

УДК 621.787.6.004
DOI: 10.12737/24896

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО НАГРУЖЕНИЯ СИСТЕМАМИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ЗВЕНОМ

Экспериментально установлено, что при прохождении ударного импульса через многоконтактную ударную систему на потерю передачи энергии в очаг деформации оказывают влияние такие факторы, как: число волноводов, форма, расстояние расположения волноводов относительно оси симметрии бойка. Так, увеличение числа волноводов в ударной системе, с одной стороны, приводит к снижению доли передачи энергии ударного импульса, приходящейся на единичный волновод, а

с другой - позволяет увеличить суммарную величину передаваемой в очаг деформации энергии по сравнению с одноконтактной схемой. Увеличение расстояния расположения волноводов относительно оси симметрии бойка, независимо от их числа и формы, приводит к снижению доли энергии, передаваемой в очаг деформации.

Ключевые слова: волна деформации, волновод, ударный импульс, энергия, ударная система.

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

ENERGETIC REGULARITIES OF PULSE LOADING BY SYSTEMS WITH INTERMEDIATE LINK

The investigations carried out deal with the regularity study in the distribution of shock pulse energy at multiple procedures of loading. The experimental researches were carried out on the specially developed test bench in which under all waveguides (or tools) of the shock system there were situated independently (separately) sensors connected with an oscilloscope registering parameters of a shock pulse (a form, amplitude, duration).

As a result it was determined that the increase of the eccentricity in the symmetry axis location of a head and a waveguide (or a tool) and their number in the

shock system contributes to the reduction of an energy portion sent to the deformation source. The application of multi-contact schemes of loading allows sending large total energy of a shock pulse to the deformation source to accept conditions of experiment fulfillment.

At that the energy portion of a shock pulse falling to each waveguide (or a tool) in the multicontact scheme as compared with the single-contact one decreases (for rod-formed waveguides by 20%, and for spherical tools – by 15%) at the installation of each subsequent waveguide (or a tool) in the shock system.

Key words: deformation wave, waveguide, impact pulse, energy, impact system.

Введение

Одной из основных характеристик эффективности нагружения является доля энергии удара, затрачиваемая на деформацию материала в очаге деформации. Предполагается, что ее повышение возможно за счет использования энергии волн деформации в ударной системе. Известно, что при нагружении среды ударами с одинаковой энергией могут быть получены различные результаты. Это связано с волновыми процессами, происходящими в ударной системе, которыми можно управлять изменением состава геометрических параметров и материалов элементов ударной системы.

В технологии машиностроения широко используется подвод энергии ударного импульса в зону деформации через промежуточное звено (волновод). Это позво-

ляет повысить эффективность нагружения за счет рационального использования энергии волновых процессов и увеличить КПД. При таком способе подвода энергии параметры ударной системы «боек - волновод» оказывают непосредственное влияние на форму ударного импульса. Форма импульса, в свою очередь, влияет на процесс внедрения индентора в нагружаемую поверхность, определяет долю энергии удара, затрачиваемую на упругопластическую деформацию [1; 2].

Одним из наиболее эффективных способов, позволяющих воздействовать на нагружаемую поверхность пролонгированными ударными импульсами, когда удар осуществляется через промежуточное звено, является статико-импульсная обработка (СИО). Сущность способа заключа-

ется в периодическом импульсном воздействии на нагружаемую среду бойком через статически нагруженный волновод. Предварительное статическое нагружение не позволяет индентору выходить из контакта с обрабатываемой поверхностью после удара, обеспечивая тем самым рекуперацию отраженных волн деформации. При СИО использование нагружения управляемыми ударными импульсами дает более широкие возможности по формированию упрочненного поверхностно слоя с большой глубиной (до 6...8 мм), высокой степенью (до 6500 МПа) и требуемой равномерностью упрочнения (с возможностью получения гетерогенной структуры, повышающей долговечность) [1; 3].

В технике существует ряд задач, которые необходимо решать с привлечением теоретико-экспериментальных исследований волнового деформационного упрочнения. Если для одноконтактной схемы эти

Материалы и методы

Исследования проводились на специально разработанном экспериментальном стенде (рис. 1), позволяющем моделировать процесс статико-импульсной обра-

задачи ранее решены [1; 2], то обладающая рядом достоинств схема одновременного воздействия на полупространство несколькими индеторами и волноводами при СИО на данный момент не исследована. Имеющиеся в литературе данные не позволяют в полной мере установить общие закономерности распределения энергии волны деформации между элементами многоконтактной ударной системы.

Целью данных исследований является установление энергетической закономерности распределения импульсного нагружения в многоконтактных системах. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить серию экспериментов, позволяющих установить закономерности распределения энергии ударных импульсов в зависимости от числа волноводов в ударной системе, их типа (шары, стержни) и расстояния расположения волноводов относительно оси симметрии бойка.

ботки при одновременном воздействии до четырёх волноводов на упрочняемую поверхность.

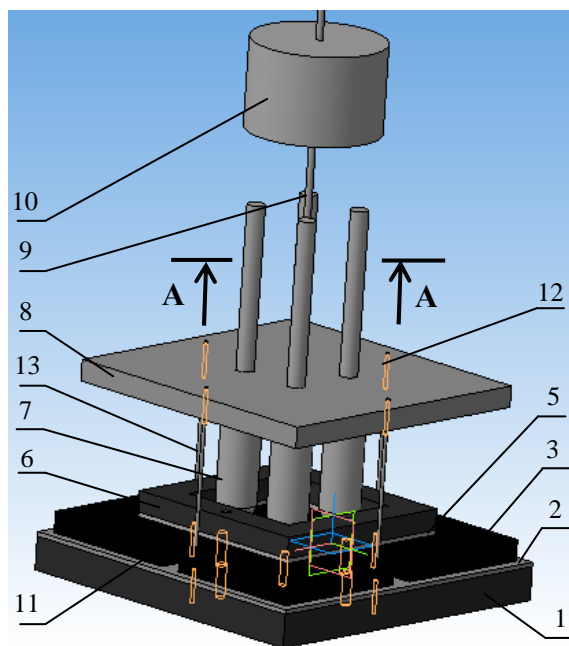


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

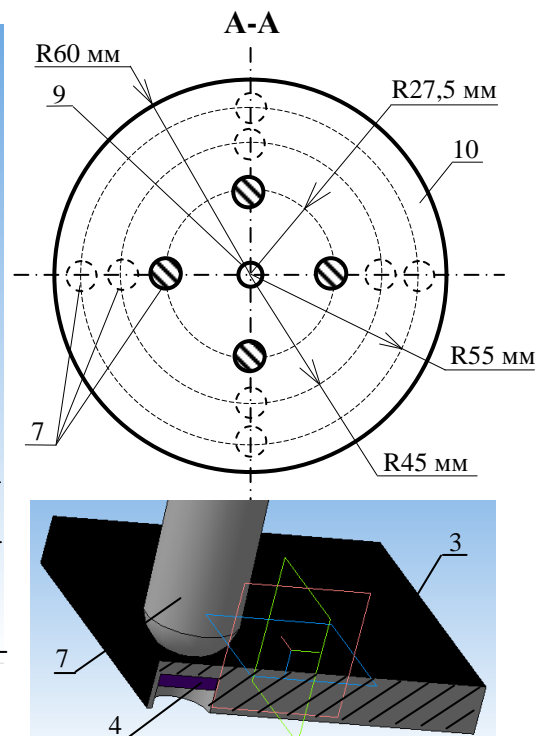


Рис. 2. Образец с пьезоэлектрическим датчиком (в разрезе)

Измерительный комплекс состоит из основания 1, на котором размещена резиновая прокладка 2 и нагружаемые образцы 3 [4]. В выборках, выполненных в нагружаемых образцах 3 (рис. 2), находятся вклеенные пьезоэлектрические датчики 4, которые позволяют проводить измерения характеристик ударного импульса, преобразуя механическое воздействие в электрический заряд. Схема расположения пьезоэлектрического датчика 4 в нагружаемом образце 3 представлена на рис. 2. Для жёсткой фиксации нагружаемых образцов 3 предусмотрена пластина 6, которая через резиновую прокладку 5 с помощью болтов 11 поджимается к основанию 1. Датчики 4, изолированные резиновыми прокладками 2 и 5 от внешнего воздействия на регистрируемые волновые процессы, подсоединены к осциллографу АСК-3107L, позволяющему фиксировать параметры ударного импульса (форму, амплитуду, длительность).

На нагружаемых образцах 3 размещены волноводы 7, которым через пластину 8 придается с помощью винтов 12 и пружин 13 предварительное статическое поджатие к основанию 1. Статическое поджатие необходимо для более полной передачи в очаг деформации энергии ударного импульса [1]. Нагружение пластины 3 ударными импульсами через волноводы 7 выполняется бойком 10, который под действием гравитации свободно перемещается по направляющему стержню 9, жестко закрепленному в основании 1.

На представленном стенде могут проводиться исследования систем нагружения как с промежуточным звеном, так и без него. Для реализации систем нагружения с промежуточным звеном использовались стержневые волноводы с плоским и сферическим торцом. Длина волноводов составляла 80 мм, диаметр - 18 мм, радиус сферы - 9 мм, материал - сталь 40X. В системах без промежуточного звена удар бойком наносился непосредственно по статически поджатым инструментам в форме шара. В эксперименте использовались шары диаметром 16 и 26,9 мм.

Исходя из поставленных задач сначала удар бойком наносился по одному волноводу. Возникший в результате ударный импульс представлен на рис. 3а. Затем в систему добавлялся второй волновод и по ним наносился удар бойком. Величины ударных импульсов считывались с датчиков, расположенных под каждым волноводом. Далее в систему поочередно добавляли третий и четвертый волноводы (рис. 3б). Примеры некоторых полученных в результате экспериментальных исследований осциллограмм ударных импульсов приведены на рис. 3. Сначала исследовалось распределение ударных импульсов в ударной системе волноводов с плоским торцом, затем - волноводов со сферическим торцом.

Исследование систем без промежуточного звена проводилось аналогично системам с промежуточным звеном, только вместо волноводов удар наносился непосредственно по статически поджатым инструментам в форме шара.

В каждом эксперименте удар бойком по волноводам и шарам наносился с одной и той же энергией - 0,1 Дж.

Исходя из конструктивных особенностей разработанного стенда может быть реализовано только внецентрированное торцевое соударение бойка с одним или несколькими волноводами (или инструментами), поэтому большой интерес представляли бы исследования, в которых можно установить, как распределяется энергия ударного импульса (в очаге деформации) в зависимости от расстояния между осью симметрии волновода и осью симметрии бойка (эксцентриситета). Для этого в пределах плоскости бойка радиусом 60 мм волноводы (или инструменты) поочередно располагались с эксцентриситетом 27,5, 45 и 55 мм (рис. 1).

По полученным осциллограммам можно оценить форму ударных импульсов в контакте, а также способность к передаче энергии ударного импульса различных типов ударных систем. Методика определения энергии ударных импульсов представлена в [2].

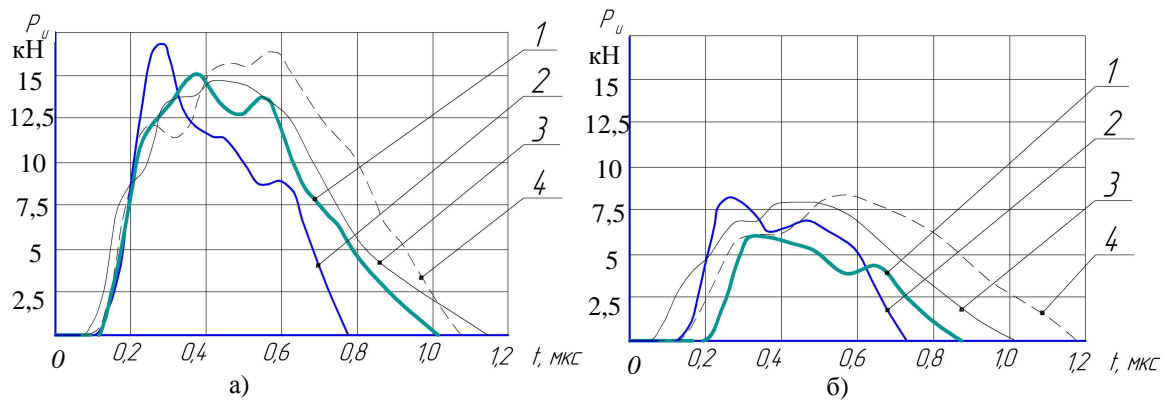


Рис. 3. Примеры осциллограмм контактных импульсов, полученных в результате экспериментальных исследований (1- при ударе по волноводу с плоским торцом, 2 – при ударе по волноводу со сферическим торцом, 3 – при ударе по шару диаметром 16 мм, 4 – при ударе по шару диаметром 26,9 мм): а - для одноволноводных систем; б - для четырехволноводных систем

Распределение энергии ударного импульса в очаге деформации при многоконтактном нагружении

Исследование экспериментальных осциллограмм, полученных при ударе с одной и той же энергией через стержневые волноводы с плоским и сферическим торцом, показало, что полученный импульс имеет параболическую форму с характерным фронтом нарастания и спада нагрузки. Наличие на кривых второго и последующего максимумов вызвано влиянием отраженных волн. В случае одноволноводной схемы нагружения сферический тип волновода позволяет передавать в очаг деформации на 17% больше энергии ударного импульса, чем волновод с плоским торцом. В случае многоволноводных схем нагружения волноводы со сферическим торцом передают на 20...36% (в зависимости от числа волноводов) больше энергии по сравнению с волноводами с плоским торцом.

При использовании в качестве инструмента шара степень искажения формы импульса увеличивалась по сравнению с волноводами стержневой формы. При нагружении ударной системы через один шар энергия ударного импульса передавалась больше в среднем на 19% через шар диаметром 19 мм по сравнению с шаром 26,9 мм. При ударе по нескольким шарам энергия ударного импульса передавалась больше через шары диаметром 26,9 мм по сравнению с шарами 16 мм (в зависимости от числа инструментов) на 9...11%.

На основании анализа экспериментальных осциллограмм построены графики, изображенные на рис. 4. Данные графики показывают, как распределяется энергия ударного импульса в зависимости от числа волноводов (или инструментов) в ударной системе, их типа (стержневые волноводы, шары) и эксцентриситета расположения осей симметрии бойка и волновода.

Исследование влияния числа волноводов (или инструментов) и их геометрической формы на степень искажения ударного импульса позволило установить некоторые закономерности распределения энергии ударной волны (таблица). Так, при стержневом типе волновода с плоским торцом при добавлении в ударную систему второго волновода передача энергии ударного импульса через каждый волновод в очаг деформации уменьшается на 20% по сравнению с одноволноводной схемой (рис. 4). В случае системы, передающей ударный импульс через три волновода, энергия, передающаяся через каждый волновод, уменьшается на 48% по сравнению с одноволноводной схемой. При прохождении ударного импульса через четыре волновода его энергия, приходящаяся на каждый волновод, уменьшается на 60% по сравнению с одноволноводной схемой нагружения.

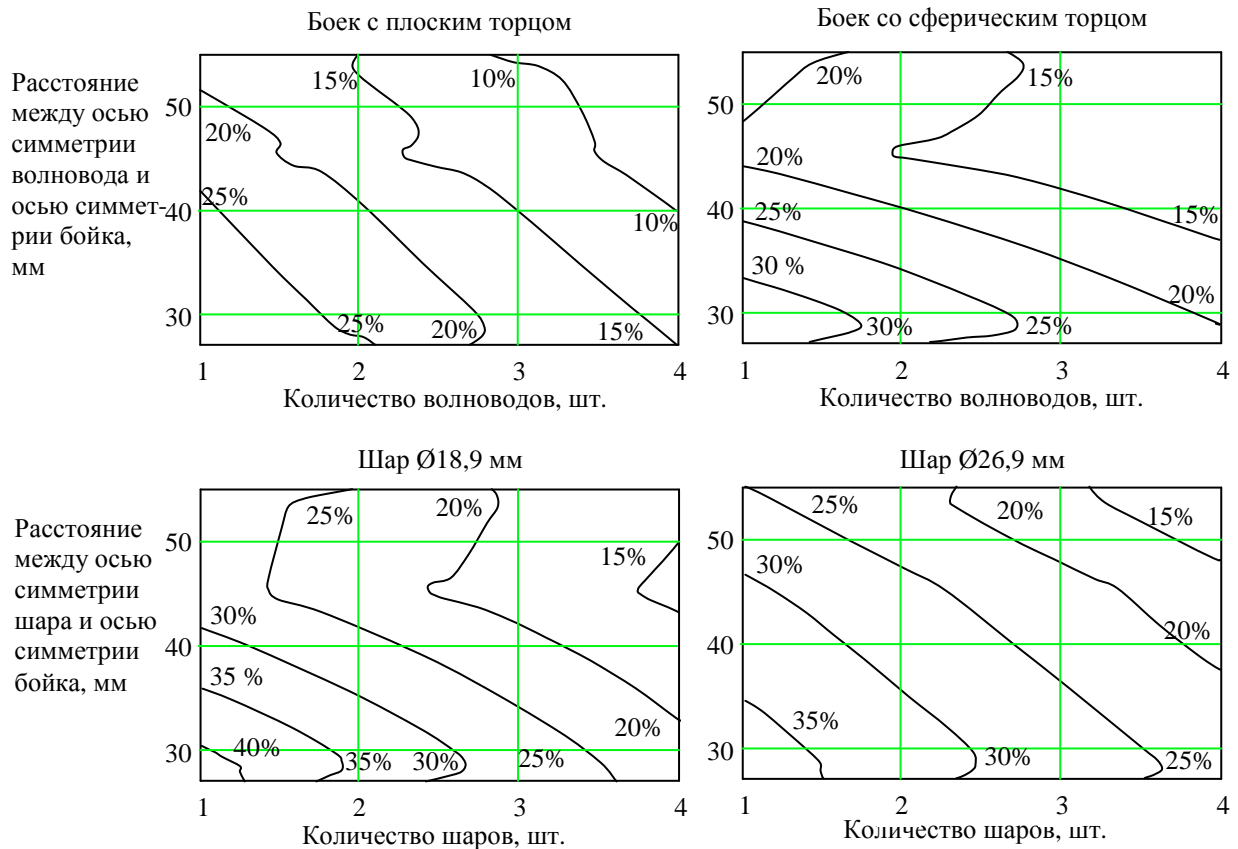


Рис. 4. Зависимость распределения энергии ударного импульса от количества волноводов (или инструментов) в ударной системе, их формы и эксцентриситета расположения осей симметрии бойка и волновода

Таблица

Распределение энергии ударного импульса в зависимости от количества волноводов (или инструментов) в ударной системе, их формы и эксцентриситета расположения осей симметрии бойка и волновода

Эксцентриситет, мм	Тип	Количество, шт.			
		1	2	3	4
27,5	Волновод с плоским торцом	30	26	17	15
	Волновод со сферическим торцом	36	25	23	21
	Шары Ø16 мм	43	32	27	23
	Шары Ø26,9 мм	38	32	26	24
45	Волновод с плоским торцом	24	14	12	8
	Волновод со сферическим торцом	19	14	10	10
	Шары Ø16 мм	27	21	17	14
	Шары Ø26,9 мм	31	26	22	17
55	Волновод с плоским торцом	18	15	9	7
	Волновод со сферическим торцом	22	19	13	11
	Шары Ø16 мм	27	25	19	16
	Шары Ø26,9 мм	25	22	16	10

При стержневом типе волновода со сферическим торцом при добавлении в ударную систему второго волновода передача энергии ударного импульса в очаг деформации через каждый волновод уменьшается на 21% по сравнению с одноволноводной схемой (рис. 4). В случае

системы, передающей ударный импульс через три волновода, энергия, передающаяся через каждый волновод, уменьшается на 42% по сравнению с одноволноводной схемой. При прохождении ударного импульса через четыре волновода его энергия, приходящаяся на каждый волно-

вод, уменьшается на 46% по сравнению с одноволноводной схемой нагружения.

Максимальное количество энергии передается в очаг деформации при ударе бойка по волноводу в случае, когда боек и волновод имеют равные диаметры [1; 2]. С увеличением количества волноводов диаметром 18 мм при диаметре бойка 120 мм общая энергия в ударной системе увеличивается, однако она все равно меньше энергии импульса, которая передается ударной системой, состоящей из одного бойка и волновода равных диаметров.

При добавлении в ударную систему без промежуточного звена второго шара диаметром 16 мм передача энергии ударного импульса через каждый шар в очаг деформации уменьшается на 19% по сравнению с одношаровой схемой. В случае системы, передающей ударный импульс через три шара, энергия, проходящая через каждый инструмент, уменьшается на 35% по сравнению с одношаровой схемой. При прохождении ударного импульса через четыре шара его энергия, приходящаяся на каждый инструмент, уменьшается на 45% по сравнению с одношаровой схемой нагружения.

При добавлении в ударную систему второго шара диаметром 26,9 мм передача энергии ударного импульса через каждый инструмент в очаг деформации уменьшается на 15% по сравнению с одношаровой схемой. В случае системы, передающей ударный импульс через три шара, энергия, проходящая через каждый инструмент, уменьшается на 32% по сравнению с одношаровой схемой. При прохождении ударного импульса через четыре шара его энергия, приходящаяся на каждый инструмент, уменьшается на 47% по сравнению с одношаровой схемой нагружения.

Исследование влияния расположения единичного волновода относительно оси симметрии бойка на степень искажения ударного импульса позволило установить несколько закономерностей распределения энергии ударной волны. Увеличение расстояния с 27,5 до 45 мм между осью симметрии бойка и осью симметрии стержневых волноводов с плоским торцом (рис. 1) привело к уменьшению энергии ударного импульса: для одноволноводных схем на-

гружения - на 20%; двухволноводных - на 47%; трехволноводных - на 30%; четырехволноводных - на 47%. Увеличение расстояния с 27,5 до 55 мм привело к уменьшению энергии ударного импульса: для одноволноводных схем нагружения - на 40%; двухволноводных - на 43%; трехволноводных - на 48%; четырехволноводных - на 44%.

Увеличение расстояния между осью симметрии бойка и осью симметрии стержневых волноводов со сферическим торцом (рис. 1) с 27,5 до 45 мм привело к уменьшению энергии ударного импульса: для одноволноводных схем нагружения - на 48%; двухволноводных - на 44%; трехволноводных - на 57%; четырехволноводных - на 53%. Увеличение расстояния с 27,5 до 55 мм привело к уменьшению энергии ударного импульса: для одноволноводных схем нагружения - на 49%; двухволноводных - на 24%; трехволноводных - на 44%; четырехволноводных - на 48%.

При использовании инструментов в форме шара диаметром 16 мм увеличение расстояния с 27,5 до 45 мм между осью симметрии бойка и осью симметрии инструментов привело к уменьшению энергии ударного импульса: для одношаровых схем нагружения - на 38%; двухшаровых - на 35%; трехшаровых - на 38%; четырехшаровых - на 40%. Увеличение расстояния с 27,5 до 55 мм привело к уменьшению энергии ударного импульса: для одношаровых схем нагружения - на 38%; двухшаровых - на 22%; трехшаровых - на 30%; четырехшаровых - на 31%.

При использовании инструментов в форме шара диаметром 26,9 мм увеличение расстояния с 27,5 до 45 мм между осью симметрии бойка и осью симметрии инструментов привело к уменьшению энергии ударного импульса: для одношаровых схем нагружения - на 19%; двухшаровых - на 19%; трехшаровых - на 16%; четырехшаровых - на 30%. Увеличение расстояния с 27,5 до 55 мм привело к уменьшению энергии ударного импульса: для одношаровых схем нагружения - на 35%; двухшаровых - на 32%; трехшаровых - на 39%; четырехшаровых - на 59%.

Заключение

Проведенные исследования распределения энергии ударного импульса в очаге деформации при многоконтakтном нагружении позволили сделать следующие выводы:

1. Во всех рассмотренных случаях при прохождении через волновод (или инструмент) ударного импульса его амплитуда уменьшается, а длительность увеличивается за счет увеличения фронтов нарастания и спада.

2. Установлено, что увеличение эксцентриситета между осями симметрии волновода (или инструмента) и бойка спо-

собствует уменьшению доли энергии, передаваемой в очаг деформации.

3. Установлено, что применение многоконтakтных схем нагружения позволяет передавать в очаг деформации большую суммарную энергию ударного импульса. При этом доля энергии ударного импульса, приходящаяся на каждый волновод, в многоконтakтной схеме по сравнению с одноконтakтной падает для волноводов стержневой формы на 20%, а для инструментов в форме шара - на 15% при установке каждого последующего волновода (или инструмента) в ударную систему.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 16-08-01240 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В.Киричек, Д.Л.Соловьев, А.Г.Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004. - 288 с. - (Б-ка технолога).
2. Механика нагружения поверхности волной деформации / А.Г.Лазуткин, А.В.Киричек, Ю.С.Степанов, Д.Л.Соловьев. - М.: Машиностроение-1, 2005. - 149 с.
3. 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.
4. Киричек, А.В. Измерительный комплекс для исследования закономерностей распределения энергии ударных импульсов при многоинденторных схемах нагружения / А.В.Киричек, С.В.Баринов, С.А.Силантьев, А.В.Яшин, А.А.Зайцев // Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии: сб. тр. по материалам междунар. науч. симп. технологов-машиностроителей. - Ростов н/Д: ДГТУ, 2016. - 284 с.

1. Kirichek, A.V. *Technology and Equipment of Static-Pulse Processing by Surface Plastic Deformation* / A.V.Kirichek, D.L.Soloviyov, A.G.Lazutkin. - M.: Mechanical Engineering, 2004. - pp. 288. - (Technologist's Library).
2. *Loading Mechanics of Wave Deformation Surface* / A.G.Lazutkin, A.V.Kirichek, Yu.S.Stepanov, D.L.Soloviyov. - M.: Mechanical Engineering-1, 2005. - pp.149.
3. Kirichek, A.V. Effect of heterogeneous structure parameters upon contact spalling / A.V.Kirichek,

- S.V.Barinov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2015. - № 4 (48). - pp. 54-58.
4. Kirichek, A.V. Measuring complex for study of regularities in energy distribution of impact pulses at multi-indenter procedures of loading / A.V.Kirichek, S.V.Barinov, S.A.Silantiev, A.V.Yashin, A.A.Zaitsev // *Promising Directions in Parts Finishing Methods; Vibro-wave Techniques: Proceedings of Inter. Sc. Simp. of Technologist-Engineering Workers*. - Rostov-upon-Don: DSTU, 2016. - pp. 284.

Статья поступила в редколлегию 23.12.2016.

*Рецензент: д.т.н., профессор
МИ ВлГУ
Соловьев Д.Л.*

Сведения об авторах:

Киричек Андрей Викторович, д.т.н., профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, e-mail: avk.57@yandex.ru.

Баринов Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой автоматизированного проектирования машин Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: box64@rambler.ru.

Яшин Александр Васильевич, зав. лабораториями кафедры ТМС Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: yashin2102@yandex.ru.

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

Barinov Sergey Vladimirovich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Machine Computer-Aided Design", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: box64@rambler.ru.

Зайцев Алексей Андреевич, студент Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: box64@rambler.ru.

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

Zaytsev Alexey Andreevich, student of the Murom institute (branch) of the Vladimir state university of A.G. and N. G. Stoletovykh, e-mail: box64@rambler.ru.