

DOI:10.12737/article_5b115a6e582483.82239040

¹Бондаренко И.Р., канд. техн. наук, ст. преп.,²Гринёк А.В., канд. техн. наук, доц.,¹Ковалев Л.А., канд. техн. наук, доц.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Государственный морской университет им. Ф.Ф. Ушакова

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

ivanbond85@rambler.ru

Использование современных программных продуктов, применяемых для моделирования различных технологических процессов, позволяет достичь значительной экономии временных и материальных затрат на различных этапах производства, а также позволяет прогнозировать поведение основных рабочих показателей технологических систем в процессе их эксплуатации. В данной работе на основании имитационного моделирования представлен подход к исследованию силовых показателей процесса резания при фрезеровании, производимым в диапазоне высоких подач инструмента. Значительные величины данного технологического параметра делают актуальным вопрос выбора расчетной модели силовых показателей. С этой целью был проведен краткий обзор некоторых аналитических расчетных зависимостей (расчетных моделей), обладающих сравнительной простотой и нашедших применение при определении силы резания в инженерной и производственной практике. Рассмотрены имеющиеся в них недостатки, которые заключаются в суженности границ их применения ввиду использования при их получении опытных данных, соответствующих строго определенным условиям проведения эксперимента. Отмечены преимущества имитационного моделирования при изучении механических процессов в зоне резания, среди которых: возможность учета динамических характеристик процесса, решение сложной задачи деформации и последующего разрушения материала, которая может быть представлена в пространственной постановке. В дальнейшем был выполнен сравнительный расчет величин сил резания, полученных по расчетным моделям и результатам имитационного моделирования. На основании анализа полученных данных, а также преимуществ и недостатков представленных подходов, дана оценка возможности применимости метода имитационного моделирования в вопросах определения силовых характеристик процесса резания при высокопроизводительном фрезеровании.

Ключевые слова: имитационное моделирование, имитационный эксперимент, высокопроизводительное фрезерование, высокие подачи, расчетные модели, сила резания.

Использование современных комплексов программ в области моделирования различных технологических процессов позволяет сократить временные и материальные затраты на подготовительных этапах производства, а также даёт возможности отслеживания поведения основных рабочих показателей технологических систем в процессе их работы. Так при моделировании широкого спектра процессов механической обработки большое распространение получил программный пакет Deform 3D.

В данной работе рассмотрено применение программы Deform 3D для проведения имитационного эксперимента по исследованию изменения силы резания, развиваемой в процессе механической обработки фрезерованием, производимым в диапазоне высоких подач инструмента (рис. 1).

Данная технологическая операция применяется при черновой или получистовой обработке

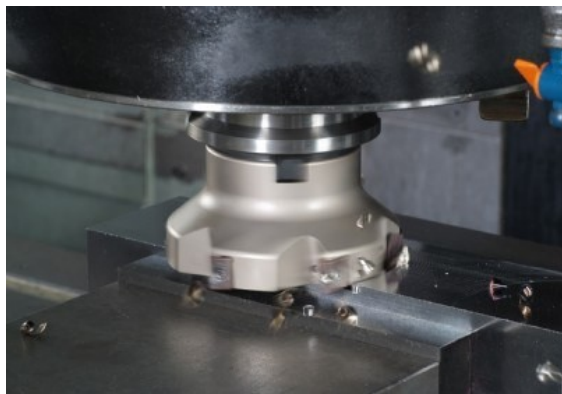
различных изделий машиностроения, при этом величина подач может достигать 4 мм/зуб при глубине резания до 2 мм. Достаточно высокие значения вышеуказанных величин делают актуальным вопрос о выборе моделей расчета силовых показателей в зоне резания, наиболее точно отвечающих реальной картине.

На сегодняшний день для описания и представления различных сторон процесса механической обработки, и в частности для определения величины силы резания, нашли применение два основных типа моделей расчета: модели аналитические и имитационные.

Аналитические модели также можно разделить на две группы: теоретические и эмпирические. Теоретические основаны на теории резания металлов и представляют собой ряд зависимостей, включающих в себя параметры, переменные и критерии, не всегда известные инженеру или неопределимые опытным путем и рас-

считывающиеся по определенным алгоритмам [2, 3]. Присутствие обширного спектра безразмерных критериев, находящихся в зависимости от множества факторов, может давать большое расхождение в результате расчета даже при небольшом их варьировании, что делает такие модели неработоспособными. Силовые закономерности можно считать соответствующими экспе-

риментальным данным для случая неизменной геометрии режущей кромки и отсутствия случайных воздействий на процесс резания. Они описывают зависимости для плоской задачи свободного резания, тогда как в практике токарной, фрезерной и другой механической обработки ставится трехмерная задача несвободного резания [4].



а



б

Рис. 1. Фрезы для работы на высоких подачах: а – Sumitomo; б – Seco

Эмпирические расчетные модели нашли применение в инженерных и производственных расчетах ввиду своей относительной простоты. Известна степенная экспериментальная зависимость для расчета тангенциальной силы при фрезеровании [5]:

$$P_Z = \frac{C_p t^x s_z^y B^u z_p K_p}{d^q n^w}, \quad (1)$$

где C_p , x , y , K_p , u , q , w – коэффициенты, определяемые на основании справочной информации; t – глубина резания, мм; s_z – подача, мм/зуб; B – ширина фрезерования; z_p – число рабочих зубьев фрезы; d – диаметр фрезы, мм; n – частота вращения шпинделя, мин^{-1} .

Применение эмпирической зависимости (1) не позволяет охватить возможности современного оборудования. Кроме этого, при высоких скоростях резания и в совокупности с определенными значениями подач может наблюдаться снижение силы резания и наличие одного или нескольких экстремумов в связи с изменяющимся температурно-силовым состоянием зоны резания и зависящими от него прочностными характеристиками материала заготовки.

Недостатком таких зависимостей является их “статичность”. Также при работе с современным высокопроизводительным оборудованием приведенные расчетные зависимости могут быть использованы в относительно узком диапазоне технологических режимов, что значительно сужает возможности их применения; измеренные силовые параметры могут давать неточные эмпирические температурные и силовые зави-

симости или не согласовываться с аналитическими моделями в силу ряда факторов. Как правило, влияние возмущающих факторов приводит к изменению технологических условий и обуславливает нестационарные свойства модели процесса, что снижает точность при использовании постоянных коэффициентов.

Один из подходов к описанию силовых зависимостей заключается в применении комбинированных моделей и реализуется в методе Кинцле [1], согласно которому сила резания может быть рассчитана из зависимости:

$$P_Z = k_{c1.1} \cdot a \cdot h^{(1-m_c)}, \quad (2)$$

где $k_{c1.1}$ – коэффициент, характеризующий величину силы резания, развиваемую на срез стружки с размерами сечения 1×1 мм; a – ширина стружки, мм; h – толщина стружки, мм; m_c – коэффициент, который учитывает изменение удельной силы резания в зависимости от толщины стружки h .

Отметим, что несмотря на значимость выражений типа (1) и (2), границы их применения на самом деле значительно сужены, и в первую очередь за счет использования для их получения эмпирических данных, соответствующих ограниченному условиям проведения опытов. Также немаловажным является вопрос о корректности входящих в них величин, например, входящий в выражение (2) коэффициент $k_{c1.1}$ не всегда точно определим и выбирается на основании справочных данных. Так, из справочных данных компании SECO [10], представленных на рис. 2, можно определить, что, например, для автомат-

ных сталей разница между верхним граничным значением величины R_m (прочность при растяжении) и нижним, составляет 43 %, если считать ее относительно максимального граничного значения. Это, в свою очередь, позволяет судить о расхождении остальных прочностных характеристик таких, как предел текучести на сжатие и

сдвиг, а ведь это – величины, которые, несомненно, влияют на величину силы резания, что даёт возможность судить о некоторой некорректности использования данного значения удельной силы резания для всех материалов этой группы.

Материал заготовок – Материалы групп SECO



Сталь

		R_m (N/mm ²)	$k_{c1.1}$ (N/mm ²)	m_c
1	Очень мягкие низкоуглеродистые стали. Чистые ферритные стали.	<450	1350	0,21
2	Автоматные стали.	400 <700	1500	0,22
3	Конструкционные стали. Обычные углеродистые стали с содержанием углерода от малого до среднего (<0,5%С).	450 <550	1500	0,25
4	Углеродистые стали с большим содержанием углерода (>0,5%С). Стали средней твердости для термоупрочнения. Обычные низколегированные стали. Ферритовые и мартенситные нержавеющие стали.	550 <700	1700	0,24
5	Трудные инструментальные стали. Высоколегированные стали с повышенной прочностью. Мартенситные нержавеющие стали.	700 <900	1900	0,24
6	инструментальные стали. Высоколегированные стали с повышенной прочностью. Мартенситные нержавеющие стали.	900 <1200	2000	0,24
7	Сложные высокопрочные и высокопрочные стали. Закаленные стали из групп 3–6. Мартенситные нержавеющие стали.	>1200	2900	0,22

Рис. 2. Справочные материалы SECO

Использование методов и инструментов имитационного моделирования для изучения механических процессов в зоне резания имеет ряд преимуществ: возможность получения динамической картины, решение задачи разрушения материалов, которая может быть реализована в трехмерной постановке. Данный подход к моделированию процессов механической обработки, основанный на методах конечных элементов, позволяет учитывать их нестационарные особенности (неравномерность припуска, деформации заготовки, врезания инструмента). Кроме того, с помощью имитационного моделирования могут быть получены некоторые вспомогательные данные (напряжения сдвига, угол наклона площадки сдвига стружки), которые могут использоваться для практических расчетов по имеющимся зависимостям. В большинстве же работ, посвященных этому вопросу, рассматривается процесс резания в установившемся режиме. Причиной такого упрощения процесса является сложность постановки и решения задач нелинейного разрушения с меняющимися граничными условиями. В зарубежных источниках [6-9] представлено математическое описание процесса резания на основе численного моделирования, позволяющее определить такие параметры зоны резания, как: деформации, напряжения и значения сил резания.

С целью проведения дальнейшего сравнительного анализа подходов, определения и уточнения величины силы резания был проведен имитационный эксперимент.

Для выполнения сравнительных расчетов с помощью представленных выше методик, а также для осуществления имитационного эксперимента были приняты следующие параметры: обрабатываемый материал – сталь 45 (зарубежный аналог – С45), глубина $t = 0,5$ мм, при изменении подачи f_z в пределах $0,1 \dots 0,3$ мм.

Трехмерная модель четырехзубой фрезы, представленной как твердое тело, и упруго-пластическая модель заготовки приведены на рисунке 3, а-в, расчет был проведен для изотермической задачи. С целью упрощения расчетов, форма режущей пластины принималась прямоугольной. Величина силы резания по выражению (2) определялась из условия, что $h = f_z$, а также с учетом того, что для принятой геометрии режущей пластины глубина резания $t = a$.

Графическое отображение результатов имитационного моделирования представлено на рисунке 3, г.

Результаты расчетов главной составляющей силы резания по методикам (1), (2) и полученные в результате эксперимента на имитационной конечно-элементной модели, а также расчет

критериев сравнительной оценки результатов сведены в таблицу 1.

Расхождение между полученными результатами оценивалось из выражения

$$k_{p_z} = \frac{|P_{z.calc} - P_{z.sim}|}{P_{z.sim}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $|P_{z.calc} - P_{z.sim}|$ – абсолютное расхождение между расчетным и экспериментальным значениями.

Расхождение между полученными результатами определялось относительно значения силы резания, вычисленного по результатам имитационного моделирования. Выбор данной величины в роли критерия оценки был обусловлен на основании анализа преимуществ и недостатков всех представленных выше подходов, результаты которого представлены в таблице 2.

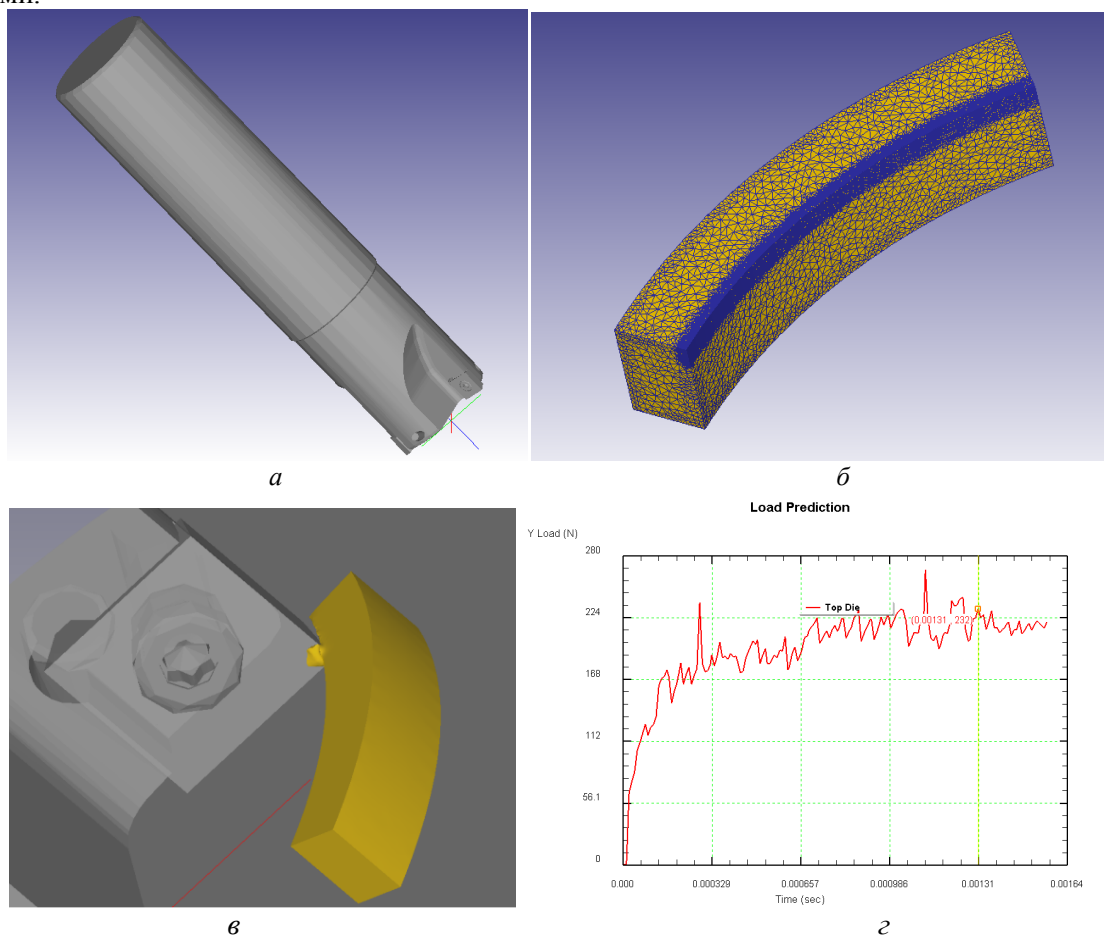


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования

Таблица 1

Сравнительные результаты

Механические свойства обрабатываемого материала и другие расчетные величины	Подача f_z , глубина резания t	Значение силы резания, кН, определенное по			Отклонение расчетных значений относительно результатов имитационного моделирования			
		(1)	(2)	имитационной модели	(1)		(2)	
					$ \Delta $	%	$ \Delta $	%
$\sigma_b = 720$ МПа $D = 30$ мм	$f_z = 0,1$ $t = 0,5$	111,8	152,9	213,9	102,1	47,8	61	28,5
	$f_z = 0,2$ $t = 0,5$	188	255,3	397,8	209,8	98,1	142,5	66,6
	$f_z = 0,3$ $t = 0,5$	254,8	344,6	533,8	279	130,4	189,2	88,4

Анализ основных подходов к описанию силового состояния зоны резания

Критерий	Метод описания		
	аналитический	эмпирический	имитационный
Точность	Высокая	Низкая	Высокая
Описание динамики процесса	Нет	Нет	Есть
Полнота описания процесса (количество параметров)	Высокая	Низкая	Высокая
Возможность учета случайных параметров	Нет	Нет	Есть
Наличие трудно определяемых промежуточных параметров	Есть	Нет	Нет
Универсальность	Низкая	Высокая	Высокая

Величина силы резания, полученная по результатам имитационного моделирования, оценивалась через выборочное среднее для установленного режима резания:

$$P_{z.sim} = \frac{\sum P_{z.sim.i}}{n} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $\sum P_{z.sim.i}$ – сумма значений величины силы резания по результату имитационного моделирования; n – объём выборки (n принят равным 10).

Сравнительный анализ расчетных данных показал заниженное значение результатов, полученных по аналитическим зависимостям по сравнению с результатами имитационного моделирования, при этом наименьшее расхождение было получено в сравнении с методикой, предложенной Кинцле, однако, даже в этом случае оно являлось достаточно большим.

Подводя итог, можно отметить, что имитационное моделирование процесса фрезерования с использованием программного пакета Deform 3 D позволило произвести оценку величины силы резания и сравнить эти результаты с основными существующими расчетными моделями. Представленные результаты имитационного эксперимента, с учетом его качественных преимуществ, могут быть использованы как для самостоятельного подхода в оценке силовых показателей процесса резания, так и для корректировки и уточнения существующих аналитических зависимостей.

Результаты, представленные в данной работе, показывают целесообразность дальнейшего изучения физико-механических процессов, протекающих в зоне резания, с целью получения более точных зависимостей или методик, позволяющих производить оценку силовых факторов в процессе высокопроизводительного фрезерования.

Источник финансирования. Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по технологии резания материалов: в 2 кн. Кн. 1. ред. нем. изд.: Г. Шпур, Т. Штеферле; пер. с нем. В.Ф. Котельникова и др.; под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 1985. 616 с.
2. Силин С.С. Метод подобия при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. С. 85–96.
3. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
4. Медрано Чульверт Вильфредо, Даниэль. Экспериментально-аналитическая модель зоны стружкообразования при резании металлов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Даниэль Медрано Чульверт Вильфредо; Рос.ун–т дружбы народов. Москва, 1997. 15 с.
5. Справочник технолога–машиностроителя: в 2-х т. Т.2. Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд., исправл. М.: Машиностроение – 1, 2003. 944 с.
6. Rajamani D., Tamilarasan A. Finite Element Machining Simulation of AISI6150 Steel // Engineering and Technology. International Journal of Innovative Research in Science. 2015. Vol. 4, Issue 8. Pp. 7959–7956.
7. Ковальчук Д.П. Моделювання процесу різання методом кінцевих елементів в середовищі DEFORM 3D [Электронный ресурс] // АРТЕХ инжиниринговая компания – 2012. № 4. Режим доступа: <http://www.artech-eng.ru/index.php/.html>
8. Biswajit Das, Susmita Roy, Rai R.N., Saha S.C. Studies on Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness of Al–Cu–TiC MMCs: An Artificial Neural Network Approach // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 45. Pp. 745–752.
9. Gök K., Gök A., Bilgin M.B. Finite Element Modeling as Three Dimensional of Effect of Cutting Speed in Turning Process // Journal of Engineering and Fundamentals. 2014. №1(1). Pp. 11–22.

10. Таблицы соответствия материалов по ГОСТ материалам стандартов DIN И AISI их принадлежность к группам материалов по классификации SECO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://instrumentinvest.com/2012/%D0%B3%D1%](http://instrumentinvest.com/2012/%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BF%D0%BF%D1%8B%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2%20seco.pdf)

[80%D1%83%D0%BF%D0%BF%D1%8B%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2%20seco.pdf](http://instrumentinvest.com/2012/%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BF%D0%BF%D1%8B%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2%20seco.pdf). – (дата обращения: 18.04.17).

Информация об авторах

Бондаренко Иван Русланович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов.

E-mail: ivanbond85@rambler.ru.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гринёк Анна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации.

E-mail: grinyokann@gmail.com.

Государственный морской университет им. Ф.Ф. Ушакова.

Россия, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, д. 93.

Ковалев Леонид Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов.

E-mail: lkovalev55@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в марте 2018 г.

© Бондаренко И.Р., Гринёк А.В., Ковалев Л.А., 2018

I.R. Bondarenko, A.V. Grinyok, L.A. Kovalev
IMITATIVE SIMULATION AS AN EFFECTIVE MEANS OF INVESTIGATION OF POWER CUTTING CHARACTERISTICS AT HIGH-PERFORMANCE MILLING

The use of modern software products used to model various technological processes allows to achieve significant savings in time and material costs at various stages of production, and also allows to predict the behavior of the main operating indicators of technological systems during their operation.

In this paper, based on simulation modeling, an approach is presented to the study of the power parameters of the cutting process during milling, produced in the range of high tool feeds. Significant values of this technological parameter make the choice of the design model of power indicators relevant.

For this purpose, a brief review of some analytical computational relationships (computational models) that have comparative simplicity and found application in determining the cutting force in engineering and production practice was conducted. The shortcomings in them are considered, which lie in the narrowing of the boundaries of their application, due to the use of experimental data in their preparation, which correspond to strictly defined experimental conditions. The advantages of simulation modeling in the study of mechanical processes in the cutting zone are noted, among which: the ability to take into account the dynamic characteristics of the process, the solution of the complex problem of deformation and the subsequent destruction of the material, which can be represented in a spatial setting. Subsequently, a comparative calculation of the values of the cutting forces obtained from the calculation models and the results of simulation modeling was carried out. Based on the analysis of the obtained data, as well as the advantages and disadvantages of the presented approaches, the possibility of applicability of the simulation simulation method in determining the power characteristics of the cutting process in high-performance milling is evaluated.

Keywords: *simulation simulation, simulation experiment, high-performance milling, high feed rates, design models, cutting force.*

REFERENCES

1. Shpur G., Steferle T. Handbook on the technology of cutting materials: in 2 books. Book 1. Moscow: Mechanical Engineering, 1985, 616 p.

2. Silin S.S. The similarity method for metal cutting. M.: Mechanical Engineering, 1979, pp. 85–96.

3. Reznikov A.N. Thermophysics of Machining Processes. Moscow: Mechanical Engineering, 1981, 279 p.

4. Medrano Chulverte Wilfredo, Daniel. Experimental-analytical model of the zone of chip formation during metal cutting: author's abstract. dis. ... cand. tech. Sciences: 05.03.01. Russian university of peoples friendship. Moscow, 1997, 15 p.

5. Dalsky A.M., Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K. Handbook of the technologist-machine builder: in 2 vol. vol. 2. 5-e izd. Moscow: Mechanical Engineering - 1, 2003, 944 p.

6. Rajamani D., Tamilarasan A. Finite Element Machining Simulation of AISI6150 Steel. Engineering and Technology. International Journal of Innovative Research in Science, 2015, vol. 4, issue 8, pp. 7959-7966.

7. Kovalchuk D.P. Modelyuvannya process rizannya method kintsevih elements in the middle of DEFORM 3D [Electronic resource]. APTEX inzhiringovaya company, 2012, no. 4. Available at: <http://www.artech-eng.ru/index.php/.html> (accessed 17.03.2018).

8. Biswajit Das, Susmita Roy, Rai R.N., Saha S.C. Studies on the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness of Al-Cu-TiC MMCs: An Artificial Neural Network Approach. Procedia Computer Science, 2015, vol.45, pp. 745–752.

9. Gök K., Gök A., Bilgin M.B. Finite Element Modeling as Three Dimensional of Effect of Cutting Speed in Turning Process. Journal of Engineering and Fundamentals, 2014, no.1, pp. 11–22.

10. Tables of conformity of materials in accordance with GOST standards materials DIN AND AISI their belonging to material groups according to SECO classification. Retrieved April 18, 2017, from

<http://instrumentinvest.com/2012/%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BF%D0%BF%D1%8B%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2%20seco.pdf>.

Information about the author

Ivan R. Bondarenko, PhD, Senior lecturer.

E-mail: ivanbond85@rambler.ru.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Anna V. Grinyok, PhD, Assistant professor.

E-mail: grinyokann@gmail.com.

The State Maritime University. F.F. Ushakov.
Russia, 353918, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93.

Leonid A. Kovalev, PhD, Assistant professor.

E-mail: lkovalev55@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Received in March 2018