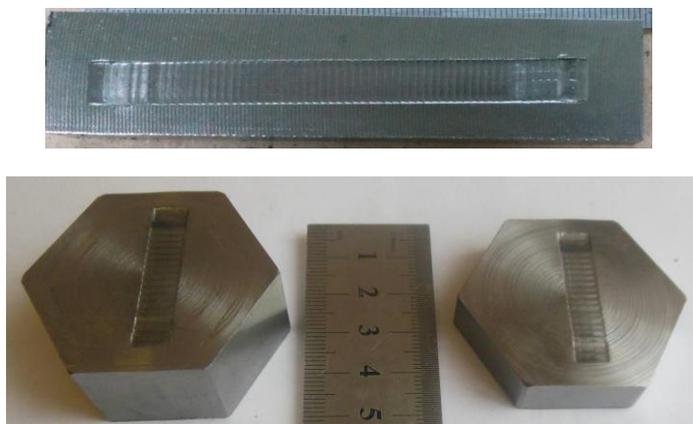


Рис. 4. Примеры серий отпечатков на поверхности образцов (при ударе роликом) после ВДУ

Данное оборудование удобно использовать для выявления взаимосвязей между параметрами волны деформации, формой, размерами упрочняемых образцов

и картой микротвердости поверхностного слоя, характеризующей упрочнение материала.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00676 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / отв. ред. А.С. Васильев [и др.]. М.: Инновационное машиностроение, 2018. Т. 2. 818 с.
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 288 с. (Б-ка технолога).
3. Kirichek A.V., Barinov S.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 // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 756. P. 65-69. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.65.
4. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V. The peculiarities of the influence of the finite sizes of a detail on the distribution of the surface layer microhardness in case it is hardened by a deformation wave // *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2015. Vol. 7, no. 4. P. 04019. DOI: 2077-6772/2015/7(4)04019(4).
5. Kirichek A.V., Kuzmenko A.P., Soloviev D.L., Barinov S.V., Altukhov A.Yu., Silantiev S.A., Grechukhin A.N., Myo Min Than, Dobromyslov M.B. Dimensional Effects in Micro- and Nanostructural Changes in Grain and Intragrained Structure of Steel 45 at Static-pulse Treatment // *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2015. Vol. 7, no. 4. P. 04023.
6. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Kolontsov S.E. The investigation of the deformation wave hardening effect on the strength of the medium and low alloy steels // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 177 (2017) 012121. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012121.
7. Афонин А.Н., Киричек А.В. Резьбонакатывание. М.: Машиностроение, 2009. 312 с. (Б-ка технолога).
8. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформации в ударных системах. М.: Наука, 1985. 357 с.
9. Александров В.М., Ромалис Б.Л. Контактные задачи в машиностроении. М.: Машиностроение, 1986. 170 с.
1. Technologist-mechanist's reference book: in 2 Vol. / A.S. Vasiliev - responsible editor [et al.]. M.: *Innovation Mechanical Engineering*, 2018. Vol. 2, pp. 818.
2. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Lazutkin A.G. *Technology and Equipment of Static-pulse Processing with Surface Plastic Deformation*. M.: Mechanical Engineering, 2004. pp. 288. (Technologist's Library).
3. Kirichek A.V., Barinov S.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 // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 756. P. 65-69. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.65.
4. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V. The peculiarities of the influence of the finite sizes of a detail on the distribution of the surface layer microhardness in case it is hardened by a deformation wave // *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2015. Vol. 7, no. 4. P. 04019. DOI: 2077-6772/2015/7(4)04019(4).
5. Kirichek A.V., Kuzmenko A.P., Soloviev D.L., Barinov S.V., Altukhov A.Yu., Silantiev S.A., Grechukhin A.N., Myo Min Than, Dobromyslov M.B. Dimensional Effects in Micro- and Nanostructural Changes in Grain and Intragrained Structure of Steel 45 at Static-pulse Treatment // *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2015. Vol. 7, no. 4. P. 04023.
6. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Kolontsov S.E. The investigation of the deformation wave hardening effect on the strength of the medium and low alloy steels // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 177 (2017) 012121. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012121.
7. Afonin A.N., Kirichek A.V. *Thread Rolling*. M.: Mechanical Engineering, 2009. pp. 312. (Technologist's Library).
8. Alimov O.D., Manzhosov V.K., Yeremiyants V.E. *Blow. Deformation Wave Propagation in Shock Systems*. M.: Science, 1985. pp. 357.
9. Alexandrov V.M., Romalis B.L. *Contact Problems in Mechanical Engineering*. M.: Mechanical Engineering, 1986. pp. 170.

Ссылка для цитирования:

Киричек А.В., Баринов С.В., Силантьев С.А., Яшин А.В., Константинов А.М. Экспериментальный стенд для исследования процессов волнового деформационного упрочнения // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 12. С. 50–57. DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-50-57.

*Статья поступила в редакцию 24.11.19.
Рецензент: д.т.н., профессор Комсомольского-на-Амуре
государственного технического университета
Мокрицкий Б.Я.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 29. 11. 19.*

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 кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: box64@rambler.ru.

Силантьев Сергей Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) Владимирского

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

Barinov Sergey Vladimirovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: box64@rambler.ru.

Silantiev Sergey Alexandrovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Engineering Technique",

государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: ppdsio@yandex.ru.

Яшин Александр Васильевич, ст. преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: yashin2102@yandex.ru.

Константинов Александр Михайлович, магистрант кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: armitp@yandex.ru.

Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: ppdsio@yandex.ru.

Yashin Alexander Vasilievich, Senior lecturer of the Dep. "Engineering Technique", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: yashin2102@yandex.ru.

Konstantinov Alexander Mikhailovich, Master degree student of the Dep. "Engineering Technique", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: armitp@yandex.ru.