

УДК 621.787.6.004

DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-13-18

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

ВЛИЯНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ВОЛНОВОМ ДЕФОРМАЦИОННОМ УПРОЧНЕНИИ

Оценивается степень значимости влияния параметров элементов ударной системы и материала среды нагружения на эффективность передачи энергии удара в очаг деформации при волновом деформационном упрочнении. Исследования впервые проведены с использованием разработанной комплексной конечноэлементной модели процесса волнового деформационного упрочнения. В результате моделирования различных ударных систем и нагружаемых материалов (сталь 40Х, АМГ6, ВТ1-

0), оценки эффективности передачи энергии удара в очаг деформации установлено преимущественное влияние параметров бойка, существенное влияние соотношения длин бойка и волновода и наименее значимое влияние материала среды нагружения (1...10 %).

Ключевые слова: энергия удара, импульс, ударная система, моделирование, среда нагружения, волновод, боек, волновое деформационное упрочнение.

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

IMPACT OF ENVIRONMENT PROCESSED UPON EFFECTIVENESS OF SHOCK PULSE ENERGY TRANSFER AT WAVE DEFORMATION STRENGTHENING

The investigations carried out are dedicated to the analysis of the material impact of the loading environment upon the effectiveness of a shock pulse at wave deformation strengthening. To carry out investigations in the specialized program there is developed a finite-element model of an impact system consisting of a head and a waveguide pressed statically to the environment of loading. The impact system effectiveness was estimated on the ratio of shock pulse energy imparted to a deformation source taking into account the material of the loading environment to the energy of a head blow to a waveguide. It is defined that the most significant impact upon a share of transient energy of the shock pulse is rendered by the head parameters the change of which in the range considered allows increasing the effectiveness of the impact system by 15.6 times. The next important factor affecting considerably

the effectiveness of shock pulse energy transfer is a ratio of the lengths of a head and a waveguide the change of which in the value range investigated allows increasing a share of energy transferred by 2.8 times. The least impact upon the effectiveness of impact energy transfer in the center of deformation with the impact system is performed by the material of loading environment – 1...3% for the rational values of the parameter ratios of the impact system elements (n more than 80%). At the forced choice of less efficient impact systems ($L_1/d_1=1$; $L_1/L_2=1...10$; n less than 62%) the impact of the material of loading environment may make 6...10%.

Key words: impact energy, pulse, impact system, modeling, environment of loading, waveguide, head, wave deformation strengthening.

Введение

В целях повышения сопротивления контактному выкрашиванию, дробления зерен до наноразмерного уровня, получения регулярных естественно армированных структур на глубине до 6...10 мм целесообразно применять метод поверхностного пластического деформирования (ППД) - волновое деформационное упрочнение (ВДУ) [1-3].

Отличием ВДУ от других динамических методов ППД является наличие ряда управляемых специфических конструк-

тивно-технологических параметров, позволяющих обеспечивать более тонкое управление процессом при воздействии на упрочняемую поверхность ударными импульсами. Это позволяет обеспечивать в широком диапазоне значений требуемую глубину, степень и равномерность упрочнения [1-4]. Однако проблема повышения эффективности ударных систем для ВДУ не теряет своей актуальности, так как параметры элементов ударной системы ока-

зывают определяющее влияние на результаты упрочнения.

Ранее исследовалась возможность повышения эффективности передачи энергии ударного импульса при ВДУ за счет изменения геометрических размеров элементов ударной системы. Эффективность процесса передачи энергии ударного импульса оценивается по величине n (%), равной отношению энергии импульса в очаге деформации к энергии удара бойка по волноводу. В результате исследований установлено, что в стержневой ударной системе с плоскими торцами с отношением длины бойка L_1 к его диаметру d_1 в диапазоне $5 \dots 10$ и соотношением длин бойка L_1 и волновода L_2 в диапазоне $1 \dots 10$ возможно сообщение не менее 80 % энергии ударного импульса в среду нагружения. Экспериментальная проверка теоретических расчетов проводилась при равенстве диаметров бойка d_1 и волновода d_2 в диапазоне $15 < d_1 = d_2 < 90$ мм и только для стали 40Х.

В фундаментальных работах Е.В. Александрова, О.Д. Алимова, В.Э. Еремьянца установлено, что на эффективность

ударного воздействия большое влияние оказывает соотношение длин и площадей контактных сечений бойка и волновода. Так как элементы ударной системы (боек и волновод) - цилиндрические стержни, указанная закономерность вырождается в соотношение длин и соотношение диаметров бойка и волновода. Кроме геометрических размеров элементов ударной системы влияние оказывает еще и нагружаемая среда [5-8].

Целью данной работы является исследование степени влияния среды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса в очаг деформации при волновом деформационном упрочнении.

Для проведения исследований в специализированной программе разработана конечно-элементная модель ударной системы, состоящая из бойка и статически поджатого к среде нагружения волновода. Эффективность ударной системы оценивалась по отношению энергии ударного импульса, сообщаемого в очаг деформации с учетом материала среды нагружения, к энергии удара бойка по волноводу.

Материалы, методы и результаты исследований

В настоящее время для исследования высокоскоростных процессов ($\sim 10^{-5}$ с) деформационного воздействия достаточно часто применяется их моделирование в специализированных программах, основанных на методе конечных элементов. Это связано с высокой точностью получаемых результатов и большим набором инструментов для анализа. К таким программам относится и *LS-DYNA*, на базе которой проводились исследования.

Моделирование процесса ВДУ происходило в несколько этапов. На первом этапе создавались модели материалов сред нагружения. Для исследований взяты три материала, отличные по физико-механическим свойствам: сталь 40Х, сплав АМг6 и титан ВТ1-0. Из имеющихся в программе *LS-DYNA* моделей пластических деформаций выбрана модель *Johnson-Cook*. Выбор данной модели обоснован точным описанием процесса протекания пластических деформаций с точки зрения

физики процесса ВДУ. При этом модель *Johnson-Cook* является эмпирической и позволяет учитывать эффекты изотропного и кинематического упрочнения, изменение температуры и связанное с этим изменение прочности [9; 10]. Для заполнения шаблона модели *Johnson-Cook* для каждого выбранного материала вводились значения: плотности, удельной теплоемкости, предела текучести, константы упрочнения, экспоненты упрочнения, константы скорости деформации, степени термического разупрочнения, температуры плавления, скорости деформации, модуля сдвига, коэффициента Грюнайзена, параметра C_1 , параметра S_1 , квадратичного параметра S_2 . Одна часть данных для заполнения шаблона модели материала бралась из справочной литературы, другая часть получена в результате проведения соответствующих испытаний выбранных материалов на лабораторном оборудовании [4].

На втором этапе создавалась модель ударной системы. Она состоит из бойка и волновода, имеющих форму стержней с плоскими торцами. Волновод одним плоским торцом статически поджимался к среде нагружения, а по другому его плоскому торцу боек наносил единичный удар со скоростью V . Во всех экспериментах скорость удара бойка зависела от его массы (исходя из условия постоянства энергии удара), равной 35 Дж. Это позволяет сравнивать результаты моделирования с данными ранее проведенных (при такой же энергии удара) натурных и вычислительных экспериментов. Эксперименты по выявлению влияния сред нагружения (АМгб и ВТ1-0) на эффективность передачи энергии ударного импульса проводились в условиях, аналогичных ранее проведенным экспериментам для стали 40Х. Моделировались ударные системы: с отношением длины бойка L_1 к его диаметру d_1 в диапазоне $1 \dots 10$; с отношением длины бойка L_1 к длине волновода L_2 в диапазоне $1 \dots 10$; с диапазоном величин диаметров бойка и волновода $d_1=d_2=30, 48, 60$ мм. Выбранный диапазон параметров элементов ударной системы характерен для генераторов импульсов, имеющих рациональное сочетание необходимой мощности и допустимых габаритных размеров. Для достижения поставленной цели выполнялись расчеты для 120 экспериментальных точек.

На третьем этапе оценивалась энергия полученного в результате моделирования ударного импульса (согласно методике, изложенной в [1; 4]). Смоделированные импульсы соответствовали экспериментальным, имели фронты спада и нарастания; в зависимости от условий эксперимента формировалась хвостовая часть ударного импульса - как результат действия отраженных волн. Адекватность полученных ударных импульсов (их форма, длительность, амплитуда) оценивалась их сравнением с экспериментальными данными, полученными при аналогичных

условиях на специализированном полно-размерном стенде, предназначенном для изучения волновых процессов при ВДУ. Полученные в результате моделирования значения соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

Анализ эффективности передачи энергии ударного импульса в зависимости от параметров ударной системы и материала сред нагружения представлен на рисунке.

Так, в ударных системах с диаметрами бойка и волновода, равными 30 мм, влияние материала среды нагружения прослеживается только в ударных системах с низкой энергоэффективностью (n не более 37 %) с параметрами $L_1/d_1=1, L_1/L_2=1 \dots 10$. При использовании таких ударных систем и работе со сплавами АМгб и ВТ1-0 удалось передать в среднем больше на 10,2 и 6,7 % соответственно по сравнению со сталью 40Х. Во всех других рассматриваемых ударных системах влияние среды нагружения на результаты ВДУ находилось в пределах 1-2 %.

В ударных системах с диаметром бойка и волновода 48 мм влияние среды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса достаточно близко по характеру к ударной системе с $d_1=d_2=30$ мм (рис. б). Значимое влияние среды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса отмечено в низкоэффективных ударных системах (n не более 37 %) с параметрами $L_1/d_1=1, L_1/L_2=1 \dots 10$. Так, при материалах среды нагружения АМгб и ВТ1-0 удалось повысить долю передаваемой энергии на 9 и 7 % соответственно по сравнению со сталью 40Х. Во всех других ударных системах влияние марки материала на эффективность передачи энергии ударного импульса установлено в пределах $1 \dots 3$ % (без явных преимуществ того или иного материала).

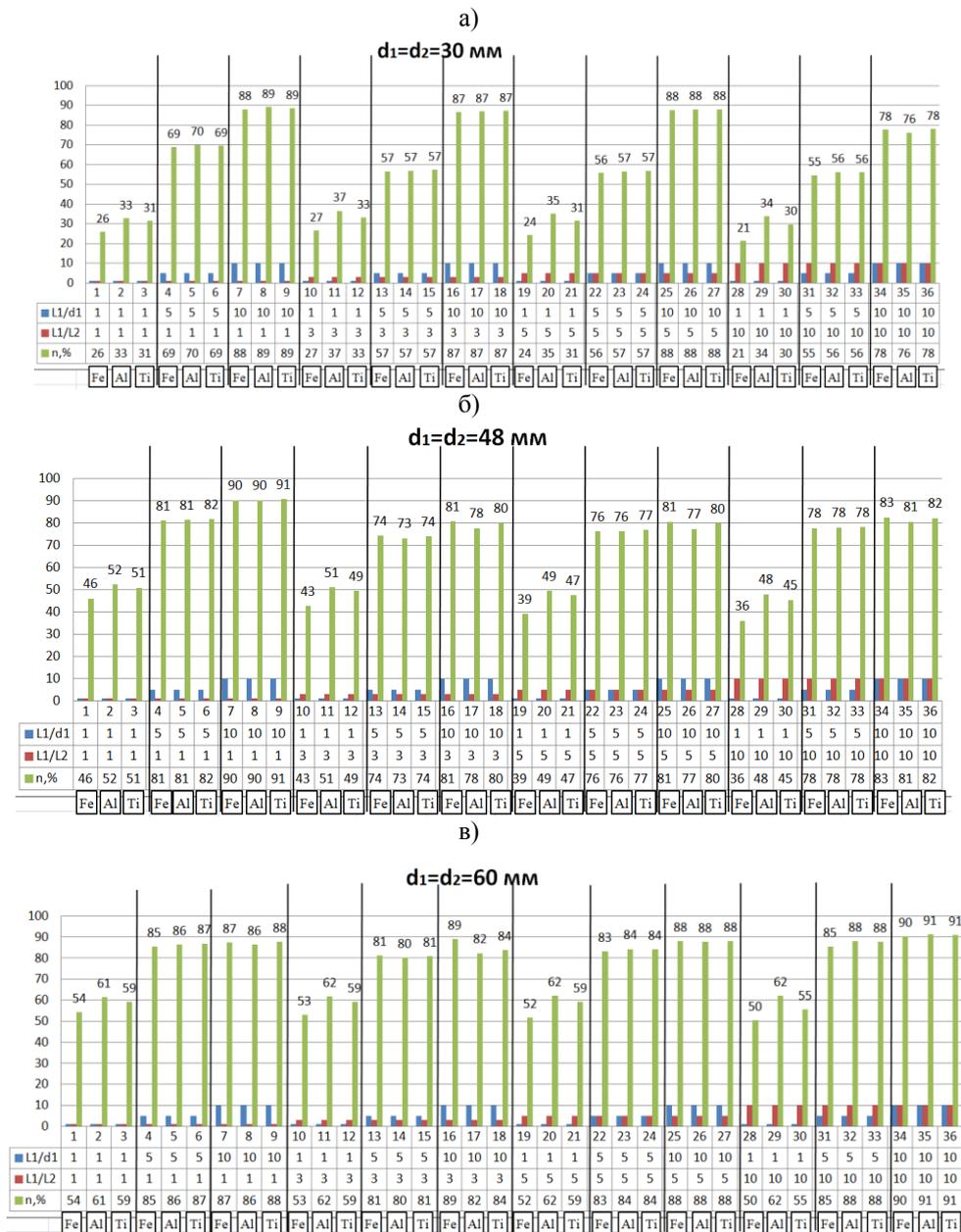


Рис. Диаграмма зависимости доли передаваемой в очаг деформации энергии ударного импульса (n) от отношения параметров ударной системы (L_1/d_1 и L_1/L_2) и материала нагружаемой среды: а - ударные системы диаметром 30 мм; б - ударные системы диаметром 48 мм; в - ударные системы диаметром 60 мм (обозначения материалов сред нагружения: Fe - сталь 40X; Al - АМГ6; Ti - ВТ1-0)

При диаметре бойка и волновода, равном 60 мм (рис. в), влияние материала на эффективность ударной системы, как и ранее, установлено для наименее эффективных ударных систем (n не более 62 %) с параметрами $L_1/d_1=1$, $L_1/L_2=1...10$. В этом случае изменение среды нагружения на

АМГ6 и ВТ1-0 сопровождается увеличением доли передаваемой энергии на 9,5 и 5,7 % соответственно по сравнению со сталью 40X. В других ударных системах влияние среды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса составляет 1..3 %.

Заключение

В результате разработки конечноэлементной модели ударной системы с промежуточным звеном (волноводом) и вы-

полненного исследования выявлены новые закономерности влияния параметров элементов ударной системы и материала сре-

ды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса при волновом деформационном упрочнении. Установлено, что:

1. Наиболее значимое влияние на долю передаваемой энергии ударного импульса оказывают параметры бояка, изменение которых в рассмотренном диапазоне позволяет в 15,6 раза повысить эффективность ударной системы.

2. Следующим по значимости фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность передачи энергии ударного импульса, является соотношение длин бояка и волновода, изменение которого в исследованном диапазоне значений позволяет в 2,8 раза повысить долю передаваемой энергии.

3. 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 (n более 80 %). При вынужденном выборе менее эффективных ударных систем ($L_1/d_1=1$; $L_1/L_2=1...10$; n менее 62 %) влияние материала среды нагружения более значимо и может составлять 6...10 %.

Выбор параметров элементов ударной системы генератора импульсов для волнового деформационного упрочнения различных материалов с учетом выполненного теоретического исследования позволит более тонко управлять процессом и получить максимальный эффект от ВДУ, а также оптимизировать габаритные размеры генератора импульсов в зависимости от требуемой мощности.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-38-20066.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004. - 288 с.
2. Киричек, А.В. Влияние параметров гетерогенной структуры на сопротивление контактному выкрашиванию / А.В. Киричек, С.В. Баринов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 4 (48). - С. 54-58.
3. Киричек, А.В. Микроструктурные изменения в стали 45, вызванные волновым деформационным упрочнением / А.В. Киричек, С.В. Баринов, С.В. Давыдов, А.В. Яшин, А.А. Зайцев, А.М. Константинов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 8 (61). - С. 79-85.
4. Механика нагружения поверхности волной деформации / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов, Д.Л. Соловьев. - М.: Машиностроение-1, 2005. - 149 с.
5. Александров, Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. - М.: Наука, 1969. - 201 с.
6. Алимов, О.Д. Расчет ударных систем с неторцевым соударением элементов / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремянц, Л.М. Мартыненко. - Фрунзе: Илим, 1979. - 109 с.
7. Eremjants, V.E. Two-layer plate stress condition under longitudinal impact by tools resting on the plate / V.E. Eremjants, V.V. Niu // Modern problems of theory of machines. - North Charleston: GreateSpace, 2016. - № 4 (1). - P.123-127.
8. Eremyants, V.E. About selection of parameters of hydraulic vibro-impact machines for surface cleaning / V.E. Eremyants, V.V. Nju // Journal of Advanced Research in Technical Science. - 2016. - Is. 2. - P. 20-24.
9. Соболев, А.В. Использование модели пластичности Джонсона - Кука в численном моделировании бросковых испытаний контейнеров для транспортирования ОЯТ / А.В. Соболев, М.В. Радченко // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2016. - № 3. - С. 82-93.
10. Kuz'kin, V.A. Numerical modeling usage to identify parameters of Johnson-Cook model for high-speed aluminum deformation / V.A. Kuz'kin, D.S. Mihalyuk // Vychislitej'naya mehanika sploshnyhsred. - 2010. - V. 3. - № 1. - P. 32-43.
1. Kirichek, A.V. *Technology and Equipment of Static-Pulse Processing with Surface Plastic Deformation* / A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov, A.G. Lazutkin. - M.: Mechanical Engineering, 2004. - pp. 288.
2. Kirichek, A.V. Impact of heterogeneous structure parameters upon resistance to contact spalling /
3. Kirichek, A.V. Micro-structural changes in steel 45 caused by wave deformation strengthening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, S.V. Davydov, A.V. Yashin, A.A. Zaitsev, A.M. Konstantonov // *Bulletin of*

- Bryansk State Technical University*. – 2017. – No.8 (61). – pp. 79-85.
4. *Mechanics of Wave Deformation Surface Loading* / A.G. Lazutkin, A.V. Kirichек, Yu.S. Stepanov, D.L. Solovyov. – M.: Mechanical Engineering-1, 2005. – pp. 149.
 5. Alexandrov, E.V. *Applied Theory and Computations of Impact Systems* / E.V. Alexandrov, V.B. Sokolinsky. – M.: Science, 1969. – pp. 201.
 6. Alimov, O.D. *Computation of Impact Systems with Non-end Collision of Elements* / O.D. Alimov, V.K. Manjosov, V.E. Yermiyants, L.M. Martynenko. – Frunze: Ilim, 1979. – pp. 109.
 7. Eremiyants, V.E. Two-layer plate stress condition under longitudinal impact by tools resting on the plate / V.E. Eremiyants, V.V. Niu // *Modern problems of theory of machines*. - North Charleston: CreateSpace, 2016. - № 4 (1). - P.123-127.
 8. Eremiyants, V.E. About selection of parameters of hydraulic vibro-impact machines for surface cleaning / V.E. Eremiyants, V.V. Niu // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. - 2016. - Is. 2. - P. 20-24.
 9. Sobolev, A.V. Use of Johnson-Cook plasticity model in numerical modeling throw tests of containers for transportation of NFW / A.V. Sobolev, M.V. Radchenko // *College Proceedings. Nuclear Power Engineering*. – 2016. – No.3. – pp. 82-93.
 10. Kuz'kin, V.A. Numerical modeling usage to identify parameters of Johnson-Cook model for high-speed aluminum deformation / V.A. Kuz'kin, D.S. Mihalyuk // *Vychislitej'naya mehanika sploshnyhsred*. – 2010. - V. 3. - № 1. - P. 32-43.

Ссылка для цитирования:

Киричек, А.В. Влияние обрабатываемой среды на эффективность передачи энергии ударного импульса при волновом деформационном упрочнении / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин, А.А. Зайцев, А.М. Константинов // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2019. – № 11. – С. 13 – 18. – DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-13-18.

Статья поступила в редакцию 01.11.19.

Рецензент: д.т.н., профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ»

Мокрицкий Б.Я.

Статья принята к публикации 11. 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.

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.

Зайцев Алексей Андреевич, магистрант кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: armitp@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.

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

Barinov Serrgey 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.

Yashin Alexander Vasilievich, Senior lecturer of the Dep. “Engineering Technique”, Murom Institute

(Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: yashin2102@yandex.ru.

Zaitsev Alexey Andreevich, Master degree student of the Dep. “Engineering Technique”, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: armitp@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.