

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.787.6.004

doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-40-52

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ СИСТЕМЫ, РАЗМЕРОВ И МАТЕРИАЛА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ (МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Андрей Викторович Киричек¹, Сергей Владимирович Баринов^{2✉}, Алексей Андреевич Зайцев³, Александр Михайлович Константинов⁴

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 box64@rambler.ru,

⁴ apmitp@yandex.ru

Аннотация

В статье проводятся исследования влияния размеров и материала обрабатываемой детали, а также волн деформаций, генерируемых в ударных системах с различным соотношением длин бойка и волновода ($L_1/L_2=3, 5, 10$), на эффективность волнового деформационного упрочнения (ВДУ). Особенность данной технологии заключается в периодическом воздействии на упрочняемую поверхность волнами деформаций, сгенерированных в ударной системе. Исследования выполнены с применением конечно-элементного моделирования. Для достижения поставленной цели созданы модели обрабатываемого материала (сталь 45, титан ВТ 1-0, бронза БрАЖ 9-4, алюминий В95), генерации ударного импульса, процесса волнового деформационного

упрочнения. На основании рассчитанных в результате моделирования значений степени и глубины упрочнения, оценивалась эффективность ВДУ. В результате проведенных исследований установлено, что среди геометрических параметров толщина образца из обрабатываемого материала оказывает наиболее значимое влияние на эффективность упрочнения. Использование ударных систем с отношением $L_1/L_2 = 5$, по сравнению с $L_1/L_2 = 3$ и 10 , при равной энергии удара, позволяют получить большие значения степени и глубины упрочнения.

Ключевые слова: ударный импульс, материал, волновое деформационное упрочнение, боек, волновод, степень и глубина упрочнения.

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

Original article

Open Access Article

INFLUENCE OF SHOCK SYSTEM PARAMETERS, WORKPIECE DIMENSIONS AND MATERIAL ON THE EFFICIENCY OF WAVE DEFORMATION HARDENING (MODELING)

Andrey Viktorovich Kirichek¹, Sergey Vladimirovich Barinov^{2✉}, Aleksey Andreevich Zaitsev³, Alexander Mikhailovich Konstantinov⁴

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 box64@rambler.ru

⁴ apmitp@yandex.ru

© Киричек А.В., Баринов С.В., Зайцев А.А., Константинов А.М., 2022

Abstract

The article is devoted to the study of the influence of the workpiece size and material as well as deformation waves generated in shock systems with a different ratio of the striker and waveguide lengths ($L_1/L_2 = 3, 5, 10$), on the effectiveness of wave deformation hardening (VDH). The peculiarity of this technology is the periodic impact on the surface to be strengthened by waves of deformations generated in the shock system. The research was carried out using finite element modelling. To achieve this goal, models of the machined material (Steel 45, Titanium VT 1-0, Bronze BrAZH 9-4, Aluminum V95), shock pulse generation, wave deformation hardening process were

developed. The effectiveness of the VDH was estimated according to the values of the degree and depth of hardening calculated as a result of modelling. The conducted studies showed that the material thickness of the machined sample has the most significant effect on the hardening efficiency among the geometric parameters. The use of shock systems with a ratio of $L_1/L_2=5$, compared with $L_1/L_2=3$ and 10, with the equal impact energy, allows to obtain large values of the degree and depth of hardening.

Keywords: shock pulse, material, wave deformation hardening, striker, waveguide, degree and depth of hardening.

Funding: The research was supported by RFBR grant No. 19-08-00676

Введение

Упрочняющие технологии, основанные на принципах поверхностного пластического деформирования поверхностного (ППД) слоя, по характеру воздействия на обрабатываемую поверхность можно разделить на статические и динамические.

При реализации статических методов, индентор воздействует на обрабатываемый материал неизменным во времени потоком энергии в условиях непрерывного контакта инструмента с деталью. К таким методам можно отнести: накатывание, выглаживание и другие. К достоинствам статических способов ППД можно отнести: стабильность процесса, возможность достижения предельно низких значений шероховатости обработанной поверхности (уменьшения относительно исходной до шести раз), низкий уровень собственного производственного шума. К недостаткам - деформации в технологической системе, вследствие длительного приложения значительных односторонних усилий, ограничения при обработке тонкостенных деталей, увеличенные энергетические затраты и габариты оборудования при необходимости обеспечения большой глубины упрочнения (свыше 1,5 мм) [1].

Прим реализации динамических (ударных) способов ППД, деформационное воздействие на обрабатываемую поверхность осуществляется рабочими телами или инструментом периодически в условиях прерывистого контакта. К таким методам относятся: ковка, чеканка, центробежная и дробеструйная обработка и другие. К достоинствам динамических способов

ППД можно отнести возможность обеспечения большой глубины упрочненного слоя (до 15 мм), локальность и кратковременность силового воздействия, возможность обработки тонкостенных деталей (дробеструйная обработка). К недостаткам - сложность регулирования энергии ударов, высокую шероховатость обработанной поверхности, повышенный уровень шума [1].

Обработка статическими способами ППД предоставляет ограниченные возможности управления энергией деформационного воздействия. С энергетической точки зрения динамические способы ППД обладают большим КПД, чем статические. Это связано с тем, что при обеспечении равных величин упрочнения поверхностного слоя, динамические способы, в отличие от статических, затрачивают значительно меньше усилий (мощности). Удар, лежащий в основе динамических способов ППД, позволяет увеличивать силу воздействия на обрабатываемый материал в сотни и тысячи раз [2-4].

При динамическом (ударном) нагружении обрабатываемого материала с одной и той же энергией могут достигаться разные результаты упрочнения. Это объясняется волновыми процессами, происходящими в ударной системе. При длине ударяющего тела (бойка) не меньше длины волны, удар целесообразно рассматривать в виде распространяющихся по соударяемым телам (элементам ударной системы) плоских акустических волн, которые характеризуются законом изменения дефор-

маций (сил) во времени, максимальным значением сил (амплитудой волны), временем действия сил (длительности волны) и энергией волны. Период такой волны называют ударным импульсом. Форма ударного импульса поступающего в пятно контакта инструмента с нагружаемой средой определяет энергию, передаваемую нагружаемой среде [3-5].

Так, при динамическом нагружении материала в зависимости от применяемой ударной системы, импульсы в очаге деформации, при равной силе удара имеют различную форму (рис. 1) [5, 6].

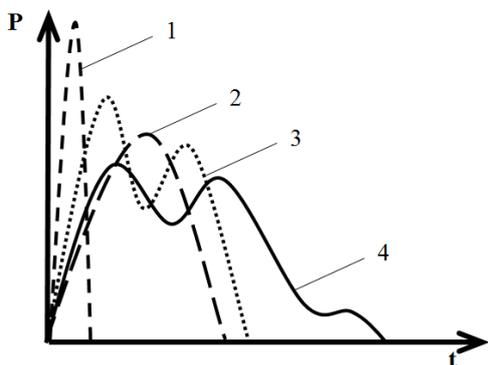


Рис. 1. Форма импульсов в очаге деформации при ударе: 1 – непосредственно шаром; 2 – торцом цилиндрического стержня; 3 – через систему боек – волновод; 4 по инструменту (шару) через систему боек – волновод [5,6]

Fig.1. The shape of impulses in the deformation zone upon impact: 1 – directly by the ball; 2 – end face of a cylindrical rod; 3 – through the striker - waveguide system; 4 along the tool (ball) through the striker - waveguide system [5,6]

При ударе шаром формируется треугольный импульс с высокой амплитудой, небольшой длительностью и малой энергией. При ударе торцом цилиндрического стержня (бойка) формируется импульс трапецеидальной формы с меньшей амплитудой, но большей длительностью и с большей энергией. При ударе бойка через промежуточное звено (волновод), генерируется пролонгированный ударный импульс, содержащий головную и хвостовую части. Пролонгированный импульс отличается наибольшей энергией. Использование хвостовой части позволяет пролонгировать воздействие ударного импульса на нагружаемую среду, интенсифицировать упругопластическую деформацию и увеличить коэффициент полезного действия процесса. Это явление достаточно широко

используется в горной промышленности, при создании различных перфораторов, для разрушения хрупких материалов [3]. В машиностроении, для повышения прочности материала за счет его упругопластической деформации в процессе ППД, применялись только импульсы с большой амплитудой и малой длительностью, генерируемые в примитивных ударных системах, без промежуточного звена [4].

Результаты, приведенные в работах [3, 4, 6], свидетельствуют о том, что повышение эффективности динамического нагружения материала возможно за счет использования волновых процессов, оказывающих при определенных условиях существенное влияние на эффективность удара. Применительно к обработке поверхностным пластическим деформированием это свидетельствует о возможности варьирования параметров качества упрочненного слоя не только за счет изменения энергии удара, но и путем создания условия для наиболее полного использования энергии ударного импульса в процессе пластической деформации обрабатываемого материала.

Указанная возможность реализована в методе волнового деформационного упрочнения (ВДУ) [1]. Данный метод сочетает в себе достоинства статических и динамических способов воздействия на обрабатываемый материал. При ВДУ ударный импульс генерируется в стержневой ударной системе вследствие удара бойка по волноводу. Волновод является промежуточным звеном между бойком и индентором (инструментом), осуществляющим деформацию обрабатываемого материала. Волновод статически поджимается к индентору для исключения его отскока. Это обеспечивает более полную передачу энергии ударного импульса в обрабатываемый материал и рекуперацию отраженных волн деформации.

Процесс нагружения материала в результате ВДУ отличается расширенным набором управляющих факторов, что дает широкие возможности управления параметрами импульсов и расширяет технологические возможности деформационной обработки. Упрочненный слой формирует-

ся в результате многократных импульсных воздействий, очаги которых имеют относительное смещение. В результате ВДУ с подобранными режимами, в обработанном материале достигается дробление зерен до наноразмерного уровня и формирование регулярных естественно армированных структур с макроскопическими структурно-фазовыми состояниями на глубине до 6...10 мм со 150 % степенью упрочнения [7,8]. Упрочненный материал имеет высокое сопротивление контактному выкрашиванию в случае его эксплуатации в условиях контактного циклического нагружения [9].

При исследовании закономерностей влияния параметров элементов ударной системы и материала среды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса при ВДУ ранее установлены следующие зависимости:

Наиболее значимое влияние на долю передаваемой энергии ударного импульса оказывают параметры бойка. Увеличение отношения длины бойка L_1 к его диаметру d_1 с $0,1 \leq L_1/d_1 \leq 10$ позволяет, в среднем, увеличить долю энергии ударного импульса (эффективность ударной системы), сообщаемую в очаг деформации, в 15,6 раза. Увеличение отношения L_1/d_1 до 20...30 не приводит к дальнейшему повышению доли энергии ударного импульса, поступающего в очаг деформации. Кроме того, использование L_1/d_1 более 10 в большинстве случаев нетехнологично и нецелесообразно.

Следующим по значимости фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность передачи энергии ударного импульса, является соотношение длин бойка и волновода. Увеличение отношения длин бойка L_1 и волновода L_2 с $0,1 \leq L_1/L_2 \leq 10$ позволяет, в среднем, в 2,8 раза увеличить долю энергии ударного импульса, сообщаемую в очаг деформации [10].

Наименьшее влияние на эффективность передачи энергии удара в очаг деформации ударной системой оказывает материал среды нагружения – 1...3 % для рациональных значений соотношений параметров элементов ударной системы (КПД более 80%). При вынужденном выборе менее эффективных ударных систем ($L_1/d_1=1$;

$L_1/L_2 = 1...10$; КПД менее 62 %) влияние материала среды нагружения более значимо и может составлять 6...10 % [11].

При проведении инженерных расчетов конечностью габаритных размеров деталей в исследуемых моделях, как правило, пренебрегают. С одной стороны, это позволяет значительно упростить алгоритм и уменьшить 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. При изготовлении детали из монолитной заготовки однородного материала, изменение акустической жесткости связано с изменением размеров конструктивных элементов – толщины стенок, размерами и расположением отверстий и бобышек и т.д., а также габаритными размерами, так как на наружных поверхностях исследуемого образца также происходят волновые преобразования. Возникающие в каждой элементарной точке детали волновые состояния определяются сложением всех проходящих через точку прямых и отраженных волн. Учитывая, что скорость распространения волны деформации соответствует скорости звука в материале, длительность единичного импульса составляет порядка $10^{-5}...10^{-4}$ с, а скорость рабочей подачи многократно меньше, волновые состояния в одной и той же элементарной точке детали в процессе обработки непрерывно меняются.

Ранее проведенные исследования позволили установить значимое влияние на процесс ВДУ геометрических размеров обрабатываемой детали, а также выявить следующие особенности [12, 13]:

– при равных объемах, но разных формах образцов, упрочняемых с аналогичными режимами обработки, формиру-

ются разные карты распределения микротвердости в поверхностном слое;

– при ВДУ происходит упрочнение не только с лицевой (по которой производилась обработка), но и с тыльной стороны, при этом в сердцевине образца может сохраняться исходная твердость материала;

– увеличение длины обрабатываемых образцов приводит к снижению степени и глубины упрочнения как лицевой, так и тыльной стороны, причем степень снижения показателей упрочнения зависит от марки обрабатываемого материала.

Таким образом, на данный момент есть общие представления о влиянии гео-

метрических размеров образцов на распределение микротвердости в них, после ВДУ. Однако данные исследования выполнены в достаточно узком диапазоне и вне связи с условиями наиболее эффективной передачи энергии ударного импульса в очаг деформации.

Целью работы является установление взаимосвязи между параметрами волн деформаций, сгенерированных в ударных системах с разным отношением длин бойка L_1 и волновода L_2 , размерами обрабатываемых образцов, обеспечиваемыми значениями глубины и степени упрочнения.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Поиск взаимосвязей между параметрами волн деформаций и размерами обрабатываемых образцов выполнялся с использованием конечно-элементного моделирования. Применение моделирования позволяет получить большой объем экспериментальных данных при минимальных затратах времени. В качестве среды для моделирования выбран программный комплекс *Ansys*, который является мировым лидером в области разработки программных продуктов для проведения современ-

ного инженерного анализа (*CAE*). Данный комплекс обладает большим набором расчетных модулей, объединенных на одной платформе. Применение единой платформы исключает ошибки, возникающие при перемещении данных расчетов между модулями. Функционал комплекса полностью подходит для проведения запланированных исследований.

Для достижения цели работы разработан алгоритм проведения исследований. Он представлен на рис. 2.

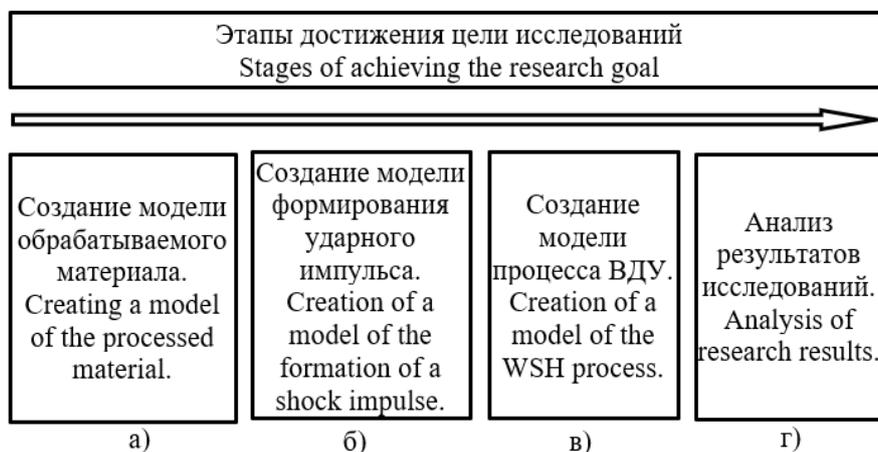


Рис. 2. Алгоритм проведения исследований
Fig. 2. Algorithm of research

На первом этапе (рис. 2а) проводилась разработка модели используемых материалов. Для проведения исследований использовались четыре разных по физико-механическим свойствам материала: сталь 45, титан ВТ 1-0, алюминий В-95, бронза БрАЖ 9-4. Выбор материалов обоснован тем, что сталь 45 достаточно часто исполь-

зуется в машиностроении и является своего рода эталоном при проведении разных исследований. Титан ВТ 1-0, бронза БрАЖ 9-4, алюминий В-95 широко используют в машиностроении для изготовления ответственных изделий в разных отраслях промышленности [14].

Создание каждой модели материала

является уникальным процессом и подразумевает не только заполнение шаблона данными из справочной литературы, но и значениями, полученными в результате проведения соответствующих экспериментальных исследований, позволяющих уточнить свойства, присущие обрабатываемому материалу. Используя данные, полученные на универсальной электромеханической машине с компьютерным управлением серии *WDW-100E*, строились кривые упрочнения. По ним определялись прочностные свойства неупрочненного и упрочненного ВДУ материала. Полученные кривые размещались в шаблоне, что позволило учитывать особенности поведения материала в очаге деформации при различных условиях волнового нагружения. Оценка адекватности созданных моделей материалов проводилась сравнением результатов моделирования с данными реального эксперимента, полученными при одинаковых режимах ВДУ. Сравнивались величины единичных отпечатков, полученных в результате ударов инструмента по обрабатываемой поверхности в целях ее упрочнения. Сравнивались величины степени и глубины упрочнения поверхностного слоя после ВДУ.

На втором этапе (рис. 2б) создавалась модель формирования ударного импульса в стержневой ударной системе с учетом особенностей ВДУ. Модель необходима для

выявления закона изменения сил во времени (ударного импульса), который затем используется при создании модели ВДУ на третьем этапе. На формирование этого закона (вида кривой) сильное влияние оказывает отношение длин бойка и волновода в ударной системе. Для оценки влияния на эффективность упрочнения параметров (формы) волны деформации (ударного импульса), формирующейся в процессе ВДУ образцов из выбранных материалов, использовались стержневые ударные системы с разным отношением длин бойка (L_1) и волновода ($L_2 = 160$ мм): $L_1/L_2=3; 5; 10$ (рис. 3). Диаметр бойка d_1 равен диаметру волновода $d_2 = 48$ мм. Удары бойков разных длин (и масс) наносятся с энергией (А) 30 Дж.

Примеры генерируемых ударных импульсов в стержневых ударных системах с разным отношением L_1/L_2 представлены на рис. 4.

Адекватность полученных ударных импульсов (их форма, длительность, амплитуда) оценивалась путем сравнения с данными, полученными при аналогичных условиях на специализированном полномасштабном ударном стенде для изучения волновых процессов при ВДУ. Полученные в результате моделирования значения, соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

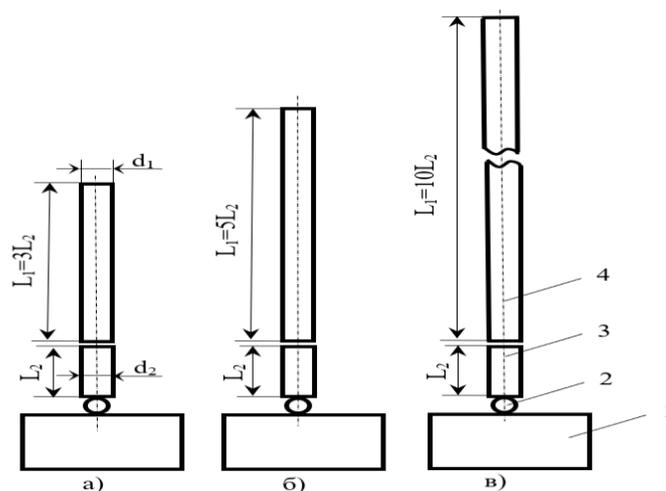


Рис. 3. Модели ударных систем, с разным отношением длин бойка (L_1) и волновода (L_2): 1 – образец (упрочняемый материал); 2 – инструмент; 3 – волновод; 4 – боек

Fig.3. Models of impact systems with different ratios of striker (L_1) and waveguide (L_2) lengths: 1 – sample (hardened material); 2 – tool; 3 – waveguide; 4 – firing pin

На третьем этапе (рис. 2 в) разрабатывалась модель процесса ВДУ.

Использование элементов ударной системы, состоящей из бойка и волновода (аналогично второму этапу исследований), для генерирования ударного импульса при моделировании процесса ВДУ не использовалось в целях упрощения расчетов. Появление в модели дополнительных объектов (бойка и волновода) и, как следствие, значительное увеличение числа дополнительных конечных элементов, привело бы к существенному увеличению времени расчета. Для достижения поставленной цели исследований необходимо выполнить моделирование порядка 330 экспериментов, поэтому задача сокращения времени моделирования без потери точности расчетов являлась актуальной задачей. Поэтому при построении модели процесса ВДУ элементы ударной системы (боек, волновод) заменялись приложением непосредственно к инструменту функции изменения силы во времени. Функция использовалась для задания серии ударов инструментом по обрабатываемому материалу при моделировании процесса ВДУ.

Модель процесса ВДУ состояла из инструмента, который с постоянной статической силой поджимается к обрабатываемому материалу. Инструмент периодически

ски воздействовал на образец из заданного материала с силой, изменяющейся в соответствии с полученной на втором этапе исследований функцией, описывающей форму импульса, полученного при определенном отношении L_1/L_2 . Образец двигался с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном направлению ударов. На обрабатываемой поверхности образца формировались отпечатки рабочей поверхности инструмента, под которыми расположена наиболее упрочненная область. Равномерность нанесения ударов оценивалась через коэффициент перекрытия K . Он рассчитывался исходя из размера (ширины) единичного отпечатка (не перекрывающегося с соседним), частоты ударов и скорости движения обрабатываемого образца. В случае, когда $K = 1$ многократные удары инструмента происходят в одно и то же место (без смещения). При $K = 0$, края отпечатков инструмента граничат друг с другом, но не перекрываются. В диапазоне K от 0 до 1 происходит перекрытие отпечатков с разной степенью. Ранее установлено, что ВДУ с $K=0,4$ наиболее перспективно, так как обеспечивает наилучшие эксплуатационные и прочностные свойства [1, 9]. Поэтому при моделировании ВДУ расчеты выполнялись для $K = 0,4$.

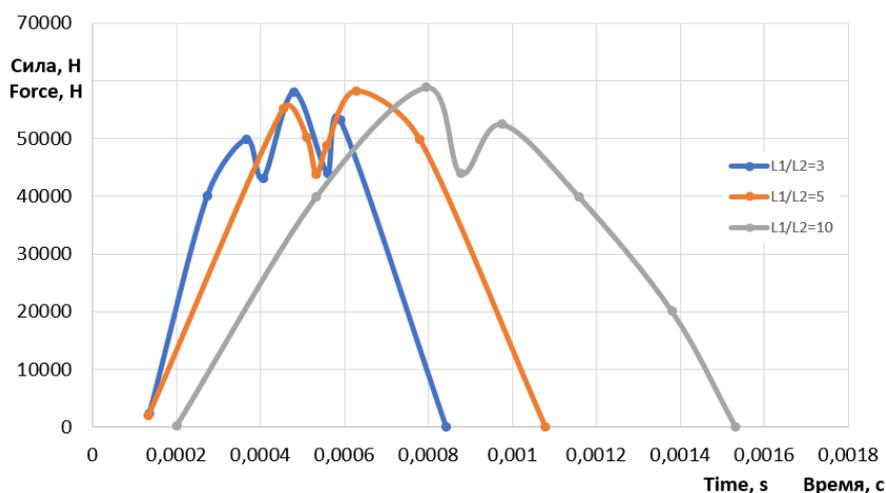


Рис. 4. Примеры ударных импульсов, генерируемых в ударных системах с разным отношением длин бойка и волновода L_1/L_2 . Импульсы получены при ударе по образцам из титана VT 1-0 с энергией 30 Дж
 Fig.4. Examples of shock impulses generated in shock systems with different ratios of striker and waveguide lengths L_1/L_2 . These pulses were obtained upon impact on VT 1-0 titanium samples with a single energy of 30 J

Для учета влияния размеров обрабатываемого материала на характер его упрочнения, использовались образцы с разными геометрическими размерами. Исследовалось влияние длины (упрочнялись образцы длиной: 30, 60 и 90 мм), ширины (30, 40, 50 мм) и толщины (6, 12, 18 мм) обрабатываемого материала на характер их упрочнения ВДУ. Все упрочняемые с разными параметрами ударного импульса (полученного при $L_1/L_2=3; 5; 10$) типоразмеры образцов представлены на рис. 5.

Адекватность параметров упрочненных областей (размеры единичных отпечатков; значения твердости и глубины упрочнения), оценивалась методом выборочного сравнения с данными, полученными при аналогичных условиях на полноразмерной установке для волнового деформационного упрочнения. Полученные в результате моделирования значения соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

На четвертом этапе (рис. 2 г) выполнялась обработка полученных данных, проводился их анализ и выявление взаимосвязей.

Так как напрямую определить достигнутое изменение микротвердости после ВДУ в *Ansys* не представляется возможным, использовалась следующая методика. После упрочнения ВДУ под отпечатками ударов инструмента, от упрочненной поверхности до противоположного края образца (по всей толщине), с шагом 0,1 мм определялись величины возникающих деформаций *Effective Strain*. Затем данные значения переводились в величины напряжений *Effective Stress* с помощью регрессионной модели кривой упрочнения обрабатываемого материала, полученной экспериментально. Найденные величины напряжений переводились в значения микротвердости по методике, изложенной в [15].

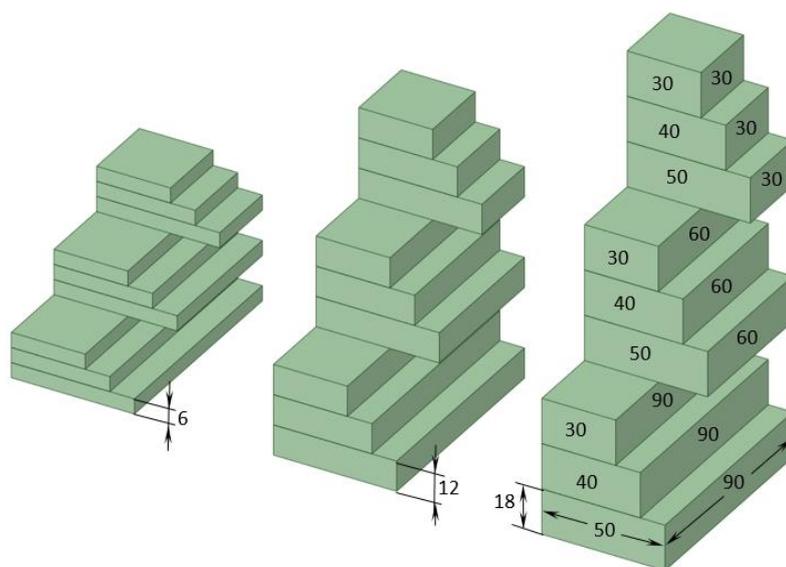


Рис. 5. Образцы для исследования влияния геометрических размеров на результаты упрочнения ВДУ

Fig. 5. Samples used to study the effect of geometric dimensions on the nature of hardening as a result of WSH

Глубина и степень упрочнения определялись следующим образом. Степень упрочнения, в % – относительная величина, характеризующая изменение микротвердости до и после упрочнения материала на лицевой поверхности образца. В качестве глубины упрочнения принято рас-

стояние, измеренное по перпендикуляру к лицевой (упрочняемой) поверхности образца до плоскости, в которой зафиксировано 10 % увеличение значения микротвердости по сравнению с ее исходной величиной.

Результаты

Исследования влияния параметров волн деформаций, генерируемых в ударных системах с разным отношением длин бойка и волновода (L_1/L_2), и размеров обрабатываемых образцов на формируемые при ВДУ величины глубины и степени упрочнения показали следующие результаты.

Увеличение толщины образца с 6 до 18 мм приводит к снижению степени H_m и глубины h_m упрочнения. В образцах из титана VT 1-0, при использовании ударных систем с отношением $L_1/L_2 = 3$ наблюдалось уменьшение H_m с 82 до 52 %, h_m с 1,4 до 0,5 мм; при $L_1/L_2=5$ – H_m с

84 до 60 %, h_m с 1,4 до 0,8 мм, а в случае $L_1/L_2=10$ – H_m с 71 до 43 %, h_m с 1,3 до 0,5 мм (рис. 6). В случае использования ударных систем с $L_1/L_2 = 3$, при ВДУ образцов из стали 45 H_m понизилась с 52 до 51 %, h_m с 3,9 до 2,3 мм; при $L_1/L_2 = 5$ – H_m с 54 до 53 %, h_m с 3,7 до 2,2 мм; при $L_1/L_2=10$ – H_m с 49 до 48%, h_m с 3,6 до 1,9 мм (рис. 7). В образцах из алюминия В95 при $L_1/L_2=3$ – H_m уменьшилась с 88 до 84 %, h_m с 2,3 до 1,8 мм; при $L_1/L_2 = 5$ – H_m не изменилась и составила 112 %, h_m упала с 2,2 до 1,9 мм; при $L_1/L_2 = 10$ – H_m с 70 до 96 %, h_m с 1,8 до 1,5 мм (рис. 8).

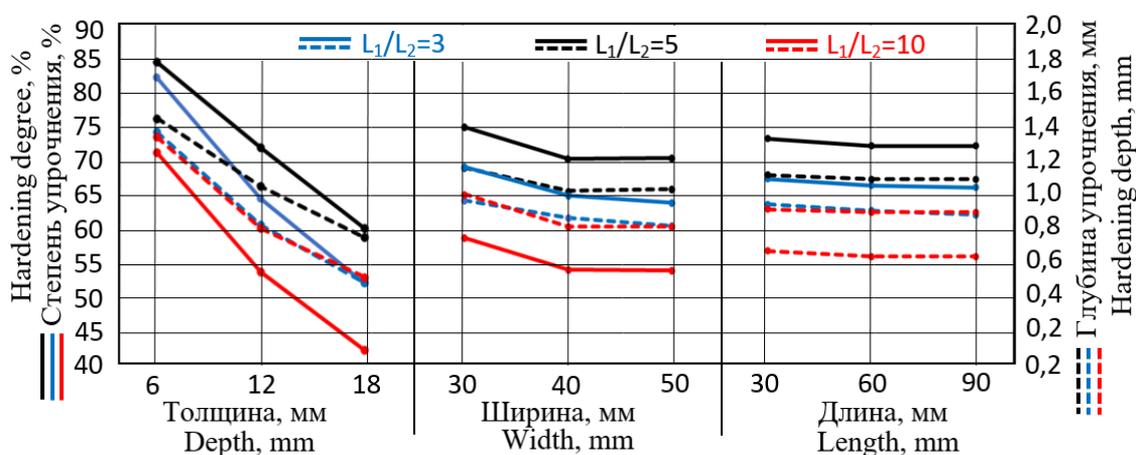


Рис. 6. ВДУ образцов из титана VT 1-0
Fig. 6. WSH of VT 1-0 titanium specimens

При ВДУ образцов из бронзы БрАЖ 9-4, снижение их толщины с 6 до 18 мм, при использовании $L_1/L_2 = 3$ привело H_m к уменьшению со 110 до 108,5 %, h_m с 2,2 до 1,8 мм; при $L_1/L_2 = 5$ – H_m не изменилась и составила 111 %, h_m упала с 2,4 до 1,9 мм; при $L_1/L_2 = 10$ – H_m с 97 до 91%, h_m с 2,1 до 1,4 мм (рис. 9).

Увеличение ширины образцов с 30 до 50 мм для всех рассматриваемых материалов сопровождается уменьшением параметров упрочнения. В образцах из титана VT 1-0, при использовании ударных систем с $L_1/L_2 = 3$ H_m снизилась с 69 до 64 %, h_m с 0,98 до 0,83 мм; при $L_1/L_2=5$ – H_m с 75 до 71 %, h_m с 1,17 до 1,03 мм; при $L_1/L_2 = 10$ – H_m с 59 до 54 %, h_m с 1,01 до 0,83 мм (рис. 6). При упрочнении образцов из ста-

ли 45, применение ударных систем с $L_1/L_2=3$ снизило H_m с 53 до 51 %, h_m с 3,6 до 2,4 мм; при $L_1/L_2=5$ – H_m с 54 до 52 %, h_m с 3,7 до 2,5 мм; при $L_1/L_2=10$ – H_m с 50 до 48 %, h_m с 3,3 до 2 мм (рис. 7). В образцах из алюминия В95, при $L_1/L_2 = 3$ – H_m уменьшилась с 72 до 68 %, h_m с 2,2 до 1,8 мм; при $L_1/L_2 = 5$ – H_m с 113 до 111%, h_m с 2,1 до 1,9 мм; при $L_1/L_2 = 10$ – H_m не изменилась и составила 86 %, h_m понизилась с 1,7 до 1,58 мм (рис. 8). При ВДУ образцов из бронзы БрАЖ 9-4 увеличение их ширины с 30 до 50 мм, при использовании $L_1/L_2 = 3$ привело к уменьшению H_m с 110 до 109 %, h_m с 2 до 1,8 мм; при $L_1/L_2 = 5$ – H_m с 113 до 111 %, h_m с 2,3 до 2 мм; при $L_1/L_2 = 10$ – H_m не изменилась и составила 93 %, h_m понизилась с 1,7 до 1,58 мм (рис. 9).

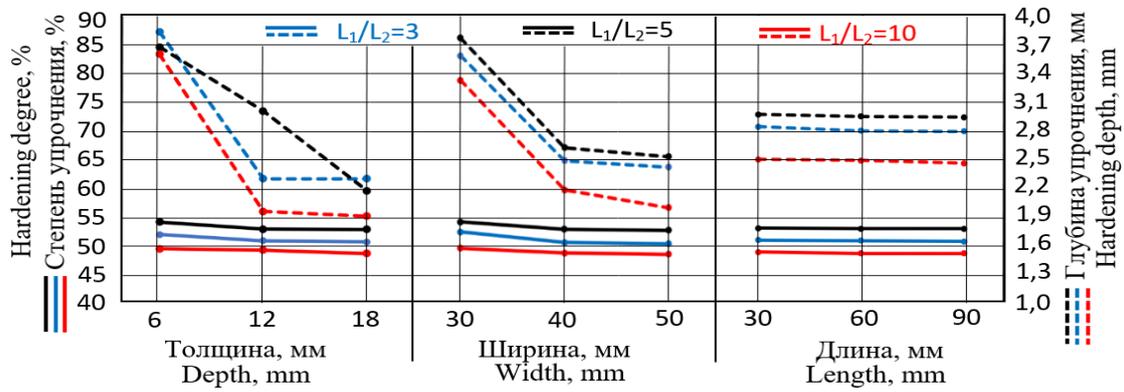


Рис.7. ВДУ образцов из стали 45
Fig. 7. WSH of specimens made of steel 45

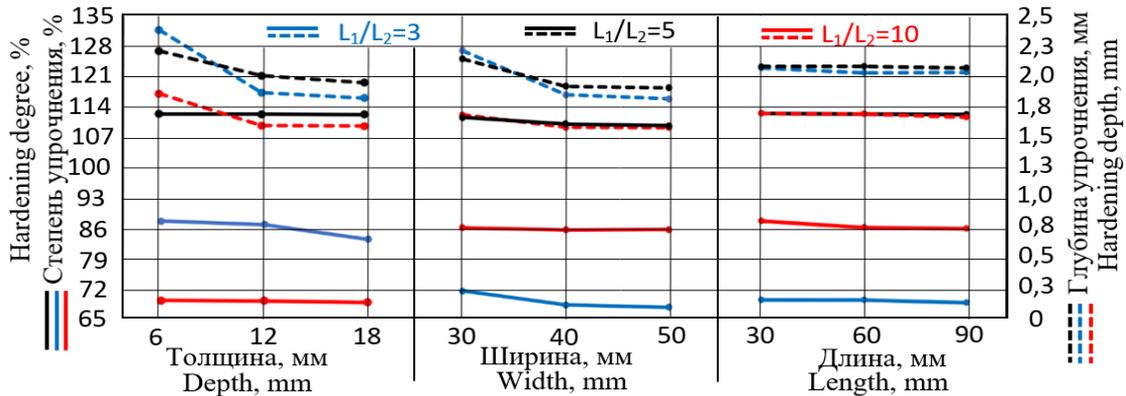


Рис.8. ВДУ образцов из алюминия B95
Fig. 8. WSH of samples from B95 aluminum

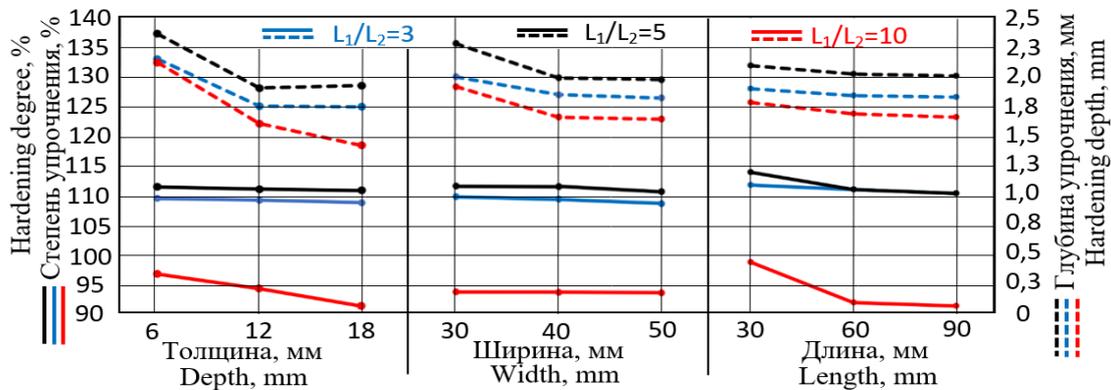


Рис. 9. ВДУ образцов из бронзы БрАЖ 9-4
Fig. 9. WSH of bronze samples BRZh 9-4

Рост длины образцов с 30 до 90 мм незначительно снижает глубину и степень упрочнения. В образцах из титана ВТ 1-0, при $L_1/L_2 = 3$ наблюдается уменьшение H_m с 67 до 66 %, h_m с 0,93 до 0,87 мм; при $L_1/L_2=5$ – H_m с 73 до 72 %, h_m с 1,1 до 1,08 мм; при $L_1/L_2=10$ – H_m с 56 до 55 %, h_m с 0,9 до 0,8 мм. В случае упрочнения образцов из стали 45, при $L_1/L_2 = 3$, установлено снижение H_m с 51,5 до 51 %, h_m с 2,85 до 2,81 мм; при $L_1/L_2=5$ – H_m с 53,4 до 53,3 %, h_m с 2,98 до 2,95 мм; при $L_1/L_2=10$ – H_m с 49,4 до 49,1 %, h_m с 2,52 до 2,48 мм. В об-

разцах из алюминия B95, при $L_1/L_2=3$ H_m уменьшилась с 69,6 до 68,9 %, h_m с 1,99 до 1,59 мм; при $L_1/L_2 = 5$ значения степени и глубины упрочнения не изменились и составили $H_m = 112$ % и $h_m = 2$ мм; при $L_1/L_2 = 10$ – H_m с 87,6 до 85,8 %, h_m с 1,63 до 1,59 мм (рис. 8). При ВДУ образцов из бронзы БрАЖ 9-4, увеличение их длины с 30 до 90 мм при $L_1/L_2 = 3$ способствует снижению H_m с 112 до 110,4 %, h_m с 1,94 до 1,86 мм; при $L_1/L_2=5$ – H_m с 114 до 110 %, h_m с 2,14 до 2,05 мм; при $L_1/L_2 = 10$ – H_m с 98,4 до 90,8 %, h_m с 1,82 до 1,69 мм (рис. 9).

Заключение

В результате проведенных исследований установлена взаимосвязь между размерами обрабатываемых материалов, волнами деформации, генерируемыми в ударных системах с $L_1/L_2 = 3; 5; 10$, и эффективностью упрочнения.

1. Среди рассматриваемых геометрических параметров обрабатываемых образцов, толщина обрабатываемого материала оказывает наиболее значимое влияние на глубину и степень упрочнения. Вторым по значимости влияния на эффективность упрочнения геометрическим параметром является ширина образца. Наибольшая глубина и степень упрочнения наблюдается в случае совпадения ширины образца с шириной инструмента. В случае, когда ширина образца превышала ширину инструмента, степень и глубина упрочнения уменьшались и при дальнейшем росте ширины обрабатываемого материала оставались неизменными. Увеличение длины образцов сопровождается незначительным уменьшением параметров упрочнения.

2. Для исследованных значений диаметра инструмента ($\varnothing 10$ мм) и энергии ударов ($A = 30$ Дж) справедлива закономерность, связанная с уменьшением глубины упрочнения при увеличении толщины образца. Следует отметить, что результаты, полученные ранее [16] при другом

диаметре инструмента ($\varnothing 30$ мм) и другой энергии ударов ($A = 70$ Дж), свидетельствуют об увеличении глубины упрочнения с ростом толщины образцов. Выявление общего характера рассматриваемой закономерности во взаимосвязи с размерами инструмента и энергией ударов является предметом дальнейших исследований.

3. Изменение геометрических параметров (особенно толщины) оказало наибольшее влияние на степень (28-40 %) и глубину (47-63 %) упрочнения при ВДУ образцов из титана ВТ 1-0. При упрочнении образцов из стали 45, алюминиевого сплава В-95 и бронзы БрАЖ 9-4 изменение геометрических размеров обрабатываемых образцов существенно повлияло на изменение глубины упрочнения (18-46 %), и значительно меньше на изменение степени упрочнения (1,7-5,4 %).

4. Ударные системы с $L_1/L_2 = 5$, по сравнению с $L_1/L_2 = 3$ и $L_1/L_2 = 10$, при одной и той же энергии удара, обеспечивают большую степень (H_m) и глубину упрочнения (h_m).

5. Для стали 45 и бронзы БрАЖ 9-4 по сравнению с титаном ВТ 1-0 и алюминиевым сплавом В-95 отмечен значительно меньший разброс значений параметров упрочнения при варьировании параметром L_1/L_2 в диапазоне 3...10.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. 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.
3. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. М.: Наука, 1969. 201 с.
4. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э., Мартыненко Л.М. Расчет ударных систем с неторцевым соударением элементов. Фрунзе: Илим, 1979. 109 с.
5. Соловьев Д.Л. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: специальности 05.03.01 «Технологии и оборудование механи-

- ческой и физико-технической обработки», 05.02.08 «Технология машиностроения»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Соловьев Дмитрий Львович, Орловский государственный технический университет. Орел, 2005. 384 с. Место защиты: Орловский государственный технический университет. Текст: непосредственный.
6. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Влияние пролонгации импульса на степень деформации материала при статико-импульсном упрочнении // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 4. С. 6-10.
7. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Под ред. В.Е. Панина. - Новосибирск: Изд. СО РАН, 2006. 520 с. ISBN 5-7692-0868-6.
8. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Перспективы кратного повышения эксплуатационных свойств естественным армированием металлических ма-

териалов при технологическом обеспечении многоуровневой гетерогенной структуры // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4 (112). С. 3-10.

9. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., и др. Исследование контактного выкрашивания поверхностей деталей машин. Коллективная монография / под общ. ред. А.В. Киричека и К.В. Подмастерьева. М.: Спектр, 2012. С. 294-332. ISBN 978-5-4442-0025-4.
10. 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.
11. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Konstantinov A.M. Study of the influence of cross section sizes of the rod shock system on the efficiency of shock pulse energy transfer to the deformation center // *Journal of Physics: Conf. Series.* 2020. Vol.1479 P.012067. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012067>.
12. 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.* 2017. Vol.177 P. 012121 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012121>.

REFERENCES

1. Kirichek A.V., Solovyov D.L., Lazutkin A.G. Technology and equipment of static-pulse treatment by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 288 p. ISBN 5-217-03245-6.
2. 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.
3. Alexandrov E.V., Sokolinsky V.B. Applied theory and calculations of shock systems. Moscow: Nauka, 1969. 201 p.
4. Alimov O.D., Manzhosov V.K., Eremyants V.E., Martynenko L.M. Calculation of shock systems with non-axial collision of elements. Frunze: Ilim, 1979. 109p.
5. Solovyov D.L. Technology and equipment of static-pulse treatment by surface plastic deformation: specialty 05.03.01 "Technologies and equipment of mechanical and physical-technical machining", 05.02.08 "Technology of machine-building": Dr. habil. thesis / Solovyov Dmitriy Lvovich, Orel State Technical University. Orel, 2005. 384 p. Place of defending: Orel State Technical University.
6. Kirichek A.V., Solovyov D.L. The effect of pulse prolongation on the degree of deformation of the material during static-pulse hardening // *Strengthening Technologies and Coatings.* 2005. No. 4. pp. 6-10.
7. Surface layers and internal interfaces in heterogeneous materials /Ed. by V.E. Panin. - Novosibirsk: Publishing House SO RAS, 2006. 520 p. ISBN 5-7692-0868-6.
8. Kirichek A.V., Solovyov D.L. Prospects for a mul-

9. Kirichek A.V., Solovyov D.L., Barinov S.V., et al. Investigation of contact painting of machine part surfaces. Collective monograph / Ed. by A.V. Kirichek and K.V. Podmaster'ev. M.: Spectrum, 2012. pp. 294-332. ISBN 978-5-4442-0025-4.
10. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Konstantinov A.M., Zaicev A.A. Impact of environment processed upon effectiveness of shock pulse energy transfer at wave deformation strengthening. // *Bulletin of Bryansk State Technical University.* 2019. No 11(84). pp.13-18. doi: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-13-18.
11. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Konstantinov A.M. Study of the influence of cross section sizes of the rod shock system on the efficiency of shock pulse energy transfer to the deformation center // *Journal of Physics: Conf. Series.* 2020. Vol.1479 P.012067. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012067>.
12. 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.* 2017.Vol.177 P. 012121 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012121>.
13. Kirichek A.V., Barinov S.V. Relationship Between Processing Parameters Product Dimensions and Wave Strain Hardening // *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* 2022. Vol.144(3) P. 034501. <https://doi.org/10.1115/1.4052008>.
14. Киричек А.В., Баринов С.В., Силантьев С.А. и др. Модели материалов при исследовании волнового деформационного упрочнения методом конечных элементов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 1. С.28 - 33. doi: 10.30987/1999-8775-2021-1-28-33.
15. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.
16. 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, Vol.1037, P.429–434 doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.429.

iple increase in operational properties by natural reinforcement of metallic materials with technological support of a multilevel heterogeneous structure // *Strengthening Technologies and Coatings.* 2014. No. 4 (112). pp. 3-10.

9. Kirichek A.V., Solovyov D.L., Barinov S.V., et al. Investigation of contact painting of machine part surfaces. Collective monograph / Ed. by A.V. Kirichek and K.V. Podmaster'ev. M.: Spectrum, 2012. pp. 294-332. ISBN 978-5-4442-0025-4.
10. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Konstantinov A.M., Zaicev A.A. Impact of environment processed upon effectiveness of shock pulse energy transfer at wave deformation strengthening. // *Bulletin of Bryansk State Technical University.* 2019. No 11(84). pp.13-18. doi: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-13-18.
11. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Konstantinov A.M. Study of the influence of cross section sizes of the rod shock system on the efficiency of shock pulse energy transfer to the deformation center // *Journal of Physics: Conf. Series.* 2020. Vol.1479 P.012067. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012067>.
12. 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.* 2017.Vol.177 P. 012121 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012121>.
13. Kirichek A.V., Barinov S.V. Relationship Between Processing Parameters Product Dimensions and Wave Strain Hardening // *Journal of Manufacturing*

Science and Engineering. 2022. Vol.144(3) P. 034501. <https://doi.org/10.1115/1.4052008>.

14. Kirichek A.V., Barinov S.V., Silantiev S.A., et al. Material models at research of wave deformation strengthening through finite element method // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2021. No. 1. pp.28 - 33. doi: 10.30987/1999-8775-2021-1-28-33.

15. Markovets M.P. Determination of mechanical properties of metals by hardness. M.: Mashinostroenie, 1979. 191 p.

16. 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, Vol.1037, P.429–434 doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.429.

Ссылка для цитирования:

Киричек, А.В. Влияние параметров ударной системы, размеров и материала обрабатываемой детали на эффективность волнового деформационного упрочнения (моделирование) / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.А. Зайцев, А.М. Константинов // *Транспортное машиностроение*. – 2022. - № 1-2. – С. 40 - 52. doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-40-52.

Информация об авторах:

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

Баринов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета, тел. (49234) 7-71-41; ID ORCID 0000-

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

0002-1341-446X.

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

Константинов Александр Михайлович, магистрант кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета, тел. (49234) 7-71-41.

0000-0002-1341-446X.

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

Konstantinov Alexander Mikhailovich, 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 26.10.2021; одобрена после рецензирования 22.12.2021; принята к публикации 15.01.2022. 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 26.10.2021; approved after review on 22.12.2021; accepted for publication on 15.01.2022. 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*.