УДК 621.9.025.523
DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-22-28

В.В. Куц, Д.С. Гридин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА И СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ НА УСИЛИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ НАРЕЗАНИИ ВИНТОВЫХ КАНАВОК НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Показаны результаты обработки экспериментальных данных исследования влияния геометрических параметров инструмента на усилие формообразования при нарезании винтовых канавок на внутренней поверхности цилиндрической оболочки. Определены уровни изменения факторов, определена дисперсия результатов эксперимента по каждому из опытов. Рассчитаны коэффициенты регрессии, составлено уравнение регрессии, проведена оценка дисперсии адекватности модели и проверка адекватности уравнения регрессии, определен характер влияния взаимодействия параметров скорости резания, величины переднего угла и снимаемого припуска на усилие формообразования. Получено уравнение регрессии, отражающее зависимость влияния факторов на осевую силу, приходящуюся на один зуб инструмента в установленном диапазоне параметров факторов, а также построены соответствующие графики, полученные результаты исследований позволили определить количество одновременно работающих зубьев.

Ключевые слова: планирование, эксперимент, математическая модель, оправка, стержень, канавка, передний угол, формообразование.

V.V. Kutc, D.S. Gridin

INVESTIGATION OF DEPENDENCE IMPACT OF TOOL GEOMETRICAL PARAMETERS AND CUTTING SPEED UPON SHAPING EFFORT AT HELICAL GROOVE CUTTING ON INTERNAL SURFACE OF CYLINDRICAL SHELL

The work purpose was the investigation of dependence impact of tool geometrical parameters upon shaping effort during internal groove cutting.

As a realization for the fulfillment of the helical groove processing investigation there was used a software complex based on a finite element method and a computer mathematic system. As a result of the investigations carried out there was obtained a regression equation manifesting the dependence of factors impact upon axial force falling on one tooth of the tool in the set scale of factor parameters. The scientific novelty consists in that in the paper there is considered a new method for helical groove cutting in which a shaping motion is carried out at the expense of the contact interaction of a tool and a billet performing free cutting.

The investigation results obtained allowed determining the number of teeth operating simultaneously, that can be used further at cutting mode setting, and also as recommendations during designing tool design.

Key words: planning, experiment, simulator, mandrel, rod, groove, front clearance angle, shaping.

Введение

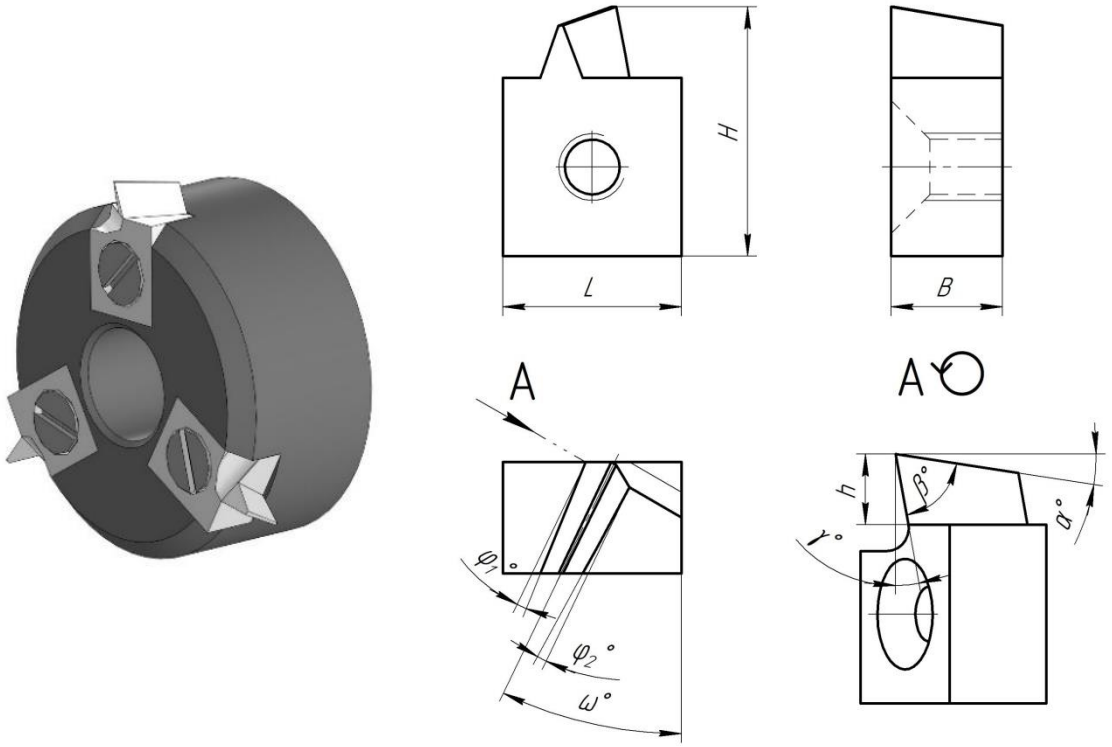
В настоящее время в специальных отраслях машиностроения все больше находят свое применение тонкостенные изделия цилиндрической формы, на внутренних поверхностях которых имеются многозаходные спиральные винтовые канавки. Существующие технологии получения канавок на внутренних поверхностях оболочек основаны на методе обработки заготовки давлением, который в свою очередь не позволяет применять его в среднесерийном или массовом производстве.

Проектирование инструмента для нарезания винтовых канавок на внутренней поверхности цилиндрической оболочки в настоящее время является одним из наиболее проблемных вопросов инструментального производства.

С ростом номенклатуры подобных изделий возникла потребность в разработке высокопроизводительных инструментов, предназначенных для нарезания винтовых канавок на внутренних поверхностях цилиндрических оболочек с применением универсального оборудования, позволяющего сократить затраты на приобретение станков с ЧПУ.

Теоретическая часть

Согласно предложенному способу нарезания винтовых канавок [1] был разработан сектор режущего инструмента (рис.1), позволяющий производить обработку на универсальном оборудовании, например: токарные, фрезерные станки или гидравлические прессы.



а) б)

Рис.1. Сектор режущего инструмента для обработки внутренних винтовых канавок: а - трехмерная модель режущей оправки; б - геометрические характеристики режущей пластины: γ - передний угол; α – задний угол; β – угол заострения; ω – угол наклона режущего зуба; φ_1, φ_2 – вспомогательные углы в плане; *h* – высота режущего зуба; *H, L, B* – габаритные размеры режущей пластины

Режущий инструмент представляет собой оправку или блок оправок с режущими зубьями на внешней поверхности оправки, которая фиксируется на инструментальном стержне. В свою очередь, инструментальный стержень благодаря простоте конструкции легко устанавливается в держателе обычного токарного, фрезерного или любого другого станка, а заготовка в патроне или на рабочей поверхности стола в приспособлении [2].

При введении инструментального стержня с оправкой или блоком оправок в полость цилиндрической оболочки происходит их вращение вокруг оси под действием силы резания (усилие формообразования), осуществляя процесс нарезания винтовых канавок. Было установлено, что при варьировании скорости резания $V_р$ в диапазоне 0,2…2 м/мин погрешность угла наклона спирали нарезанной винтовой канавки составляет не более 4 %. Однако данные величины скоростей могут нега-

тивно отразиться на производительности обработки в целом.

Основной задачей данного исследования является определение влияния геометрических параметров режущего инструмента и скорости резания при нарезании винтовых канавок на внутренней поверхности цилиндрической оболочки, на усилие формообразования.

Для решения поставленной задачи, а также сокращения времени, затрачиваемого на исследования, было решено использовать программный комплекс, основанный на методе конечных элементов, и систему компьютерной математики. В качестве материала для заготовки была выбрана сталь 45 ГОСТ1050-2013 без закалки, обладающая твердостью 30*HRC*. Для инструмента использовалась быстрорежущая инструментальная сталь Р6М5 ГОСТ19265-73, твердостью 62*HRC*. Среди геометрических характеристик пластины параметр переднего угла γ изменялся от 5° до 15°, а величина снимаемого припуска *t* варьировалась от 0,2 до 1 мм [1].

Оставшиеся геометрические параметры были постоянными, а именно величина заднего угла α составляла 5°, боковых вспомогательных углов φ_1, φ_2 по 3° соответственно, а угол наклона режущего зуба ω = 30°.

С целью получения математической модели исследуемого объекта был составлен ортогональный центральный композиционный план проведения эксперимента с числом факторов n = 3, в котором в качестве факторов, влияющих на усилие формообразования – P_z, кН, были выбраны: скорость резания $V_р$, м/мин, величина переднего угла α, град., и снимаемый припуск *t*, мм (табл.1).

Ортогональность матриц планов позволит качественно оценить все линейные эффекты факторов и их взаимодействия. В табл. 2 представлены результаты проверки коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента.

Таблица 1

Уровни изменения факторов

Факторы	Скорость резания, м/мин	Передний угол, град	Припуск, мм	Осевая сила, Н
Принятое обозначение	$V_р$	γ	t	P_z
Обозначение в ОЦКП	x_1	x_2	x_3	y
Верхний, +1	12	10	1	-
Основной, 0	6	5	0,6	-
Нижний, -1	2	0	0,2	-

Таблица 2

Результаты проверки коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента

Коэффициенты регрессии	Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента				
	Численное Значение	$S^2\{b_i\}$	t_{bi}	Табл. знач. коэффициента Стьюдента	Проверка значимости
b_0	12,833	0,319	22,712	2,042	Значимый
b_1	-2,833	0,437	4,284	2,042	Значимый
b_2	-2,233	0,437	3,377	2,042	Значимый
b_3	0,644	0,437	0,974	2,042	Не значимый
b_{12}	1,25	0,598	1,615	2,042	Не значимый
b_{13}	-1,625	0,598	2,100	2,042	Значимый
b_{23}	-1	0,598	1,292	2,042	Не значимый
b_{123}	-1,875	0,598	2,423	2,042	Значимый
b_{11}	1,585	1,098	1,513	2,042	Не значимый
b_{22}	3,269	1,098	3,119	2,042	Значимый
b_{33}	2,084	1,098	1,989	2,042	Не значимый

Определим коэффициенты регрессии.

Подсчитаем b_0 по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} x_{ij}\overline{y_j}}{N}, \quad (1)$$

где i = 1,2,3,…, n; N – количество проведенных опытов (для трехфакторного плана N=15); y_i – значение функции «Y» соответствующее n; x_i – значение фактора, соответствующее n.

Вычисляем дисперсию воспроизводимости по формуле:

$$S^2_{\{y\}} = \frac{1}{15}\sum_{j=1}^{15} S_j^2 . \quad (2)$$

Для проверки значимости коэффициентов регрессии вычисляем оценки дисперсий по формулам:

$$S^2_{\{b_0^*\}} = \frac{S^2_{\{y\}}}{k \cdot N}; \; S^2_{\{b_i^*\}} = \frac{S^2_{\{y\}}}{k\sum_{j=1}^{N} x_{ij}^2}, \quad (3)$$

$$S^2_{\{b_{ij}\}} = \frac{S^2_{\{y\}}}{k\sum_{j=1}^{N} x_{ij}^2 x_{jl}^2}; S^2_{\{b_{ii}\}} = \frac{S^2_{\{y\}}}{k\sum_{j=1}^{N} (x_{ii}^*)^2} . \quad (4)$$

Построим новое уравнение регрессии в кодированном виде с учетом коэффициентов значимости

$$\hat{y} = 12{,}833 - 2{,}833x_1 - 2{,}33x_2 - 1{,}625x_{13} - 1{,}875x_{123} - 3{,}269x_2^2. \quad (5)$$

Для перехода к уравнению регрессии в обычной форме находим величину b_0^* - скорректированного коэффициента регрессии

$$b_0^* = b_0 - \beta \cdot \left(b_{11} + b_{22} + b_{33}\right). \quad (6)$$

Тогда уравнение регрессии будет иметь обычный вид

$$\hat{y} = 12{,}833 - 2{,}833 \cdot x_1 - 2{,}33 \cdot x_2 - 1{,}625 \cdot x_{13} - 1{,}875 \cdot x_{123} - 3{,}269 \cdot x_2^2. \quad (7)$$

Число степеней свободы, связанное с дисперсией адекватности, определим по формуле:

$$f_{ад} = N - P = 15 - 5 = 10, \quad (8)$$

где N – число основных опытов в плане; P – число оцениваемых коэффициентов регрессии.

Вычисляем оценку дисперсии адекватности

$$S^2_{ад} = \frac{1}{N-P} \cdot \sum_{j=1}^{15} (\overline{y}_j - \hat{y}_j)^2 . \quad (9)$$

В табл. 3 представлены результаты расчетов дисперсии адекватности.

Таблица 3

Расчет дисперсии адекватности

№ опыта	Y			
	y	$\hat{y}$	$y - \hat{y}$	$(y - \hat{y})^2$
1	16,5	15,282	1,217	1,482
2	14	16,615	-2,615	6,840
3	15	14,564	0,435	0,189
4	10	8,397	1,602	2,566
5	30	22,282	7,717	59,563
6	13,5	9,615	3,884	15,091
7	17	14,064	2,935	8,615
8	13	8,897	4,102	16,827
9	12,5	13,889	-1,389	1,931
10	10	7,002	2,997	8,987
11	11	17,991	-6,991	48,861
12	6,5	12,561	-6,061	36,727
13	2,5	10,445	-7,945	63,135
14	11,5	10,445	1,054	1,111
15	9,5	10,445	-0,945	0,894
$S^2_{ад}$				272,824

Определяем расчетное значение критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{27,28}{14,36} = 1,89. \quad (10)$$

Табличное значение критерия $F_{табл} = 2,21$.

Для раскодирования заменим x на натуральные значения:

$$x_1 = \frac{v-6}{4}; x_2 = \frac{a-5}{5}; x_3 = \frac{t-0,6}{0,4}. \quad (11)$$

Подставив данные значения в уравнение регрессии, получим уравнение, отражающее зависимость факторов при числе зубьев z=3:

$$P_z = 12,833 - 2,833 \cdot V_p - 2,23 \cdot \gamma - 1,625 \cdot V_p \cdot s - 1,875 \cdot V_p \cdot \gamma \cdot s + 3,269 \cdot \gamma^2. \quad (12)$$

Для получения уравнения регрессии влияния осевой силы резания, приходящейся на один зуб, разделим полученное уравнение на z

$$P_z = 4,277 - 0,944 \cdot V_p - 0,743 \cdot \gamma - 0,541 \cdot V_p \cdot s - 0,625 \cdot V_p \cdot \gamma \cdot s + 1,089 \cdot \gamma^2. \quad (13)$$

По результатам обработки данных, полученных уравнением регрессии, были построены зависимости влияния геометрических параметров инструмента на осевую силу резания рис. 2 – 4.

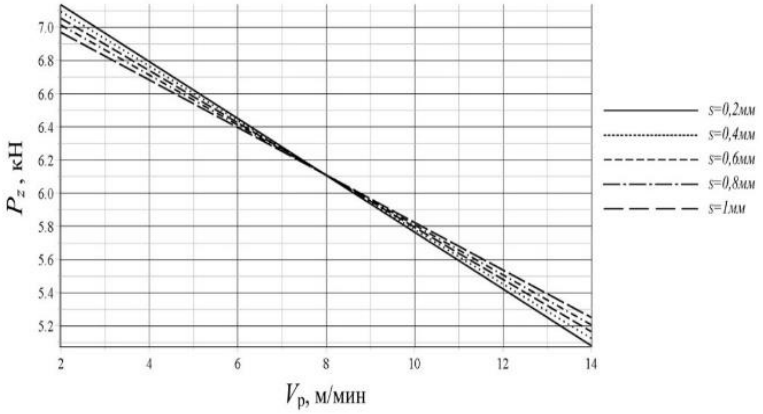


Рис. 2 График влияния скорости резания на осевую силу резания, приходящуюся на один зуб инструмента, при γ= 5°

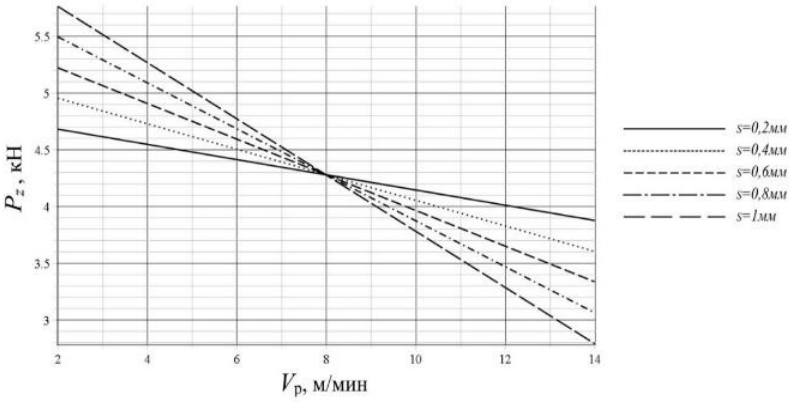


Рис. 3 График влияния скорости резания на осевую силу резания, приходящуюся на один зуб инструмента, при γ= 10°

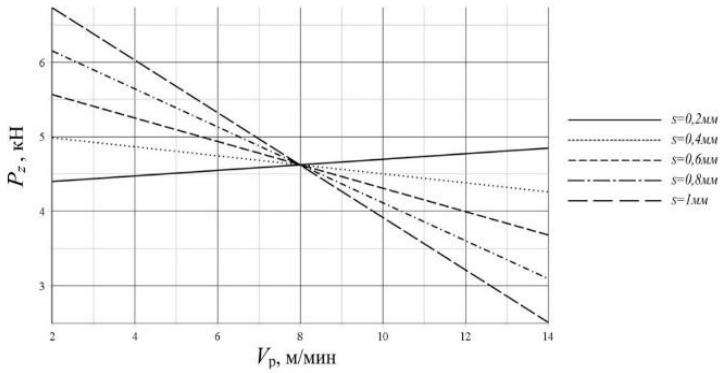


Рис. 4 График влияния скорости резания на осевую силу резания, приходящуюся на один зуб инструмента, при $\gamma = 15°$

Заключение

Таким образом, с помощью проведения ортогонального центрального композиционного плана эксперимента было установлено влияние параметров: скорости резания $V_р$, м/мин, переднего угла α, град., снимаемого припуск t, мм на усилие формообразования P_z, кН.

Полученное уравнение регрессии, описывающее процесс обработки, позволило получить графики, по которым в дальнейшем можно назначать режимы резания в зависимости от применяемого оборудования с целью обеспечения максимальной производительности обработки.

В дальнейшем основной задачей исследования будет являться разработка методики определения конструктивных параметров режущей оправки с возможностью автоматизации процесса расчета.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90057.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куц, В.В. Исследование влияния скорости резания на формирование скрытой кинематической связи при протягивании внутренних винтовых канавок с большими углами подъема спирали / В.В. Куц, Д.С. Гридин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – № 6. – С. 121-124
2. Барботько, А.И. Математическая статистика в машиностроении / А.И. Барботько, А.О. Гладышкин. – Курск, 2006. – 320 с.
3. Лашнев, С.И. Геометрическая теория формирования режущих поверхностей режущими инструментами: Монография / С.И. Лашнев, А.Н. Борисов, С.Г. Емельянов. – Курск, 1997. – 391с.
4. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
5. Заявка 2019137727 Российская федерация. Способ нарезания винтовых канавок на внутренней поверхности цилиндрической оболочки и устройство для его осуществления / В.В. Куц, Д.С. Гридин.
6. Кожухар, В. М. Основы научных исследований: учеб. пособие / В.М. Кожухар. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2010. – 216 с.
7. Славутский, Л.А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента: учеб. пособие / Л.А. Славутский. – Чебоксары, Изд-во ЧГУ, 2006. – 200 с.
8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман // 10-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2004. – 479 с.
9. Pham T.H. Simulation and experimental studies to verify the effect of cutting parameters on chip shrinkage coefficient and cutting forces in machining of a6061 aluminum alloy / T.H. Pham, T.B. Mac, T.L. Banh, D.T. Nguyen, V.C. Tong //Advances in mechanical engineering. – 2016. – T. 8. - № 6. – C. 1-11.
10. Nalbant M. Finite element analysis of bending occurring while cutting with high speed steel lathe cutting tools / M. Nalbant, A. Duran // Materials and design. – 2005. – T. 26. - № 5. – C. 549-554.

1. Kuts, V.V. Investigation of cutting speed impact upon formation of latent kinematical connection at internal helical groove stretching with large angles of helix lifting / V.V. Kuts, D.S. Gridin // *Bulletin of Voronezh State Technical University*. – 2019. – Vol. 15. – No.6. – pp. 121-124.
2. Barbotko, A.I. *Mathematical Statistics in Mechanical Engineering* / A.I. Barbotko, A.O. Gladyshkin. – Kursk, 2006. – pp. 320.
3. Lashnev, S.I. *Geometrical Theory Cutting Surface Formation with Cutters*: monograph / S.I. Lashnev, A.N. Borisov, S.G. Yemeliyanov. – Kursk, 1997. – pp. 391.
4. Adler, Yu.P. *Experiment Planning at Optimum Conditions Search* / Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovsky. – M.: Science, 1976. – pp. 279.
5. Application 2019137727 the Russian Federation. *Method for Helical Groove Cutting on Internal Surface of Cylindrical Shell and Device for Its Fulfillment* / V.V. Kuts, D.S. Gridin.
6. Kozhukhar, V.M. *Scientific Research Fundamentals*: manual / V.M. Kozhukhar. – M.: Publishing-Trading Corporation “Dashkov&K”, 2010. – pp. 216.
7. Slavutsky, L.A. *Fundamentals of Data Recording and Experiment Planning*: manual / L.A. Slavutsky. – Cheboksary, ChSU Publishers, 2006. – pp. 200.
8. Gmurman, V.E. *Probability Theory and Mathematical Statistics*: manual for colleges / V.E. Gmurman // 10-th Edition Stereotypical. – M.: Higher School, 2004. – pp. 479.
9. Pham T.H. Simulation and experimental studies to verify the effect of cutting parameters on chip shrinkage coefficient and cutting forces in machining of a6061 aluminum alloy / T.H. Pham, T.B. Mac, T.L. Banh, D.T. Nguyen, V.C. Tong //Advances in mechanical engineering. – 2016. – T. 8. - № 6. – C. 1-11.
10. Nalbant M. Finite element analysis of bending occurring while cutting with high speed steel lathe cutting tools / M. Nalbant, A. Duran // Materials and design. – 2005. – T. 26. - № 5. – C. 549-554.

Ссылка цитирования:

Куц, Д.С. Исследование влияния зависимости геометрических параметров инструмента и скорости резания на усилие формообразования при нарезании винтовых канавок на внутренней поверхности цилиндрической оболочки / В.В. Куц, Д.С. Гридин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. - № 10. – С. 22-28. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-22-28.

Статья поступила в редакцию 23.04.20.
Рецензент: д.т. н., профессор, Брянского Государственного технического университета Хандожко А.В.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 30.09.20.

Сведения об авторах:

Куц Вадим Васильевич, д.т.н., профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru.

Kuts Vadim Vasilievich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Engineering Techniques and Equipment”, South-Western State University, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru.

Гридин Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, e-mail: swsu.st@inbox.ru.

Gridin Dmitry Sergeevich, Post graduate student of the Dep. “Engineering Techniques and Equipment”, South-Western State University, e-mail: swsu.st@inbox.ru.