

УДК 621.787.6.004

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-1-28-33

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

## МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрен вопрос необходимости разработки моделей сред нагружения (обрабатываемых материалов), что имеет большое значение при достоверном конечно-элементном моделировании основных процессов (технологий). На примере технологии волнового деформационного упрочнения, с учетом её особенностей, в статье впервые разрабатываются модели материалов: сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; В-95 и выполняется оценка их адекватности. Создание каждой модели материала является уникальным процессом и подразумевает не только за-

полнение шаблона данными из справочной литературы, но и значениями, полученными в результате проведения соответствующих экспериментальных исследований свойств, присущих обрабатываемому материалу, выявления зависимостей и закономерностей, характерных для группы материалов и конкретного материала.

**Ключевые слова:** импульс, конечно-элементное моделирование, материал, физико-механические свойства, волновое деформационное упрочнение.

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

## MATERIAL MODELS AT RESEARCH OF WAVE DEFORMATION STRENGTHENING THROUGH FINITE ELEMENT METHOD

The problem of necessity in the development of loading environment models (materials processed) which has great importance at the finite element simulation of basic processes (technologies) is considered.

As a rule, material model programs embedded into CAE cannot be used completely in the computations because of their limited set of physical-mechanical properties, most often insufficient for the adequate simulation of the process under investigation. By the example of the technology of wave deformation strengthening taking into account its peculiarities in the paper for the first time there are developed material models: steel45, BrAZh9-4; VT1-0; B-95 and the estimation of their adequacy is carried out. The creation of each model of material is a unique process and implies

not only the pattern completion with data from reference books, but also with data obtained as a result of the fulfillment of corresponding experimental investigations of properties peculiar to material under working. As a result there are developed adequate models of materials having an admissible error (not exceeding 7.4%) for micro-hardness and depth of surface layer strengthening that allows recommending their use at the investigation of wave deformation strengthening through a finite element method.

**Key words:** pulse, finite element modeling, material, physical-mechanical properties, wave deformation strengthening.

### Введение

Волновое деформационное упрочнение (ВДУ) является относительно новым способом поверхностного пластического деформирования (ППД), перспективной технологией, позволяющей создавать в поверхностном слое изделия многослойную гетерогенную, естественно армированную структуру [1, 2]. Глубина упрочнения достигает 6-10 мм, что способствует повышению эксплуатационных свойств деталей машин в 3...6 раз [3]. Технология ВДУ позволяет увеличить несущую способность тяжело нагруженных ответственных деталей, повысить полезную нагрузку на материал, раскрыть резервы повышения

тактико-технических характеристик изделий в авиации, космонавтике, автомобилестроении, общем машиностроении, инструментальном производстве, энергетической, нефтегазовой и строительной отраслях [4].

Для выявления технологических возможностей ВДУ при обработке новых изделий из ранее не исследованных материалов, необходимо выполнить большой объем экспериментов, что требует значительных временных и материальных затрат. Получение большого объема информации о процессе при минимальных затратах времени и средств возможно путем его ко-

нечно-элементного моделирования [5, 6]. Однако, достоверность расчетных данных определяется адекватностью конечно-элементной модели, которая существенно зависит от заданных свойств обрабатываемой среды, т.е. заложенной в конечно-элементную модель процесса модели материала.

подавляющее большинство комплексов современного инженерного анализа (CAE), основанных на методе конечных элементов, содержат встроенные библиотеки шаблонов материалов (рис.1). Их применение допустимо на стадии изучения возможностей используемой CAE-программы, однако для выполнения достоверных расчетов, данные библиотеки материалов недостаточны. Имеют место серьезные ограничения вследствие крайне

небольшого количества заданных физико-механических свойств в имеющихся шаблонах материалов, а также небольшого набора марок материалов в библиотеке. Известно, что реальные материалы, даже в рамках одной марки, могут иметь существенные различия в физико-механических свойствах из-за: плавающего химического состава материала разных плавков; особенностей лабораторного оборудования и условий определения физико-механических свойств; технологической наследственности, полученной на предыдущих операциях, скорости и условий деформации. Таким образом, для проведения серьезных исследований необходимо дополнять имеющиеся шаблоны материалов или создавать новые модели материалов.

1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	Tabular	
4	Scale	1	
5	Offset	0	kg m <sup>-3</sup>
6	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
7	Coefficient of Thermal Expansion	Tabular	
8	Scale	1	
9	Offset	0	C <sup>-1</sup>
10	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	20	C
11	Isotropic Elasticity	Tabular	
21	Bilinear Isotropic Hardening		
22	Yield Strength	0	Pa
23	Tangent Modulus	0	Pa
24	Isotropic Thermal Conductivity	Tabular	
27	Specific Heat, C <sub>p</sub>	Tabular	
30	Principal Stress Failure		
31	Maximum Tensile Stress	0	Pa
32	Maximum Shear Stress	0	Pa

Рис. 1. Шаблон модели материалов

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 для уточнения свойств, присущих непосредственно материалу, который планируется обрабатывать. На рис. 2 представлен заполненный шаблон материала, с набором свойств, необходимых для учета специфики планируемых исследований возможностей ВДУ. Из справочной литературы берутся следующие свойства: предел текучести, плотность, коэффициент термического расширения, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности,

удельная теплоемкость, касательный модуль, пределы по нормальным и касательным напряжениям и др. Данные свойства на рис. 2 выделены сплошными линиями. Некоторые физико-механические свойства задаются в зависимости от температуры. Пунктирными линиями указаны свойства, которые задаются в шаблон по результатам экспериментальных исследований материала (рис. 2). К ним относятся кривые прочности неупрочненного и упрочненного материалов с различной степенью. В зависимости от поставленных задач исследования, данный шаблон может быть дополнен и другими свойствами. Корректно заполненный шаблон материала сохраняется в файл и используется во всех дальнейших расчетах.

Целью данной работы является создание моделей нескольких материалов, оценка их адекватности и возможности использования применительно к конечно-

элементному моделированию и исследованию волнового деформационного упрочнения.

### Материалы, методы и результаты

Специфика ВДУ заключается в нагружении материала ударными импульсами длительностью  $10^{-5}$  секунды, обеспечивающими глубокое упрочнение (до 10 мм) с плавным переходом от упрочненного материала к неупрочненному. Исходя из особенностей процесса ВДУ, средой для моделирования выбран программный комплекс *Ansys*, позволяющий работать с быстропротекающими процессами, а также выполнять корректный обмен данными между своими модулями при решении мультидисциплинарных задач [6-8].

В качестве сред нагружения (обрабатываемых материалов) для ВДУ рассмат-

риваются следующие материалы: сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95. Выбор марок материалов обоснован тем, что сталь 45 является признанным эталоном в машиностроении, а остальные сплавы используются для изготовления ответственных изделий. Для стали 45 и ВТ 1-0 ранее уже были попытки создания моделей материалов [9], которые, однако, нуждаются в модернизации и дополнении: расширении диапазона задаваемых физико-механических свойств, экспериментальном уточнении полученных данных.

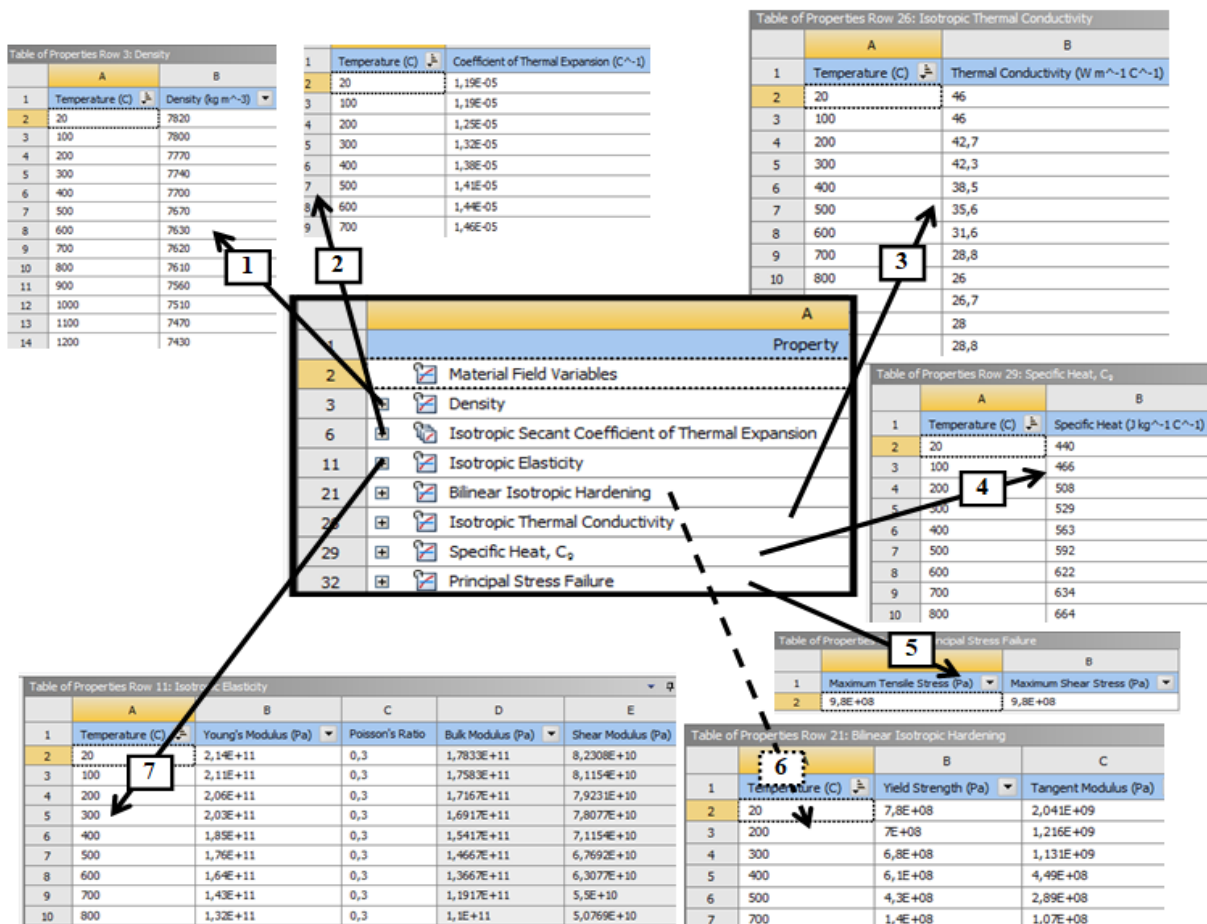


Рис. 2. Пример заполненного шаблона материала, где установлены и введены зависимости: 1) коэффициента термического расширения от температуры; 2) коэффициента теплопроводности от температуры; 3) коэффициента теплопроводности от температуры; 4) удельной теплоёмкости от температуры; 5) пределов по нормальным и касательным напряжениям; 6) предела текучести, касательного модуля от температуры; 7) модуля Юнга, коэффициента Пуансона, модуля сдвига от температуры

В связи с изложенным, для образцов исследуемых материалов (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95) на основании данных полученных на универсальной электро-механической машине с компьютерным управлением серии *WDW-100E* строились кривые упрочнения. С помощью экспериментальных исследований определялись прочностные свойства неупрочненного и упрочненного ВДУ с различной степенью интенсивности и равномерности 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 (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95), 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 также карты микротвердости в поверхностном слое после ВДУ.

Так, в результате сравнения характерных размеров единичных отпечатков

установлено, что погрешность модели для различных материалов составляет: стали 45 – 3 %; БрАЖ 9-4 – 4,2%; ВТ 1-0 – 3,3%; Б-95 – 5 %.

Для исследования микротвердости поверхностного слоя, неупрочненные и упрочненные материалы разрезались по центру упрочненной дорожки, в полученном сечении выполнялась серия замеров с помощью автоматического твердомера *KB 30S*.

Для определения твердости материалов из модели разработана следующая методика. После моделирования процесса ВДУ, в упрочненном материале определялись величины возникающих деформаций *Effective Strain*, значения которых переводились в величины напряжений *Effective Stress* с помощью регрессионной модели кривой упрочнения, полученной экспериментально. Найденные величины напряжений переводились в значения микротвердости, согласно методике, изложенной в [10].

Результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных, полученных расчетом по модели для каждого исследуемого материала (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95) представлены на рис. 3.

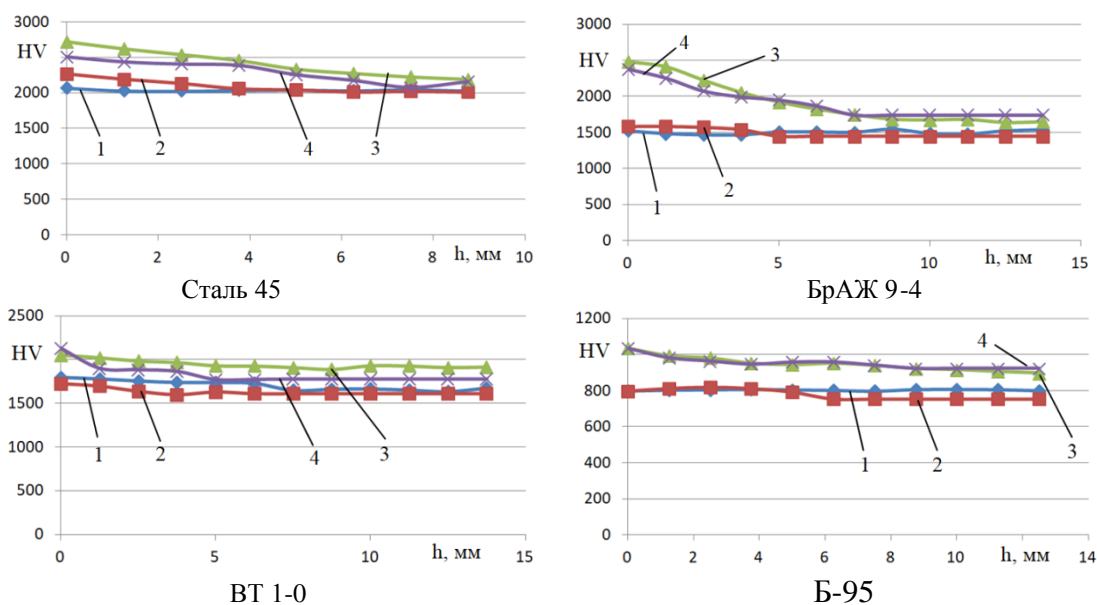


Рис. 3. Сравнение теоретических (2, 4) и экспериментальных (1, 3) зависимостей изменения микротвердости ( $HV$ , МПа) по глубине ( $h$ , мм) поверхностного слоя:

1, 2 – неупрочненного материала; 3, 4 – упрочненного с коэффициентом перекрытия отпечатков  $K=0,6$

Таким образом, погрешность модели материала по величине микротвердости поверхностного слоя для исследуемых материалов (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95) составляет, соответственно, 7,4; 4; 3,8;

### Заключение

Разработаны адекватные модели материалов (сталь 45, БрАЖ 9-4; ВТ 1-0; Б-95), имеющие допустимую (не превышающую 7,4 %) погрешность по микротвердости и глубине упрочнения поверхност-

ного слоя, что позволяет рекомендовать их для использования при исследовании процесса волнового деформационного упрочнения методом конечных элементов.

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

### 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. **Kirichek, A. V.** The investigation of the deformation wave hardening effect on the strength of the medium and low alloy steels / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin, S.E. Kolontsov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 177 (2017) 012121. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012121.
4. **Киричек, А. В.** Исследование влияния геометрических размеров бойка на эффективность передачи энергии ударных импульсов, при волновом деформационном упрочнении / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин // Инновации в машиностроении: в сб. тр. / Куз. гос. техн. ун-т; под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кузбасс, 2019. - С. 567-571.
5. **Костичев, В. Э.** Повышение сопротивления усталости коленчатых валов тепловых двигателей : специальность 01.02.06. «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Костичев Владислав Эдуардович ; Самар. нац. иссл. ун-т им. С.П. Королева (Самар. ун-т). - Самара, 2017. - 192 с.
6. **Митрофанова, К. С.** Конечно-элементное моделирование поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом / К.С. Митрофанова // Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении: сб. науч. тр. // Куз. гос. техн. ун-т ; под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кузбасс, 2016. - С. 1.
7. Ansys: [Электронный ресурс]. У., 1997-2020. URL: <https://www.ansys.com> (Дата обращения: 12.10.2020).
8. **Кузькин, В. А.** Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона Кука при высокоскоростном деформировании алюминия / В.А. Кузькин, Д.С. Михалюк // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – № 1. – С. 32 – 43.
9. **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 [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 11 (84). – С. 13-18.
10. **Дель, Г. Д.** Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.
1. **Kirichek, A. V.** *Technology and Equipment of Static-Pulse Processing with Surface Plastic Deformation* / A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov, A.G. Lazutkin. – М.: Mechanical Engineering, 2004. – pp. 288.
2. **Kirichek, A. V.** Impact of heterogeneous structure parameters upon resistance to contact spalling / A.V. Kirichek, S.V. Barinov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2015. – No. 4(48). – pp. 54-58.
3. **Kirichek, A. V.** The investigation of the deformation wave hardening effect on the strength of the medium and low alloy steels / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin, S.E. Kolontsov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 177 (2017) 012121. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012121.
4. **Kirichek, A. V.** Investigations of head geometrical parameter impact upon effectiveness of shock pulse power transfer at wave deformation strengthening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin // *Innova-*

- tions in Mechanical Engineering: Proceedings / Kuz. State Tech. University; under the editorship of V.Yu. Blumenstein. – Kuzbass, 2019. – pp. 567-571.*
5. **Kostichev, V. E.** Fatigue resistance increase in crankshafts of heat-engines: specialty 01.02.06. “*Dynamics, Strength of Machinery, Appliances and Equipment*”: thesis for Can. Sc. Tech. degree / Vladislav Eduardovich Kostichev; Korolyov National Research University of Samara (Samara University). – Samara, 2017. – pp. 192.
  6. **Mitrofanova, K. S.** Finite-element simulation of surface plastic deformation with multi-radius roller / K.S. Mitrofanova // *Strengthening Technologies and Functional Coatings in Mechanical Engineering: Proceedings* // Kuz. State Tech. University; under the editorship of V.Yu. Blumenstein. – Kuzbass, 2016. pp. 1.
  7. Ansys: [Electronic Resource] U., 1997-2020. URL: <https://www.ansys.com> (address date: 12.10.2020).
  8. **Kuzkin, V. A.** Numerical modeling application for parameter identification of James Cook at high-speed aluminum deformation / V.A. Kuzkin, D.S. Mikhalyuk // *Computer Mechanics of Continuum*. – 2010. – No.1. – pp. 32-43.
  9. **Kirichek, A. V.** Impact of environment processed upon effectiveness of shock pulse power transfer at wave deformation strengthening / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, A.V. Yashin [et al.] // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2019. – No.11 (84). – pp. 13-18.
  10. **Del, G. D.** *Stress Definition in Plastic Area of Strength Distribution* / G.D. Del. – M.: Mechanical Engineering, 1971. – p. 200.

Ссылка цитирования:

Киричек, А.В. Модели материалов при исследовании волнового деформационного упрочнения методом конечных элементов / А.В. Киричек, С.В. Баринов, С.А. Силантьев, А.В. Яшин, А.А. Зайцев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. - № 1. – С.28 - 33. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-1-28-33.

Статья поступила в редакцию 27.11.20.  
Рецензент: д.т.н., профессор Юго-Западного государственного университета  
Ивахненко А.Г.,  
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».  
Статья принята к публикации 23.12.20.

#### Сведения об авторах:

**Киричек Андрей Викторович**, д.т.н., профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, тел.: 8 (4832) 51-51-38; e-mail: avk.57@yandex.ru.

**Баринов Сергей Владимирович**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, тел.: (49234) 7-71-41; e-mail: box64@rambler.ru.

**Силантьев Сергей Александрович**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г.

**Kirichek Ansrey Victorovich**, Dr. Sc. Tech, Prof., Pro-rector for Promising Development of Bryansk State Technical University, phone: 8 (4832) 51-5138; e-mail: avk.57@yandex.ru.

**Barinov Sergey Vladimirovich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Technique”, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, phone: (49234) 7-71-41; e-mail: box64@rambler.ru.

**Silantiev Sergey Alexandrovich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Technique”, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University

Столетовых», тел.: (49234) 7-71-41; e-mail: murstin@yandex.ru.

**Яшин Александр Васильевич**, ст. преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», тел.: (49234) 7-71-41; e-mail: yashin2102@yandex.ru.

**Зайцев Алексей Андреевич**, магистрант кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», тел.: (49234) 7-71-41; e-mail: apmitp@yandex.ru.

of Vladimir, phone: (49234) 7-71-41; e-mail: murstin@yandex.ru.

**Yashin Alexander Vasilievich**, Senior lecturer of the Dep. “Engineering Technique”, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, phone: (49234) 7 71 41; e-mail: yashin2102@yandex.ru.

**Zaitsev Alexey Andreevich**, Master student of the Dep. “Engineering Technique”, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, phone: (49234) 7-71-41; e-mail: apmitp@yandex.ru.