

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.787.6.004

doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-22-30

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОЙКА И ВОЛНОВОДА, ВНЕШНИХ ФОРМ И ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ ОБРАЗЦОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ (МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Андрей Викторович Киричек¹, Сергей Владимирович Баринов^{2✉}, Любовь Геннадиевна Никитина³, Алексей Андреевич Зайцев⁴

¹ Брянский государственный технический университет, бульвар 50 лет Октября, 7, г. Брянск, Россия.

^{2,3,4} Владимирский государственный университет, улица Горького, 87, г. Владимир, Россия.

¹ avk.57@yandex.ru, ID ORCID 2-3823-0501

² box64@rambler.ru, ID ORCID 2-1341-446X

³ nikitina-nlg@yandex.ru

⁴ armitp@yandex.ru

Аннотация

Выполнено исследование совокупного влияния внешних форм образцов и внутренних полостей, а также волн деформации, генерируемых в ударных системах с различным отношением длин бойка и волновода ($L_1/L_2=3, 5, 10$), на результаты волнового деформационного упрочнения (ВДУ).

Для проведения исследований используется конечно-элементное моделирование. Исследования выполнены на прямоугольных, треугольных и цилиндрических образцах одинаковой толщины и объема.

Влияние форм внутренних полостей на эффективность упрочнения оценивалось посредством формирования в образцах прямоугольного, треугольного и цилиндрического пазов одного и того

же объема. Исследования проводились на материалах: сталь 45, титан ВТ 1-0, бронза БрАЖ 9-4, алюминий В95.

Установлено, что прямоугольная форма, как самого изделия, так и внутреннего паза оказывает наибольшее влияние на характеристики упрочнения, по сравнению с другими рассматриваемыми формами. Установлено, что более значимое влияние на эффективность упрочнения оказывает не форма самого изделия и наличия в нем полостей, а параметры ударной системы: соотношение длин бойка и волновода.

Ключевые слова: материал, упрочнение, боек, волновод, упрочнение, форма, образец, полость.

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

Ссылка для цитирования:

Киричек А.В. Влияние параметров бойка и волновода, внешних форм и внутренних полостей образцов из различных материалов на результаты волнового деформационного упрочнения (моделирование) / А. В. Киричек, С.В. Баринов, Л.Г. Никитина, А.А. Зайцев // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 3. – С. 22 – 30. doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-22-30.

Original article

Open Access Article

INFLUENCE OF THE STRIKER AND WAVEGUIDE PARAMETERS, EXTERNAL SHAPES AND INTERNAL CAVITIES OF SAMPLES FROM VARIOUS MATERIALS ON THE RESULTS OF THE WAVE DEFORMATION HARDENING (MODELING)

Andrey Viktorovich Kirichek¹, Sergey Vladimirovich Barinov^{2✉}, Lyubov Gennadievna Nikitina³, Aleksey Andreevich Zaitsev⁴

22

© Киричек А.В., Баринов С.В., Никитина Л.Г., Зайцев А.А., 2022

¹ Bryansk State Technical University, 7, 50-let Oktyabrya Boulevard, Bryansk, Russia.

^{2,3,4} Vladimir State University, 87, Gorky Street, Vladimir, Russia.

¹ avk.57@yandex.ru, ID ORCID 2-3823-0501

² box64@rambler.ru, ID ORCID 2-1341-446X

³ nikitina-nlg@yandex.ru

⁴ apmitp@yandex.ru

Abstract

The study deals with complex effect of the external shapes and internal cavities of samples, as well as deformation waves generated in shock systems with a different ratio of striker and waveguide lengths ($L_1/L_2 = 3, 5, 10$), on the results of wave deformation hardening (WDH). Finite element modeling is used to conduct the research. The studies are performed on rectangular, triangular and cylindrical samples of the same thickness and volume.

The influence internal cavities shapes on the hardening efficiency is evaluated by forming rectangular, triangular and cylindrical grooves of the same volume in the samples. The research was carried out using

the following materials: steel 45, titanium VT 1-0, bronze BRAZH 9-4, aluminum V95.

It is stated that the rectangular shape of both the product itself and the internal groove has the greatest influence on the hardening characteristics, compared with other forms under study. It is also stated that not the shape of the product itself and the cavities in it, but the parameters of the shock system such as the ratio of striker and waveguide lengths have the more significant influence on the hardening effectiveness.

Keywords: material, hardening, striker, waveguide, shape, sample, cavity.

Funding: The study is supported by the Russian Foundation for Basic Research Grant No. 19-08-00676.

Reference for citing:

Kirichek A.V. Influence of the striker and waveguide parameters, external shapes and internal cavities of samples from various materials on the results of wave deformation hardening (modeling) / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, L.G. Nikitina, A.A. Zaitsev // Transport Engineering. - 2022. - no. 3. - p.22 – 30. doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-22-30.

Введение

Технология волнового деформационного упрочнения (ВДУ) находит применение в современной промышленности для повышения долговечности изделий [1]. В основе способа лежит нагружение обрабатываемого материала волнами деформации, генерируемыми ударной системой [2-5]. Упрочнение материала имеет волновой характер, формируется вследствие воздействия на элементарную область образца совокупности прямых и отраженных волн деформации [6-8]. Известно, что на эффективность передачи энергии волны деформации при ВДУ большое влияние оказывают параметры элементов ударной системы (отношение длин бойка L_1 и волновода L_2) и материал среды нагружения (рис. 1) [9-12]. Установлено, что значимое влияние на эффективность упрочнения при ВДУ оказывают размеры обрабатываемого образца [13-15].

Особенности формирования упрочненного слоя в процессе ВДУ объясняются тем, что энергия в очаг деформации поступает в виде подготовленной волны упругой деформации, которая генерируется при ударе бойка по волноводу. Длина и бойка,

и волновода превышает длину волны, которая распространяется по элементам ударной системы и в обрабатываемом образце со скоростью звука. Проходя через участки с разными акустическими жесткостями, волна деформации преобразуется на всех границах участков на проходящую и отраженную волны. Вследствие высокой скорости распространения волн в металлах, в упрочняемом образце формируются волновые состояния, являющиеся уникальными в каждый конкретный момент времени. Упрочнение материала является следствием интерференции волн деформации в каждом элементарном объеме образца. Исходя из данных теоретических положений, результаты упрочнения зависят не только от конечных размеров, но и от формы образца, а также наличия, размеров и формы полостей в нем.

Целью работы является исследование влияния отношения длин бойка и волновода, форм образцов и внутренних полостей обрабатываемого материала на характер волнового деформационного упрочнения. Исследование выполнено с привлечением средств современного инженерного анали-

за, конечно-элементного моделирования, что позволяет быстро получить большой

объем информации и значительно сократить сроки проведения исследований.

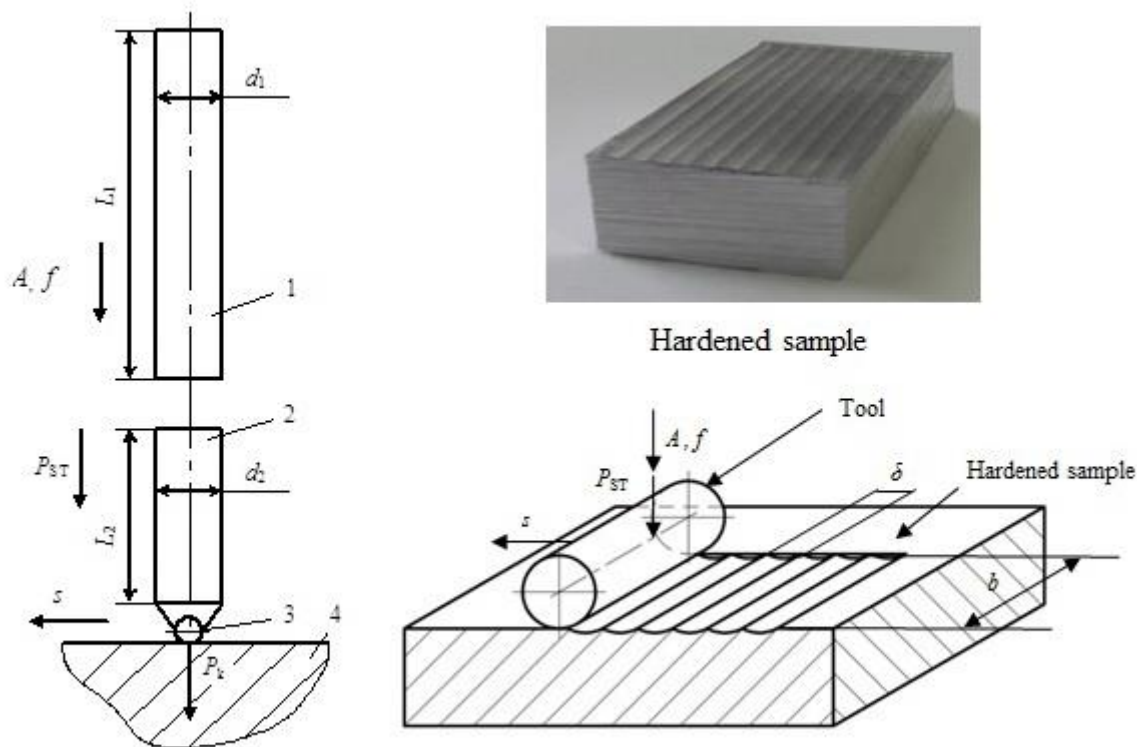


Рис. 1. Схема волнового деформационного упрочнения (ВДУ):

1 – боек, 2 – волновод, 3 – инструмент, 4 – упрочняемый образец, A – энергия удара, f – частота ударов, $P_{СТ}$ – статическая нагрузка, P_k – контактная сила в очаге деформации, s – подача, b – ширина инструмента, L_1, L_2 – длина бойка и волновода, d_1, d_2 – диаметр поперечного сечения бойка и волновода, δ – размер пластического отпечатка

Fig.1. Scheme of wave strain hardening (WDS): 1 - striker, 2 - waveguide, 3 - tool, 4 - hardened sample, A - impact energy, f - impact frequency, $P_{СТ}$ - static load, P_k - contact force in the deformation zone, s - feed, b - tool width, L_1, L_2 is the length of the striker and waveguide, d_1, d_2 is the cross-sectional diameter of the striker and the waveguide, δ is the size of the plastic indentation

Материалы, модели, эксперименты и методы

Средой для проведения конечно-элементного моделирования является программный комплекс Ansys - мультидисциплинарная платформа для решения широкого спектра задач.

На первом этапе исследования создавались модели обрабатываемых материалов. Для этого использовались данные справочной литературы и результаты проведенных механических испытаний образцов из используемых для ВДУ материалов. На втором этапе, моделировались ударные системы с диапазоном отношений длин бойка L_1 и волновода L_2 3...10. Для каждого материала разные соотношения L_1/L_2 дают индивидуальные формы ударного импульса (закон изменения силы удара во

времени), которые использовались при создании моделей ВДУ на третьем этапе. Модель ВДУ состояла из обрабатываемого материала 2, инструмента, наносящего удары 1 и стола 3 (рис. 2). Инструмент, согласно закону изменения силы во времени (зависящего от отношений L_1/L_2), полученном на втором этапе, наносит серию ударов по обрабатываемому материалу 2, который продольно движется вместе со столом 3. Обрабатываемый материал 2, без каких либо ограничений и граничных условий (свободно) размещен на столе 3. Равномерность нанесения ударов по обрабатываемому материалу определяется с помощью коэффициента перекрытия K , который зависит от размера отпечатка

удара инструмента, частоты ударов и скорости движения обрабатываемого материала. В случае $K = 1$, удары наносятся без смещения образца (в одно и то же место). При $K = 0$, края отпечатков ударов инструмента перекрываются и граничат друг с другом [2].

В моделях, в качестве инструмента 1, использовался стержневой ролик диаметром 10 мм и длиной 30 мм. Удары наносились с энергией 30 Дж и коэффициентом

перекрывтия $K = 0,4$. Для оценки влияния разных типов волн деформаций созданы модели ударных систем, с отношением длин бойка L_1 и волновода L_2 : 3, 5, 10. В качестве обрабатываемых материалов использовались: сталь 45, титан ВТ 1-0, бронза БрАЖ 9-4, алюминий В-95. Выбор материалов обоснован широтой их применения для изготовления разнообразных изделий в промышленности.

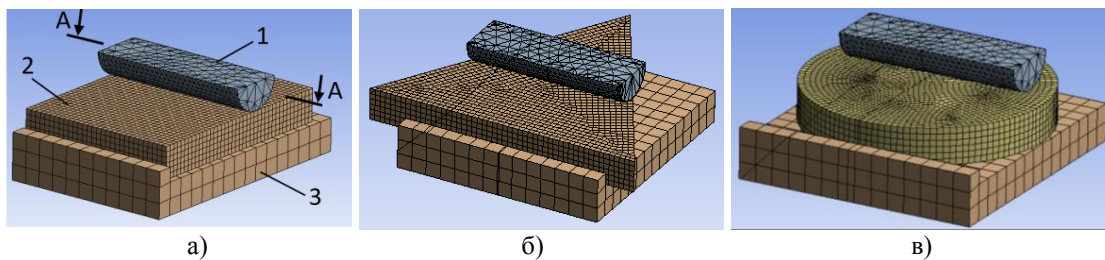


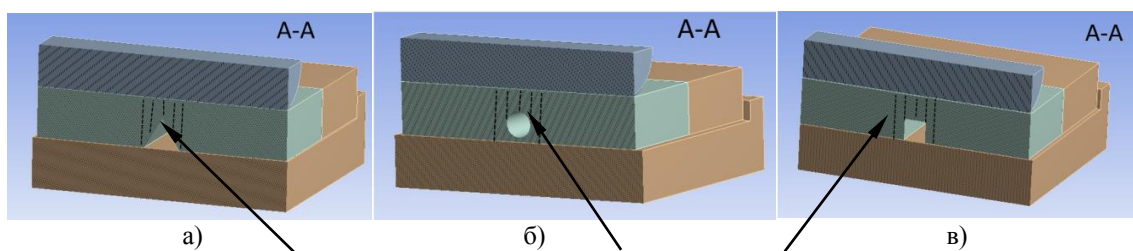
Рис. 2. Примеры моделей процесса ВДУ с образцами прямоугольной (а), треугольной (б) и цилиндрических (в) форм: 1 - инструмент, 2 – образец, 3 – стол.

Fig. 2. Examples of models of the VDU process with samples of rectangular (a), triangular (b) and cylindrical (c) shapes: 1 - tool, 2 - sample, 3 - table.

Исследование влияния геометрических форм на эффективность упрочнения проводилась на прямоугольных, треугольных и цилиндрических образцах толщиной 6 мм с единым для всех объемом 7200 мм^3 (рис. 2).

Для изучения влияния внутренних

полостей на характер упрочнения, в прямоугольных исследуемых образцах ($30 \times 30 \times 10 \text{ мм}$), вырезались единого объема (300 мм^3) треугольные, цилиндрические и прямоугольные пазы. Типы внутренних сечений образцов использованных при ВДУ, представлены на рисунке 3.



Места измерения микротвердости образца в сечении А-А (рис.2,а).

Locations for measuring the microhardness of the sample in section A-A (Fig. 2, a).

Рис. 3. Треугольные (а), цилиндрические (б) и прямоугольные (в) формы внутренних полостей упрочняемых образцов.

Fig. 3. Triangular (a), cylindrical (b) and rectangular (c) shapes of the internal cavities of the hardened specimens.

Исследование эффективности упрочнения оценивалось по результатам измерения микротвердости в выбранном сечении обрабатываемого материала (рис. 3). На основании серии измерений микротвердости определялось максимальное значение степени (H_m) и глубины (h_m) упрочнения.

Глубиной упрочнения считалось расстояние, измеренное по перпендикуляру к лицевой (упрочняемой) поверхности образца до плоскости, в которой зафиксировано 10% увеличение значения микротвердости по сравнению с ее исходной величиной. Степень упрочнения определялась для то-

чек, находящихся на поверхности образца. Методика оценки микротвердости в результате моделирования подробно описана в работах [14, 15].

Оценки адекватности результатов моделирования проводились на основании их сравнения с данными реального экспе-

римента, полученными при аналогичных режимах и условиях (размеры единичных отпечатков; значения твердости и глубины упрочнения). Полученные в результате моделирования значения соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

Результаты. Исследования влияния формы обрабатываемого материала на эффективность его упрочнения

Во всех рассматриваемых образцах из стали 45 в результате ВДУ установлено сквозное упрочнение на всю толщину образца (6 мм), а наибольшее увеличение степени упрочнения (на 3,5-5,7 %) получено при обработке образцов прямоугольной

формы (рис. 4). Величины степеней упрочнения, достигнутые при ВДУ образцов треугольных и цилиндрических форм, в рамках одной ударной системы мало отличались. Так при $L_1/L_2 = 3$ и 10, H_m составила 52 и 49 %, соответственно.

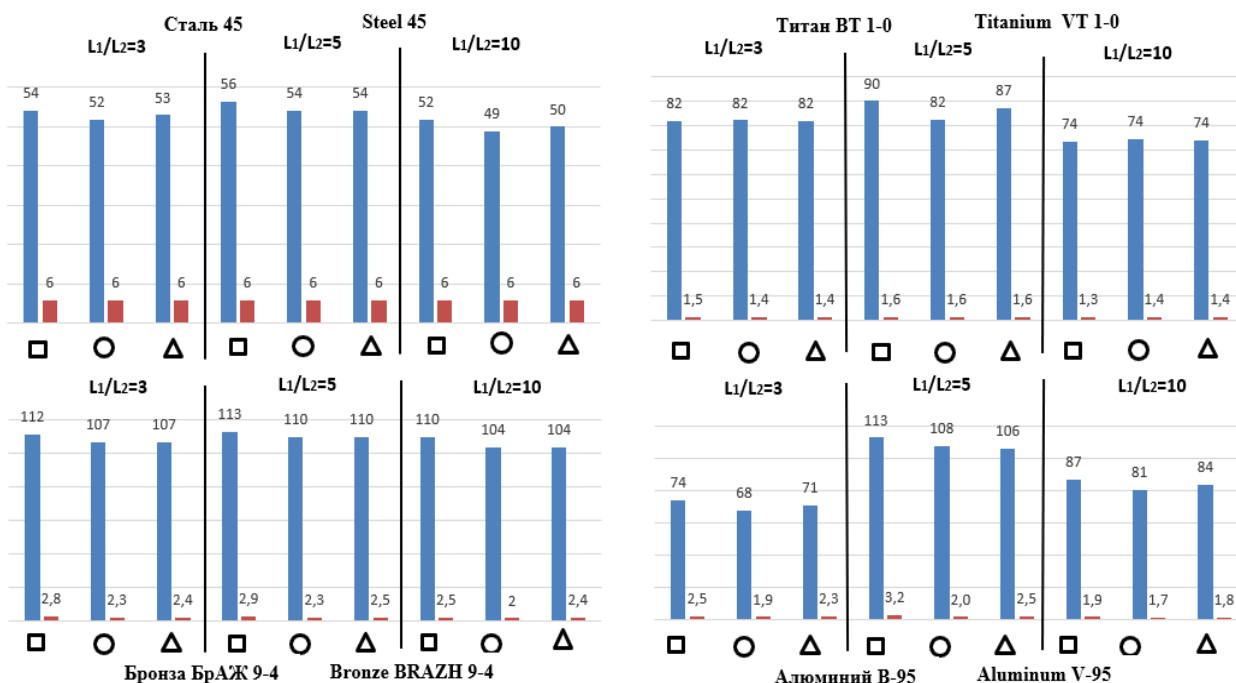


Рис. 4. Исследования влияния отношений длин бойка и волновода, внешних форм обрабатываемого материала на изменение степени (■) (%) и глубины (■) (мм) упрочнения при ВДУ (где □ ○ △ соответственно, образцы прямоугольной, цилиндрической и треугольной форм).

Fig. 4. Investigations of the influence of the ratios of the striker and waveguide lengths, the external shapes of the processed material on the change in the degree (■) (%) and depth (■) (mm) of hardening at high pressure (where, re- □ ○ △ spectively, samples of rectangular, cylindrical and triangular shapes).

При ВДУ титановых (ВТ 1-0) образцов ударными системами с отношением длин $L_1/L_2 = 3$ и 10 не выявлено влияния форм образцов из обрабатываемых материалов на результаты его упрочнения. Так, при обработке с $L_1/L_2 = 3$ у всех упрочняемых форм материалов достигнута степень упрочнения 82 %, а глубина упрочнения 1,4 мм. При $L_1/L_2 = 10$, $H_m = 74$ %, $h_m = 1,4$ мм. При использовании ударной системы с

$L_1/L_2 = 5$ глубина упрочнения у всех рассматриваемых форм образцов составила 1,6 мм. Наибольшее значение степени упрочнения 90 % достигнуто в образцах прямоугольной формы, тогда как в образцах треугольной формы H_m составила 87 %, а в цилиндрических 82 %.

При упрочнении образцов из бронзы (БрАЖ 9-4) прямоугольной формы, по сравнению с треугольной и цилиндриче-

ской, установлено на 2,7 % большее повышение степени упрочнения (значения глубины упрочнения практически не изменились). Использование ударных систем с отношением $L_1/L_2=3, 5$ и 10 привело к формированию следующих значений степени и глубины упрочнения при ВДУ образцов прямоугольной формы: $H_m = 112$ % и $h_m=2,8$ мм; $H_m=113$ % и $h_m=2,9$ мм; $H_m=110$ % и $h_m=2,5$ мм, соответственно. В случае упрочнения образцов цилиндрической формы: $H_m=107$ % и $h_m=2,3$ мм; $H_m=110$ % и $h_m=2,35$ мм; $H_m=104$ % и $h_m=2$ мм, соответственно. При обработке образцов треугольной формы: $H_m=107$ % и $h_m=2,38$ мм; $H_m=110$ % и $h_m=2,48$ мм; $H_m=104$ % и $h_m=2,35$ мм, соответственно.

При упрочнении алюминия (В-95),

образцы прямоугольной формы по сравнению с треугольными обеспечили повышение степени упрочнения на 4,9 % и глубины на 13,6 %, а с цилиндрическими – H_m на 6,4 % и h_m на 26,2 %. Применение ударных систем с отношением $L_1/L_2=3, 5$ и 10 привело к формированию следующих значений степени и глубины упрочнения при ВДУ образцов прямоугольной формы: $H_m=74$ % и $h_m=2,5$ мм; $H_m=113$ % и $h_m=3,2$ мм; $H_m=87$ % и $h_m=1,9$ мм, соответственно. В случае упрочнения образцов цилиндрической формы: $H_m=68$ % и $h_m=1,9$ мм; $H_m=108$ % и $h_m=2$ мм; $H_m=81$ % и $h_m=1,7$ мм, соответственно. При обработке образцов треугольной формы: $H_m=71$ % и $h_m=2,3$ мм; $H_m=106$ % и $h_m=2,5$ мм; $H_m=84$ % и $h_m=1,8$ мм, соответственно.

Исследование влияния внутренних полостей на характер упрочнения в разных ударных системах

При анализе результатов эксперимента установлено сквозное упрочнение исследуемых областей обрабатываемых материалов, поэтому оцениваться будет только достигнутая максимальная степень упрочнения. Так, при упрочнении из стали 45 с $L_1/L_2=3$ образцов с прямоугольной формой внутренней полости достигнута $H_m=47,5$ %, тогда как в образцах с треугольной и цилиндрической формой $H_m=46,5$ %.

При ВДУ, в образцах из стали 45 с прямоугольной формой внутренней полости, по сравнению с цилиндрическими и треугольными достигнута на 3-4% большая степень упрочнения. Так, в образцах с прямоугольной, треугольной и цилиндрической формами внутренних полостей, при их ВДУ с $L_1/L_2=3$ достигнута степень упрочнения равная 47,5; 46,5 и 46,4 %, соответственно. При $L_1/L_2=5$, H_m составила 50,8; 49,3 и 49,1 %, а при $L_1/L_2=10$, $H_m=48,5$; 46,5 и 45,3 %, соответственно.

При ВДУ, в образцах из титана (ВТ 1-0) с прямоугольной формой внутренней полости, достигнута большая степень упрочнения по сравнению с цилиндрическими на 3,8 %, а с треугольными на 3,2 %. Так, в образцах с прямоугольной, треугольной и цилиндрической формами внутренних полостей, при их ВДУ с

$L_1/L_2=3$ достигнута степень упрочнения равная 74,2; 72,1 и 69,8 %, соответственно. При $L_1/L_2=5$, H_m составила 83,4; 79,4 и 81,5 %, а при $L_1/L_2=10$, $H_m=71$; 69,7 и 68,6 %, соответственно.

При ВДУ, в образцах из бронзы (БрАЖ 9-4) с прямоугольной формой внутренней полости, достигнута большая степень упрочнения по сравнению с цилиндрическими на 0,7 %, а с треугольными на 8 %. Так, в образцах с прямоугольной, треугольной и цилиндрической формами внутренних полостей, при их ВДУ с $L_1/L_2=3$ достигнута степень упрочнения равная 79,9; 71,5 и 76,8 %, соответственно. При $L_1/L_2=5$, H_m составила 82,7; 78,3 и 85,8 %, а при $L_1/L_2=10$, $H_m=78,3$; 69,5 и 76,6 %, соответственно.

При ВДУ, в образцах из алюминия (В-95) с прямоугольной формой внутренней полости, достигнута большая степень упрочнения по сравнению с цилиндрическими на 23,8 %, а с треугольными на 18,1 %. Так, в образцах с прямоугольной, треугольной и цилиндрической формами внутренних полостей, при их ВДУ с $L_1/L_2=3$ достигнута степень упрочнения равная 53; 42,6 и 40,7 %, соответственно. При $L_1/L_2=5$, H_m составила 89,4; 71,4 и 64,5 %, а при $L_1/L_2=10$, $H_m=50,2$; 43,2 и 41,5 %, соответственно.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена взаимосвязь между эффективностью упрочнения, формой образцов из различных обрабатываемых материалов, формой внутренних полостей, волнами деформации, генерируемыми в ударных системах с $L_1/L_2=3, 5, 10$.

1. Установлено, что образцы прямоугольной формы по сравнению с треугольной и цилиндрической, обеспечивают формирование большей степени и глубины упрочнения, в рамках использования одной и той же ударной системы с теми или

иными параметрами бойка и волновода.

2. Установлено, что доминирующее влияние на эффективность упрочнения оказывают параметры ударной системы - отношение длин бойка и волновода, а не форма обрабатываемого образца или марка материала.

3. Установлено, что наличие в образцах пазов с прямоугольной формой, по сравнению с цилиндрической, обеспечивает формирование большей степени упрочнения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ФПИ и Минобрнауки России открыли в Брянске лабораторию по развитию технологий упрочнения металлов. *Фонда перспективных исследований: официальный сайт*. – 2021. – URL: <https://fpi.gov.ru/press/news/fpi-i-minobrnauki-rossii-otkryli-v-bryanske-laboratoriyu-po-razvitiyu-tekhnologiy-uprochneniya-metal/>
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 288 с. ISBN 5-217-03245-6.
3. Яшин А.В. Технологическое обеспечение качества каркасных деталей из алюминий-магниевого сплава многоконтактным волновым деформационным упрочнением: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яшин Александр Васильевич, Брянский государственный технический университет. Брянск, 2020. 159 с. Место защиты: Брянский государственный технический университет. Текст: непосредственный.
4. Федонина С.О. Повышение качества синтезированных из проволоки деталей волновым термодеформационным упрочнением: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федонина Светлана Олеговна, Брянский государственный технический университет. Брянск, 2021. 186 с. Место защиты: Брянский государственный технический университет. Текст: непосредственный.
5. Kirichek A.V., Soloviyov A.V., Silantiev S.A. Opening wave strain strengthening // *Materials science forum*. 2016. Vol.870. P. 364-370. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.364>
6. Киричек А.В., Кузьменко А.П., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Алтухов А.Ю., Силантьев С.А., Гречухин А.Н., Мью М. Т. Ударно-волновой механизм микро- и наноструктурных изменений при статико-импульсной обработке стали 45. *Известия Юго-Западного Государственного Университета*. 2015. № 6 (63). С. 8-16.
7. 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 Intragrain Structure of Steel 45 at Static-pulse Treatment. *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2015. Vol. 7(4), P.04023.
8. Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В., Зайцев А.А., Константинов А.М. Проблема учета реальных размеров изделий при волновом деформационном упрочнении. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 1 (86). С. 4-10. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-1-4-10.
9. Кузьменко А.П., Тан М.М., Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В. Опытное подтверждение интерференционного механизма ударно-волнового деформационного структурирования материалов. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2020. Т. 10. № 2. С. 98-120.
10. Eremyants V.E., Nju V.V. About selection of parameters of hydraulic vibro-impact machines for surface cleaning. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2016. №3. P. 20–24.
11. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. М.: Наука, 1969. 201 с.
12. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э., Мартыненко Л.М. Расчет ударных систем с неторцевым соударением элементов. Фрунзе: Илим, 1979. 109 с.
13. Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В., Константинов А.М., Зайцев А.А. Влияние обрабатываемой среды на эффективность передачи энергии ударного импульса при волновом деформационном упрочнении. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 11(84). С.13-18. DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-13-18.

14. 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(4) P. 04019. DOI: 2077-6772/2015/7(4)04019(4).
15. Kirichek A.V., Barinov S.V., Umnov D.O. Study of the influence of the shape of internal cavities on the

nature of wave strain hardening. *Materials Science Forum*. 2021;1037: 429–434. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.429.

16. Kirichek A.V., Barinov S.V. Relationship Between Processing Parameters Product Dimensions and Wave Strain Hardening. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2022;144(3):34501. <https://doi.org/10.1115/1.4052008>.

1. FPI and the Ministry of Education and Science of Russia opened a laboratory in Bryansk for the development of metal hardening technologies. Foundation for Advanced Research: official website. - 2021. - URL: <https://fpi.gov.ru/press/news/fpi-iminobrnauki-rossii-otkryli-v-bryanske-laboratoriyu-po-razvitiyu-tehnologiy-uprochneniya-metal/>
2. Kirichek A.V., Solovyov D.L., Lazutkin A.G. Technology and equipment for static-pulse treatment with surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 288 p. ISBN 5-217-03245-6.
3. Yashin A.V. Technological quality support of wireframe parts made of aluminum-magnesium alloys by multi-contact wave deformation hardening: specialty 05.02.08 "Technology of Mechanical Engineering": D.Ph. thesis / Yashin Alexander Vasilyevich, Bryansk State Technical University. Bryansk, 2020. 159 p. Place of defending: Bryan State Technical University.
4. Fedonina S.O. Improving the quality of parts synthesized from wire by wave thermo-deformation hardening: specialty 05.02.08 "Technology of Mechanical Engineering": D.Ph. thesis / Fedonina Svetlana Olegovna, Bryansk State Technical University. Bryansk, 2021. 186 p. Place of defending: Bryansk State Technical University.
5. Kirichek A.V., Soloviyov A.V., Silantiev S.A. Opening wave strain strengthening // Materials science forum. 2016. Vol.870. P. 364-370. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.364>
6. Kirichek A.V., Kuzmenko A.P., Soloviev D.L., Barinov S.V., Altukhov A.Yu., Silantiev S.A., Grechukhin A.N., Myo M.T. Shock-wave mechanism of micro- and nanostructural changes during static-pulse treatment of steel 45. *Proceedings of the Southwestern State University*. 2015. No. 6 (63). pp. 8-16.
7. 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 Intragrain Structure of Steel 45 at Static-pulse Treatment.

Journal of Nano and Electronic Physics. 2015. Vol. 7(4), P.04023.

8. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Zaitsev A.A., Konstantinov A.M. Real product size accounting problem at wave deformation hardening. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2020. no. 1 (86). pp. 4-10. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-1-4-10.
9. Kuzmenko A.P., Tan M.M., Kirichek A.V., Soloviev D.L., Barinov S.V. Experimental confirmation of the interference mechanism of shock-wave deformation structuring of materials. *Proceedings of the Southwestern State University. Techniques and Technologies*. 2020. vol. 10. no. 2. pp. 98-120.
10. Eremyants V.E., Nju V.V. About selection of parameters of hydraulic vibro-impact machines for surface cleaning. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2016. №3. P. 20–24.
11. Aleksandrov E.V., Sokolinsky V.B. Applied theory and calculations of shock systems. Moscow: Nauka, 1969. 201p.
12. Alimov O.D., Manzhosov V.K., Eremyants V.E., Martynenko L.M. Calculation of shock systems with non-end impact of elements. Frunze: Ilim, 1979. 109p.
13. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Konstantinov A.M., Zaicev A.A. Impact of environment processed on the effectiveness of shock pulse energy transfer at wave deformation strtengthening. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2019. no. 11(84). pp.13-18. DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-13-18.
14. 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(4) P. 04019. DOI: 2077-6772/2015/7(4)04019(4).
15. Kirichek A.V., Barinov S.V., Umnov D.O. Study of the influence of the shape of internal cavities on the nature of wave strain hardening. *Materials Science Forum*. 2021;1037: 429–434. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.429.
16. Kirichek A.V., Barinov S.V. Relationship Between Processing Parameters Product Dimensions and Wave Strain Hardening. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2022;144(3):34501. <https://doi.org/10.1115/1.4052008>.

Информация об авторах:

Киричек Андрей Викторович, профессор, доктор технических наук, тел: 8 (4832) 51-51-38; проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, ID ORCID 2-3823-0501.

Баринов Сергей Владимирович, доцент, кандидат технических наук, тел: (49234) 7-71-41; доцент кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета, ID ORCID

Kirichek Andrey Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for Long-term Development at Bryansk State Technical University, phone: 8 (4832) 51-51-38; ID ORCID 2-3823-0501.

Barinov Sergey Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering at Vladimir State University, phone: (49234) 7-71-41; ID ORCID 0000-0002-

0000-0002-1341-446X.

Никитина Любовь Геннадиевна, доцент, кандидат технических наук, тел: (49234) 7-71-41; доцент кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета

Зайцев Алексей Андреевич, магистрант кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета, тел: (49234) 7-71-41.

1341-446X.

Nikitina Lyubov Gennadievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering at Vladimir State University, phone: (49234) 7-71-41

Zaitsev Aleksey Andreevich, Master of of the Department of Mechanical Engineering at Vladimir State University, phone: (49234) 7-71-41.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.12.2021; одобрена после рецензирования 29.12.2021; принята к публикации 18.02.2022. Рецензент – Мокрицкий Б.Я., доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 22.12.2021; approved after review on 29.12.2021; accepted for publication on 18.02.2022. The reviewer is B.Ya. Mokritskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor of Komsomolsk-on-Amur State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.