

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127

**\*Кхалифа М., Дуюн Т.А.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46**\*E-mail: kh.mon@yandex.ru*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО ПАКЕТА ANSYSWorkbench

**Аннотация.** Представлена методика моделирования процесса резания при точении конструкционной стали (сталь 45). Для моделирования использован конечно-элементный пакет ANSYS Workbench, задача решалась в трехмерной постановке. Для моделирования пластической деформации и разрушения материала использована модель Джонсона-Кука, позволяющая учесть кинематическое упрочнение и адиабатический разогрев деформируемого материала. В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку. Имитировалось сводное резание, величина подачи инструмента учитывалась за счет ширины среза. В результате моделирования получены поля напряжений и деформаций обрабатываемого материала и инструмента, а также тепловое поле стружки и обрабатываемого изделия. Полученные результаты хорошо согласуются с известными в литературе экспериментальными данными, а также не противоречат традиционным положениям теории резания. Предложенная методика моделирования позволяет исследовать напряженно-деформированное и тепловое состояние процесса резания, условия стружкообразования, прогнозировать параметры качества поверхностного слоя.

**Ключевые слова:** моделирование процесса резания, численные методы, метод конечных элементов, модель Джонсона–Кука.

**Введение.** Применение пакетов прикладных программ, реализующих метод конечных элементов, с целью моделирования процессов резания и деформирования приобретает в последнее время все большую популярность [1–11]. Это объясняется высоким быстродействием современных компьютеров и широкими возможностями таких программ как ANSYS, ABAQUS, Deform 3D, позволяющих не только моделировать сложный процесс резания с высокой степенью достоверности, но и визуализировать его в реальном времени [1, 2]. Компьютерное моделирование существенно экономичнее дорогостоящих экспериментальных исследований и позволяет получать ряд параметров процесса резания, недоступных для прямого измерения: тепловое поле в инструменте и заготовке, поля напряжений и деформаций. Таким образом, моделирование может быть использовано для управления процессом резания: обеспечения параметров качества изделия, например, остаточных напряжений поверхностного слоя, прогнозирования условий формирования стружки и износа инструмента, определения температурно-силовых характеристик [3, 4].

Целью настоящей работы являлась разработка методики моделирования процесса резания с использованием программы ANSYSWorkbench для возможности дальнейшего исследования силовых и тепловых процессов резания, а также

формирования параметров качества обрабатываемой поверхности в различных технологических условиях обработки.

**Основная часть.** Адекватное моделирование резания металла является сложной многокомпонентной задачей, так как резание сопровождается взаимосвязанным протеканием ряда физических и химических процессов: упругопластическое деформирование и разрушение материала, тепловыделение, структурные и фазовые превращения. Сложность состоит также в том, что указанные процессы взаимно обуславливают друг друга: интенсивность тепловыделения зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, которые в свою очередь претерпевают изменения под действием температуры; одновременное воздействие температуры и деформаций вызывает структурные и фазовые изменения материала, что также определяет физико-механические характеристики [5, 6].

В процессе стружкообразования можно выделить две основные зоны сдвига: сдвиг, характеризующий непосредственно резание, то есть превращение срезаемого слоя в стружку, а также вторичная зона сдвига, так называемый заторможенный слой, то есть зона контакта стружки и инструмента (рис. 1) [7].

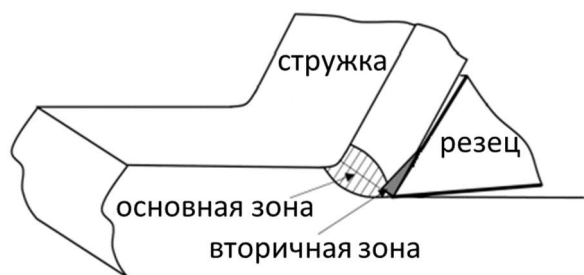


Рис. 1. Схема формирования зон сдвига при резании

Зона сдвига формируется в результате пластических деформаций металла снимаемого припуска и поверхностного слоя под влиянием температуры и деформации. Как отмечалось выше процесс стружкообразования обусловлен физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, однако условия протекания этого процесса в свою очередь изменяют механические параметры. Скорость деформаций оказывает существенное влияние на предел текучести, кроме того при высоких скоростях деформаций происходит явление адиабатического разогрева

метала в зоне наибольших деформаций и, соответственно, его локальное разупрочнение [8]. На рис. 2 представлены диаграммы испытаний на растяжение стали 45 в координатах истинное напряжение–истинная деформация при разных температурах и скоростях деформации. Величина напряжений при пластической деформации материала формируется при одновременном действии двух процессов: процесса упрочнения, повышающего напряжение, и процесса отжига, снимающего упрочнение и, следовательно, понижающего напряжение. При увеличении температуры отдых материала протекает более интенсивно, поэтому повышение температуры снижает напряжение деформации. Скорость деформации существенно влияет на процесс отжига материала, он проявляется более полно при низких скоростях деформации, повышение скорости деформации приводит к увеличению напряжения. Таким образом, при высоких температурах и меньших скоростях деформации отдых материала протекает настолько интенсивно, что компенсирует его упрочнение [9].

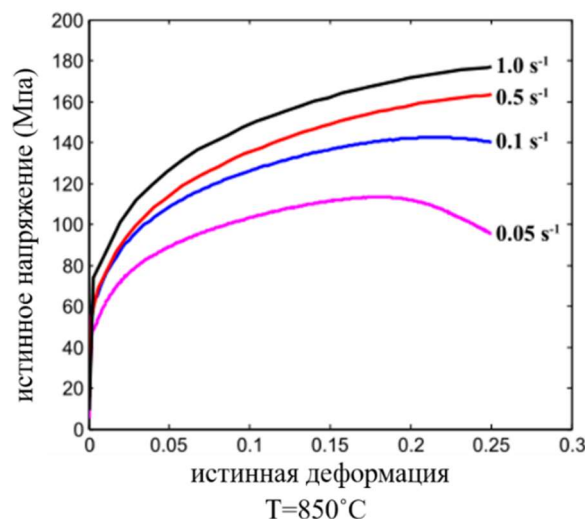
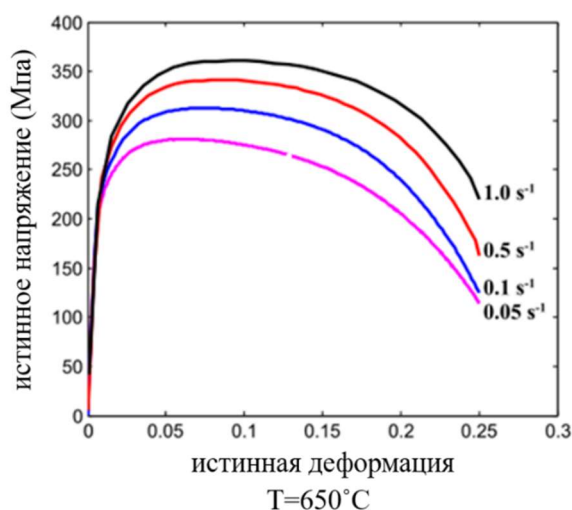


Рис. 2. Диаграммы испытаний на растяжение стали 45 при разных температурах и скоростях деформации

Одной из наиболее известных моделей, описывающих поведение металла при пластических деформациях, является модель Джонсона-Кука в форме уравнения состояния Ми-Грюнайзена [10]. Данная модель учитывает, как кинематическое упрочнение, так и адиабатический разогрев деформируемого материала в виде зависимости напряжения от скорости деформирования и температуры. В этой модели, эквивалентное пластическое напряжение определяется выражением:

$$\sigma = (A + B \cdot \bar{\epsilon}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \cdot \dot{\epsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}, \quad T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad (2)$$

где  $A$  – предел текучести при медленном нагружении;  $B$  – изотропное (статическое) упрочнение, характеризующее чувствительность к деформации;  $\bar{\epsilon}$  – эквивалентная пластическая деформация;  $n$  – коэффициент, представляющий эффект упрочнения;  $C$  – коэффициент чувствительности к скорости деформации;  $\dot{\epsilon}$  – скорость пластической деформации;  $\dot{\epsilon}_0$  – скорость деформации при статических испытаниях;  $T_0, T_m$  – температура окружающей среды и температура плавления материала соответственно;  $m$  – показатель степени, учитывающий явление термического разупрочнения материала.

В уравнении (1) первый множитель описывает явление наклепа, второй – динамическое упрочнение, третий – явление термического разупрочнения.

Для моделирования отделения стружки от обрабатываемой поверхности в качестве критерия разрушения материала использована сопряженная модель Джонсона-Кука, которая описывает историю повреждения каждого элемента на основе кумулятивного закона накопления поврежденности  $D$ :

$$\varepsilon_f = \left( D_1 + D_2 \cdot \exp\left(D_3 \cdot \frac{p}{q}\right) \right) \cdot \left( 1 + D_4 \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \cdot \left( 1 + D_5 \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \quad (4)$$

где  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  – параметры разрушения материала;  $p$  – гидростатическое давление;  $q$  – напряжение Мизеса.

Деформация разрушения зависит от эффективной скорости деформации  $\dot{\varepsilon}^*$ , коэффициента жесткости напряженного состояния, определяемого отношением гидростатического давления к напряжению Мизеса, и температуры.

Параметры материала  $D_1, D_2, D_3$  характеризуют отношение гидростатического давления, или среднего напряжения, к эквивалентному напряжению Мизеса, параметр  $D_4$  учитывает влияние скорости деформации на разрушение, параметр  $D_5$  определяет влияние температуры на деформацию при разрушении.

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\varepsilon_f}, \quad (3)$$

где  $\Delta \bar{\varepsilon}$  – инкремент эффективной пластической деформации во время цикла интегрирования;

$\varepsilon_f$  – эквивалентная деформация разрушения при текущих условиях температуры деформации, давления и эквивалентного напряжения. Разрушение происходит, если параметр повреждения  $D$  превышает значение единицы  $D \geq 1$ .

Процесс деформации разрушения определяется соотношением:

Для реализации моделирования процесса резания был использован программный пакет ANSYS, его приложение Workbench содержит модель Джонсона-Кука и позволяет моделировать сложное поведение материала при динамическом нагружении. Для определения параметров модели Джонсона-Кука и критериев разрушения необходимо иметь экспериментальные данные о динамических свойствах исследуемого материала. В данной работе для исследования была принята сталь 45, инструментальный материал – твердый сплав. Физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала представлены в табл. 1, параметры модели Джонсона-Кука – в табл. 2, 3 [11].

Таблица 1

#### Физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C)	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°C
Сталь 45	7850	$2 \cdot 10^{11}$	0,29	486	52
Твердый сплав	14500	$560 \cdot 10^{11}$	0,22	220	34

Таблица 2

#### Параметры модели Джонсона-Кука для стали 45, характеризующие условия пластического деформирования

$A$ , Па	$B$ , Па	$n$	$C$	$m$	$\dot{\varepsilon}_0$	$T_m$ , °C	$T_0$ , °C
$616 \cdot 10^6$	$668 \cdot 10^6$	0,225	0,0134	1,078	1	1350	22

Таблица 3

#### Параметры модели Джонсона-Кука для стали 45, характеризующие условия разрушения

$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
0,04	1,03	1,39	0,002	0,46

Расчетная схема имитационной модели процесса резания представлена на рис. 3. Модель состоит из трех основных компонентов: 1 – режущий инструмент с геометрическими параметрами режущей части: передний угол  $\gamma = 5^\circ$ , задний угол  $\alpha = 10^\circ$ ; 2 – обрабатываемая поверхность, поверхностный слой, подлежащий удалению со стружкой; 3 – основная часть заготовки. Задача решалась в трехмерной постановке со следующими режимами резания: скорость резания  $v = 300$  м/мин, глубина резания  $a = 0,1$  мм, подача  $s = 0,05$  мм. Имитировалось сводное резание, величина подачи учитывалась за счет ширины среза. В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку.

При моделировании условий трения на площадках контакта «стружка–инструмент», «инструмент–заготовка» использовалась модель на основе закона Кулона-Амонтона:

$$F = \mu \cdot N, \tag{5}$$

где  $\mu$  – коэффициент кулоновского трения;  $N$  – сила нормальной реакции. Коэффициент трения на основе анализа литературных источников принят равным  $\mu=0,22$ .

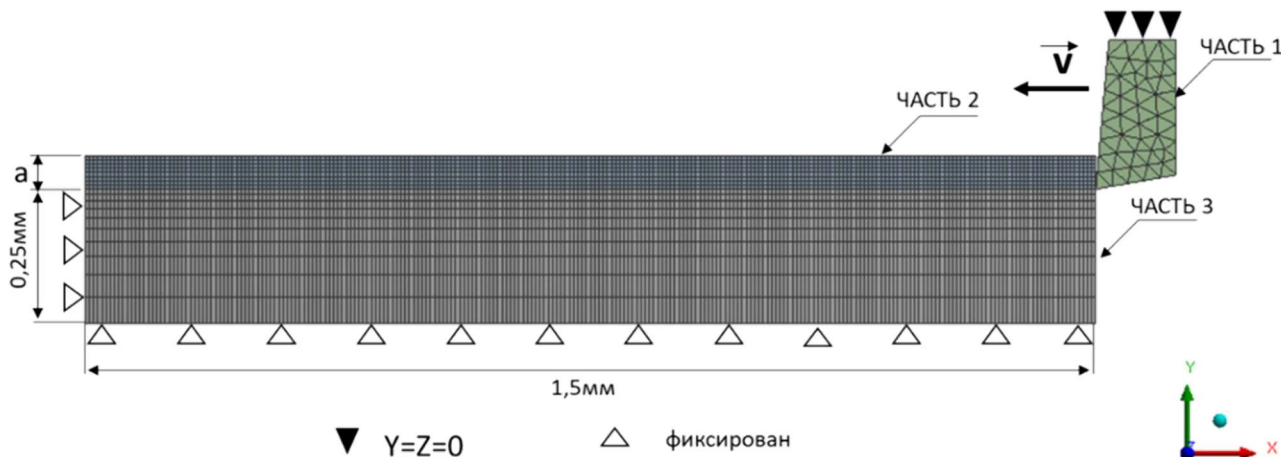


Рис. 3. Расчетная схема имитационной модели процесса резания

В процессе моделирования были получены следующие результаты: эквивалентное напряжение Мизеса (рис. 4), поле пластических деформаций в заготовке и инструменте (рис. 5) и тепловое поле в заготовке (рис. 6). Анализируя рис. 4, можно заметить, что максимальная величина напряжений концентрируется в узкой части, называемой плоскостью сдвига, эти результаты имеют хорошее совпадение с известными аналитическими моделями стружкообразования. На рис. 5 представлено поле пластических деформаций, также можно отметить, что максимальные значения деформации концентрируются в среза-

емом слое и стружке, при этом резец не деформируется, отчетливо просматриваются сегменты стружки, зона стружкообразования, переходной и заторможенный слой.

Рассмотрим тепловое поле рис.6, максимальную температуру  $366^\circ\text{C}$  имеет зона резания вблизи плоскости сдвига, тепловое поле сконцентрировано с узкой области, большая часть теплоты резания уносится со стружкой. При моделировании учитывался только тепловой поток, относящиеся к деформации материала без учета теплового потока от трения, поэтому экспериментальные данные имеют значения более высоких температур.

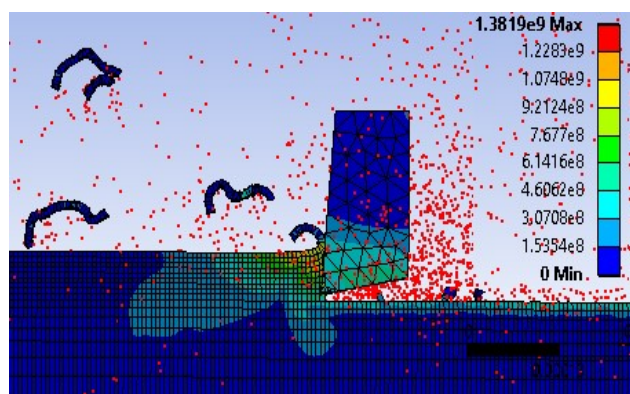


Рис. 4. Эквивалентное напряжение Мизеса

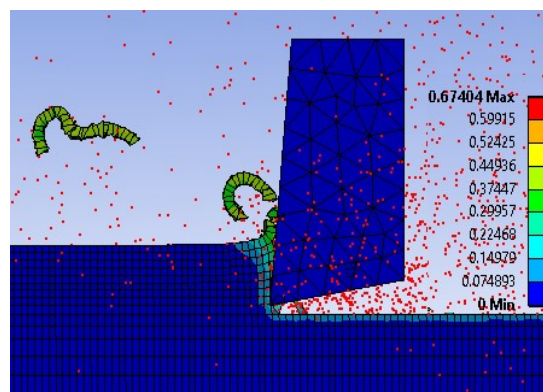


Рис. 5. Значения пластической деформации



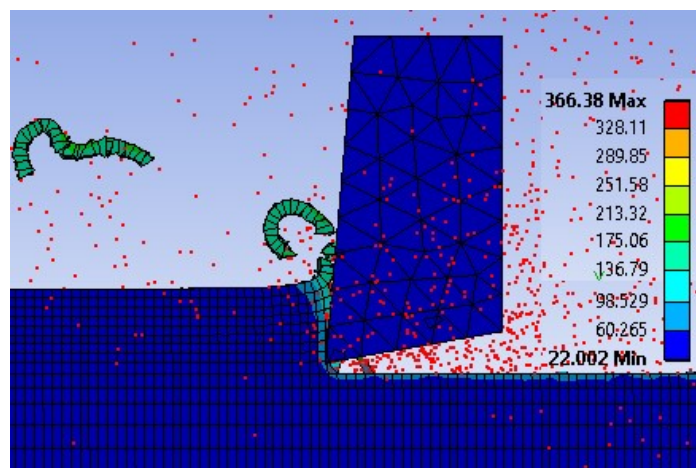


Рис. 6. Тепловое поле стружки, обрабатываемой поверхности и заготовки

**Выводы.** Моделирование процесса резания металла с применением программы Ansys Workbench и использование модели Джонсона-Кука для отображения пластической деформации и разрушения материала позволяет получить поля напряжений и деформаций обрабатываемого материала и инструмента, тепловое поле стружки и обрабатываемого изделия. Полученные результаты хорошо согласуются с известными в литературе данными, полученными экспериментально, а также не противоречат традиционным положениям теории резания. Предложенная методика моделирования позволяет исследовать напряженно-деформированное и тепловое состояние процесса резания, условия стружкообразования, прогнозировать параметры качества поверхностного слоя. Дальнейшее совершенствование методики моделирования будет направлено на проработку различных технологических условий резания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корендясев Г.К. О Конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов резанием (часть 1) // Вестник научно-технического развития. 2015. № 2. С. 14–24.
2. Корендясев Г.К. О Конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов резанием (часть 2) // Вестник научно-технического развития. 2015. № 3. С. 14–24.
3. Дуюн Т.А., Гринек А.В. Математическое моделирование процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на основе нейросетевых и нечетких моделей // Труды международной конфе-

ренции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении», Севастополь – 2016. №3. С. 28–33.

4. Öpöz T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation // Journal of Mechanical Engineering. 2016. №1. Pp. 11.

5. Ozel T. The Influence of friction models on finite element simulations of machining // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. №1. Pp. 518–530.

6. Kushner V., Storchak M. Modelling the material resistance to cutting // International Journal of Mechanical Sciences. 2017. №1. Pp. 44–54.

7. Bhoyar Y.R., Kamble P.D. Finite element analysis on temperature distribution of turning process // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2013. №1. Pp. 541–546.

8. Соболев А.В., Радченко М.В. Использование модели пластичности Джонсона-Кука в численном моделировании бросковых испытательных контейнеров для транспортирования оят // Ядерная энергетика. № 3. 2016. С. 188–195.

9. Murugesan M., Jung D.W. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applicatio // journal of materials. №1. 2019. Pp. 18.

10. Бузюркин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И. Определение параметров модели Джонсона-Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. Т. 56. № 2. 2015. С. 82–93.

11. Wang K. Calibration of the Johnson-cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process. 2016. Pp. 44–50.

*Информация об авторах*

**Кхалифа Мона**, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: kh.mona@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Дуюн Татьяна Александровна**, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в шоле 2019 г.

© Кхалифа М., Дуюн Т.А. 2019

**\*Khalifa M., Dujun T.A.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova*

*Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

*\*E-mail: kh.mona@yandex.ru*

## FINITE ELEMENT MODELING OF THE CUTTING PROCESS DURING MACHINING OF STRUCTURAL STEEL USING ANSYS WORKBENCH

**Abstract.** *The technique of modeling the cutting process when sharpening structural steel (steel 45) is presented. The 3D finite element simulations of machining are conducted using commercial code ANSYS Workbench. For the simulation of plastic deformation and failure of the materials, a Johnson-Cook model is used as constitutive equation to describe behavior of material during cutting process. This model takes into account the effects of the kinematic hardening and adiabatic heating of the deformable material. To model separation of chip from the workpiece, the Johnson–Cook (J–C) damage criterion is used. In the suggested model, the value of feed is taken into account as the width of the strip of the workpiece for modeling workpiece. As a result of modeling, the stress and strain fields for both the workpiece and the tool are presented, as well as the thermal field of the chip and the machined piece. The results are compared and evaluated with the experimental results; they are similar and do not contradict the traditional theory of the metal cutting. The proposed method of modeling allows to study the stress-strain state and thermal distributions of the cutting process, chip formation conditions and prediction of the quality of finished surface.*

**Keywords:** *modeling of the cutting process, numerical methods, finite element method, Johnson-Cook Model.*

### REFERENCES

1. Korendyasev G.K. Finite element modeling of the metal cutting process (part 1) [O Konechno-elementnom modelirovanii protsessa obrabotki metallov rezaniyem (chast' 1)]. Bulletin of scientific and technical development. 2015. No. 2. Pp. 14–24. (rus)
2. Korendyasev G.K. Finite element modeling of the metal cutting process (part 2) [O Konechno-elementnom modelirovanii protsessa obrabotki metallov rezaniyem (chast' 2)]. Bulletin of scientific and technical development. 2015. No. 3. Pp. 14–24. (rus)
3. Dujun T.A., Grinek A.V. Mathematical modeling of machining processes as a means of controlling technological parameters based on neural network and fuzzy models [Matematicheskoye modelirovaniye protsessov mekhanicheskoy obrabotki kak sredstvo upravleniya tekhnologicheskimi parametrami na osnove neyrosetevykh i nechetkikh modeley]. Jobs of the international conference «modern direction and prospects for the development of technologies of processing and equipment in mechanical engineering», Sevastopol. 2016. No. 3. Pp. 28–33. (rus)
4. Öpöz T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation // Journal of Mechanical Engineering. 2016. No. 1. Pp. 11.
5. Ozel T. The influence of friction models on finite element simulations of machining // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. Pp. 518–530.
6. Kushner V., Storchak M. Modelling the material resistance to cutting // International Journal of Mechanical Sciences. 2017. No. 1. Pp. 44–54.
7. Bhojar Y.R., Kamble P.D. Finite element analysis on temperature distribution of turning process // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2013. No. 1. Pp. 541–546.
8. Sobolev A.V., Radchenko M.V. Use of Johnson–Cook plasticity model for numerical simulations of throwing tests of containers for transporting OAT [Ispol'zovaniye modeli plastichnosti Dzhonsona-Kuka v chislenom modelirovanii broskovykh ispytaniy konteynerov dlya transportirovaniya oyat]. Nuclear energy. 2016. No. 3. Pp. 188–195. (rus)
9. Murugesan M., Jung D.W. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming application // Journal of materials. 2019. No. 1. Pp. 18.

10. Buzyurkin A.E., Gladky I.L., Kraus E.I. Determination of parameters of the Johnson-Cook model for the description of deformation and fracture of titanium alloys [Opredeleniye parametrov modeli Dzhonsona-Kuka dlya opisaniya protsessov deform-

irovaniya i razrusheniya titanovykh splavov]. Applied Mechanics and Technical Physics. 2015. Vol. 56. No. 2. Pp. 82–93. (rus)

11. Wang K. Calibration of the Johnson-cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process. 2016. Pp. 44–50.

*Information about the authors*

**Khalifa Mona**, Graduate student. E-mail: kh.mona@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Duyun, Tatyana A.** DSc, Professor. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in July 2019*

**Для цитирования:**

Кхалифа М., Дуюн Т.А. Моделирование процесса резания конструкционной стали с использованием конечноэлементного пакета ANSYSWorkbench // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 121–127. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127

**For citation:**

Khalifa M, Dujun T.A. Finite element modeling of the cutting process during machining of structural steel using ansys workbench. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 121–127. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127