

УДК 621.91: 621.793: 004.942

А. Г. НАРЫЖНЫЙ, Ю. Н. КУЦЕНКО, М. В. ГРОМ, Д. Р. СТЕПАНЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ РЕЗЦОМ С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ

Статья посвящена созданию термомеханической модели резания резцом с износостойким покрытием с целью удешевления процесса внедрения новых образцов высокотехнологического инструмента. Рассматриваемая задача относится к классу многокритериальных задач параметрической оптимизации. Для решения поставленной задачи предложено использовать метод Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE). Применение этого метода позволяет избежать трудностей, возникающих в результате создания новых поверхностей, что трудновыполнимо при применении метода конечных элементов. Создана механическая модель резания резцом с покрытием, проведен анализ адекватности поведения модели.

Ключевые слова: процесс резания, резец с износостойким покрытием, математическая модель, метод ALE.

Введение

Сегодня на машиностроительных предприятиях остро стоит вопрос повышения производительности труда в таких трудоемких процессах как механообработка, сборочные операции и др. Одним из направлений совершенствования процесса механообработки, является внедрение современного режущего инструмента (РИ) с износостойким покрытием (далее РИ с покрытием). Увеличение эксплуатационных характеристик РИ позволяет сократить вспомогательное время (частота замены инструмента), а также уменьшить основное время (путем повышения параметров режима резания).

Внедрение в производство РИ с покрытием предполагает ряд мероприятий не только создания дорогостоящих лабораторий с квалифицированным персоналом для разработки новых покрытий, но и проверки экспериментального или теоретического поведения РИ с различными материалами заготовок.

Методы экспериментального исследования хорошо освещены в трудах Г. И. Костюка, например, в монографии [1] приводятся методы экспериментального исследования процесса резания.

Но экспериментальное исследование характеристик РИ с покрытием задача дорогостоящая, из-за высокой цены очищенного материала покрытия, дороговизны технологии нанесения покрытия, а также сложная, так как толщина покрытия может находиться в пределах от 5 до 10 мкм. [2].

В связи с вышесказанным, актуальной является задача теоретического исследования характеристик РИ с покрытием, наличие большой теоретической и эмпирической базы данных о процессе резания, а также использование современной вычислительной

техники дает возможность построения численной модели процесса резания РИ с покрытием.

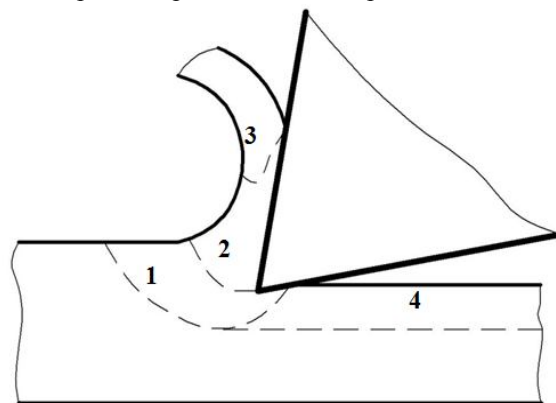


Рис. 1. Упрощенная схема стружкообразования:
1 – зона упругих и малых пластических деформаций;
2 – зона наибольшей интенсивности деформации;
3 – отформированный материал, образующий стружку; 4 – поверхностный слой обработанной детали

Так как РИ в процессе эксплуатации подвергается различным механическим, термическим и другим видам нагружения, которые в свою очередь приводят к протеканию процессов связанных со структурными преобразованиями [3-5], то это усложняет процесс создания численной модели.

Вследствие действия РИ на материал заготовки в последней можно выделить несколько зон. Первая зона характерна большими упругими и малыми пластическими деформациями, напряжения приближаются к пределу текучести. Зона предшествует «разрыву» материала и образованию новой поверхности. Вторая зона характерна высокими температурами, в результате трения отделяемого материала о перед-

ную поверхность РИ, сопровождающееся высокими скоростями деформации и высокой пластической деформацией [1, 6-7]. Третья – собственно стружка, скорость деформации близка нулю, а величина пластической деформации достигает максимального значения. Поверхностный слой обработанной детали – зона четыре, характерна высокими пластическими деформациями и температурой, вследствие больших скоростей деформации в процессе ее образования и трения о заднюю поверхность РИ [1].

Процесс теплообмена, в теле резца и детали имеет кондуктивный характер, часть тепла (и работы деформации) уносится вместе со стружкой, еще часть – с охлаждающей жидкостью, которая влияет также на характер контактного взаимодействия [8].

Изменение температуры детали и резца приводит к тепловым деформациям и напряжениям, изменению механических и тепловых свойств и параметров материалов, а также совместно с напряжениями к структурно-фазовым превращениям, в частности, влияющим на период стойкости резца в процессе резания [6].

На образование и характер (качество) поверхности влияет как этап нагружения, который имеет немонотонный упруго-пластический характер, равно как и этап разгрузки, имеющий упругий характер [9-10]. В теле детали образуются поля остаточных напряжений и деформаций, которые могут приводить к вторичным деформациям (короблению) особенно в деталях малой жесткости.

Также можно выделить влияние специальных подготовительных мер на состояние, как детали, так и резца, в результате которых элементы технологической системы приобретают специальные свойства. Деталь обычно проходит термическую подготовку для снятия и выравнивания напряжений и уменьшения сопротивления резанию. Резец также претерпевает структурно-фазовые и механические изменения под действием термо-химических и иных технологических воздействий, которые приводят к изменению характеристик РИ [1, 11].

Важным направлением технологии изготовления резцов является нанесение упрочняющих покрытий, в результате которого на режущей поверхности резца образуется слой, обладающий специальными свойствами, которые увеличивают его стойкость к различным видам износов [1, 11]. За счет внедрения частиц в матрицу основного материала возникает поверхностное поле остаточных напряжений, которое влияет на температуро- и износостойкость, а также на другие процессы.

Теоретическое исследование процесса резания реализуется математическим моделированием с применением модели ортогонального резания мате-

риала [10, 12-15]. Это обусловлено простотой данной модели, возможностью перехода к двумерной задаче, что значительно сокращает вычислительную трудоемкость расчета.

Метод конечных элементов (МКЭ) может рассматриваться как удовлетворительный подход для изучения процессов резания, позволяющий понизить стоимость исследования. Он дает информацию о некоторых трудноизмеримых (в эксперименте) параметрах, таких как температура, энергия, напряжения и таким образом является приемлемым инструментом исследователя [12].

Но при построении модели, для решения динамических задач, базирующейся на МКЭ следует учитывать возможность превышения допустимой величины искажения расчетной сетки, что может привести к неправильным результатам [10, 14].

В статье авторов В. С. Кривцова, А. Г. Нарыжного [4] выделен метод Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) с помощью которого получена математическая модель процесса резания, дающая хорошее соответствие с результатами эксперимента. Также рассмотрено трехмерное моделирование течения в рамках подхода ALE. Использована упруго-пластическая модель материала Джонсона-Кука со скоростным упрочнением и температурным влиянием. Анализируются нагрузки на инструмент, температуры и напряжения в пластинке. Отмечено хорошее соответствие экспериментальным данным.

В литературе практически не освещены особенности термомеханических процессов резания с использованием резцов с покрытием.

Методы позволяющие моделировать процесс резания, реализуемы в прикладных пакетах: LS DYNA, ABAQUS-Explicit, AdventEdge, ANSYS, ABAQUS-Implicit, MSC Marc и другие [12].

Постановка задачи

Целью работы является создание модели процесса резания РИ с износостойким покрытием, что позволит удешевить процесс внедрения высокотехнологичного инструмента в производство. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать и описать нестационарной объемной математической моделью комплекс термомеханических процессов, сопровождающих процесс образования стружки в технологической системе, включающей деталь и резец с покрытием;

- выбрать метод численного решения системы определяющих выражений модели;

- проанализировать адекватность и точность предложенной методики.

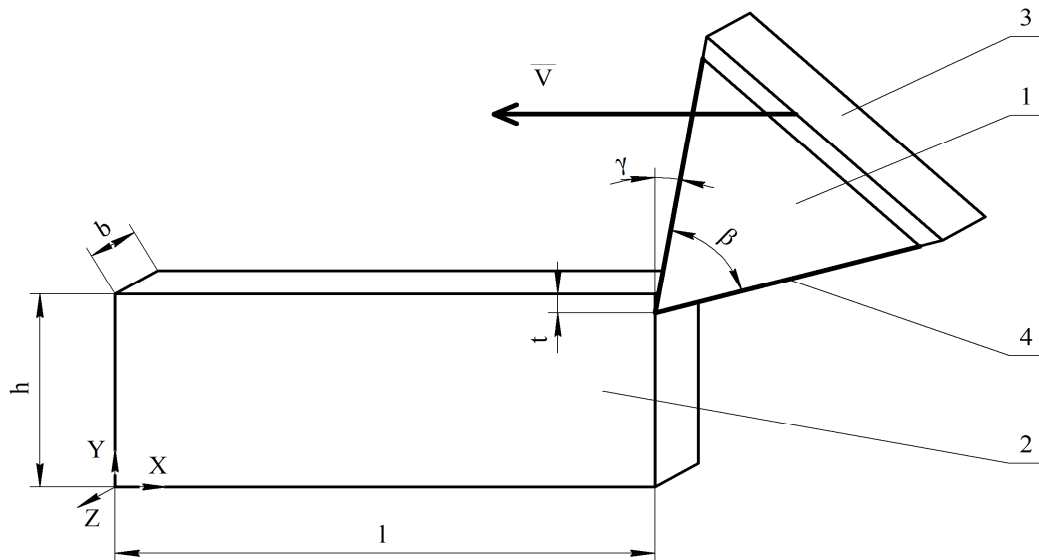


Рис. 2. Общий вид образца и РИ

Новизна исследования в применении метода ALE для моделирования процесса резания РИ с покрытием. В модели роль покрытия играет тонкая оболочка, свойства которой отличны от свойств инструмента.

На рисунке 2 представлена геометрическая модель резания. РИ 1 представлен в форме клина с передним углом γ и углом заострения β . Заготовка 2 имеет форму параллелепипеда с длиной l , шириной b и высотой h . На режущий инструмент нанесена оболочка 4 с отличными от РИ характеристиками материала по передней и задней поверхностям. Моделирование процесса резания осуществляется на глубину резания t . К режущему инструменту прикреплена абсолютно жесткая пластина 3, которая передает кинематическое возмущение РИ V вдоль оси OX . Модель является трехмерной, но решает двухмерную задачу, за счет ограничения перемещения вдоль оси OZ . Также введено ограничение РИ вдоль оси OY , а заготовка в левом торце и основании ограничена по осям OX , OY и OZ .

В модели используются три системы отсчета [16]:

- материальная (лагранжева) X ;
- вспомогательная, движущаяся по заданному закону, \tilde{x} ;
- неподвижная (эйлерова) x .

Относительная скорость точки в подвижной вспомогательной системе отсчета обозначена

$$c = v - \tilde{v}, \quad (1)$$

где v – материальная скорость точки, \tilde{v} – скорость места материальной точки во вспомогательной системе.

Определяющие уравнения механики сплошных сред:

- уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t \tilde{x}} + \nabla_x \cdot c + \rho \operatorname{div}_x v = 0; \quad (2)$$

– уравнение сохранения количества движения

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t \tilde{x}} + \rho \nabla_x v \cdot c + \operatorname{div}_x \sigma - \rho b = 0; \quad (3)$$

– уравнение сохранения внутренней энергии

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t \tilde{x}} + \rho \nabla_x e \cdot c + \operatorname{div}_x q - r - \nabla_x v \cdot \sigma = 0, \quad (4)$$

где ρ – плотность, t – время, ∇ – оператор Гамильтона «набла», div – оператор дивергенции, σ – тензор напряжений Коши, ρb – объемная плотность сил, e – плотность внутренней энергии, r – плотность источников тепла, $\nabla_x v \cdot \sigma$ – двойное скалярное произведение тензора скорости деформаций и тензора напряжений, представляет мощность работы напряжений, q – поток тепла.

$$q = \lambda \nabla_x T, \quad (5)$$

где λ – теплопроводность материала, T – температура.

Особенностью применения модели является чередование этапов решения на лагранжевых сетках, сохранении результатов на вспомогательной сетке (адвекция) и построения новых лагранжевых сеток, отражающих актуальные конфигурации элементов системы.

Особенностью задачи теплообмена при моделировании процесса резания с образованием стружки является зависимость термического контакта от механических процессов (перемещения) тел, в результате чего меняется характер теплообмена, появляются и исчезают зоны контакта, а также то, что значительная доля тепла уносится вместе со стружкой.

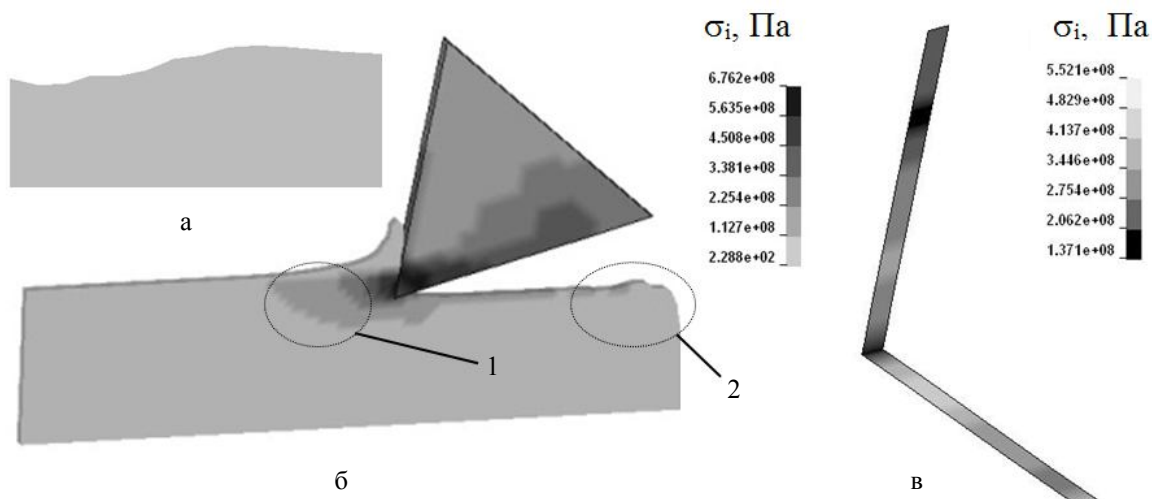


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений:

а – участок выхода инструмента из тела заготовки; б – распределение интенсивности напряжений в системе инструмент-заготовка; в – распределение интенсивности напряжения в покрытии

Исходной, для исследования процесса резания с РИ с покрытием, была принята геометрия резца $\gamma=10^\circ$, $\beta=65^\circ$ и геометрия заготовки $l=50$ мм, $b=1$ мм, $h=12$ мм с режимом резания $t=2$ мм и $V=50$ м/с.

Для модели использовались материалы: для заготовки сталь 15X28, для резца твердый сплав марки Т40 с покрытием из нитрида титана опираясь на исследования А. А. Лимаря в статье [17].

Результаты

После разработки модели важно было убедиться в адекватности полученных результатов. Процесс резания невозможно представить без участка регулярного резания и участков с краевым эффектом, в модели они отчетливо наблюдаются на рисунке 3, момент врезания сопровождается большими ударными напряжениями и образованиями неровной поверхности резания – область 2. Другой краевой эффект – вырыв материала в результате выхода инструмента из тела заготовки, вследствие возникновения концентратора напряжения в виде «обрыва» заготовки, рисунок 3а. Во время регулярного режима резания не наблюдается значительного искажения обработанной поверхности.

Результат моделирования позволяет анализировать данные в определенном участке времени. Для анализа результатов работы выбрано среднее время, которое соответствует установившемуся режиму резания, также это необходимо, чтобы сравнить различные процессы без поправок на момент измерения.

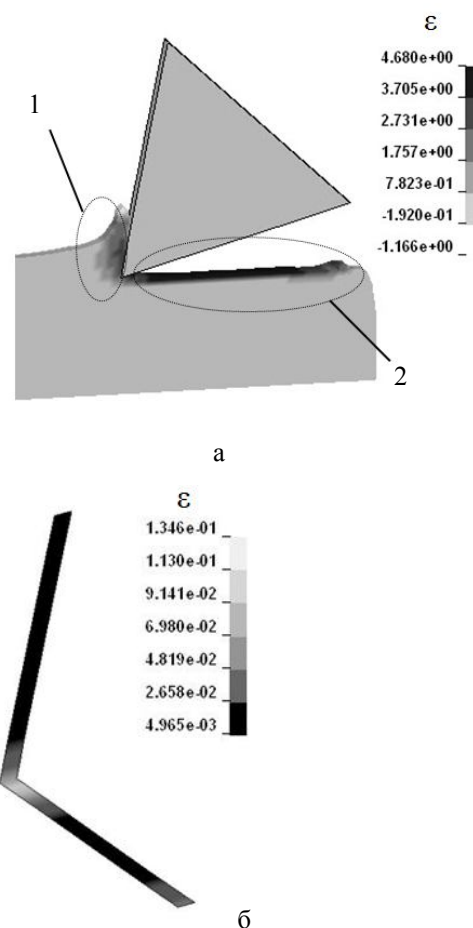


Рис. 4. Распределение пластической деформации: а – в заготовке; б – в покрытии

В ходе исследования было рассчитано распределение интенсивности напряжений (рис 3), это позволяет проанализировать природу распределения напряжений в процессе резания. При рассмотрении

РИ наблюдается большая интенсивность напряжений вдоль задней поверхности, что связано с распространением напряжения от режущей кромки до основания РИ в противоход подачи инструмента. В заготовке очаг большой интенсивности напряжения сосредоточен в месте контакта с РИ и уменьшается с расстоянием. Локализованная в зоне 1, рисунок 3 б, интенсивность напряжений соответствуют упрощенной схеме стружкообразования, напряжения гораздо меньше, чем в области резания, деформации не достигают пластического характера. Распределение интенсивности напряжений аналогичным с инструментом образом видны в покрытии, это позволит определить зоны наибольших напряжений, для дальнейшего совершенствования улучшения РИ.

Также были рассчитаны пластические деформации в системе заготовка-инструмент (рис.4). Распределения больших пластических деформаций сосредоточены в зоне контакта поверхности разрыва с передней поверхностью РИ (1), также в зоне контакта режущей кромки и заготовки и вдоль образованной поверхности заготовки (2). РИ не подвергся пластическим деформациям, это можно объяснить тем, что всё напряжение в РИ «погасилось» упругими деформациями, не достигнув предела текучести. Пластические деформации сопровождаются выделением большого количества тепла. Необходимо решить температурную задачу, чтобы дать количественное заключение о данном процессе. В покрытии большие пластические деформации сосредоточены вблизи режущей кромки, максимум которых сосредоточен на задней поверхности.

Построено распределение наибольших главных напряжений. Первое главное напряжение является наибольшим растягивающим, по величине которого можно судить о возможных разрывах. Для большей наглядности на рис. 5 а) вынесено непосредственно место контакта РИ с заготовкой. Можно сделать заключение о характере зарождения трещины в заготовке (2), в случае обработки хрупких материалов, что лишний раз подтверждает адекватность разработанной модели [18-19]. Данное явление может влиять на качество образованной поверхности: шероховатость, точность и т. д. Также видна четвертая зона упрощенной схемы стружкообразования – собственно стружка, область 1 на рисунке 5 а, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Заключение

Разработана параметрическая модель резания (строгания), основанная на методе ALE, в которой использовался РИ с покрытием, что открыло возможности анализа изменения состояния. Данная модель позволяет учесть механические факторы в процессе резания, что является преимуществом в связи с дороговизной проводимого натурального эксперимента. Однако модель не включает тепловую задачу, что не дает возможности учесть характер распределения температуры и влияние температуры на сам процесс. Адекватность модели соответствует классической теории резания (рис. 1).

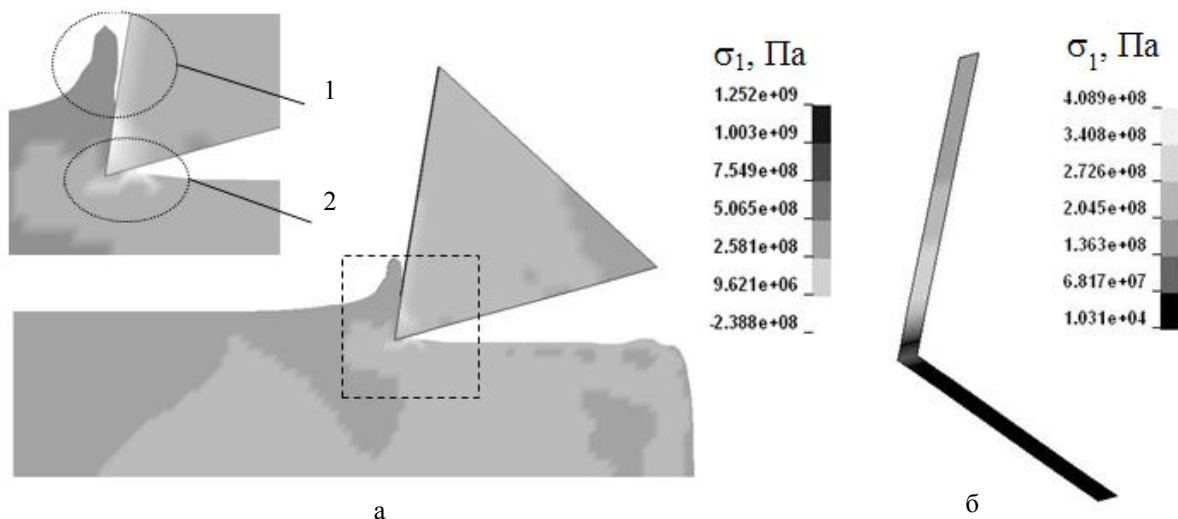


Рис. 5. Первое главное напряжение:
а – в системе инструмент-заготовка; б – в покрытии

Следующими этапами разработки модели:

- внедрение упруго-пластической модели материала Джонсона Кука;
- решение термической задачи;
- создание модели резания основанной на методе SPH и сравнение с текущей моделью.

Литература

1. Костюк, Г. И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст] : учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х. : ХАИ, 2006. – 612 с.
2. Панов, В. С. Режущий инструмент с покрытием из нитрида кремния [Текст] / В. С. Панов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения : сб. науч. тр. / Институт надтвердых матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України. – К., 2010. – Вып. 13. – С. 441–446.
3. Орлова, Н. Ю. Разработка модели процесса резания материала ПСМ-2 с учетом цикличности формирования стружки [Текст] / Н. Ю. Орлова, В. С. Крутиков // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2014 : четвертое заседание тематических секций по направлению инновационные ядерные технологии : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Гос. корпорация по атомной энергии «РОСАТОМ», Нац. исследоват. ядерный ун-т «МИФИ», Снежинский физико-техн. ин-т НИЯУ МИФИ, 30–31 января 2014 г., г. Снежинск. – Снежинск, 2014. – С. 90–92.
4. Кривцов, В. С. Механико-математическое моделирование технологических систем [Текст] / В. С. Кривцов, А. Г. Нарыжный // Технологические системы. – 2012. – Вып. 4 (61). – С. 51–60.
5. Юркевич, В. В. Измерение силы резания на токарном станке. [Текст] / В. В. Юркевич, А. А. Митропольский // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та «Станкин». – М., 2011. – № 2 (14). – С. 38–39.
6. Жумаев, А. А. Контактное взаимодействие при резании как фактор деформационного упрочнения инструмента [Текст] / А. А. Жумаев, С. С. Якубова // Вестник магистратуры. – 2014. – № 2 (29). – С. 26–27.
7. Олейник, А. П. Моделирование процесса формирования сливной стружки с учетом термо-механической разгрузки [Текст] / А. П. Олейник, С. В. Михайлов // Вестн. Костром. гос. технолог. ун-та. – Кострома, 2008. – № 17. – С. 68–72.
8. Криворучко, Д. В. Температура внешней поверхности стружки [Текст] / Д. В. Криворучко, М. Г. Сторчак // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін-т» : зб. наук. пр. Сер.: Машинобудування. – К., 2012. – Вып. 64. – С. 56–62.
9. Волков, Д. И. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки [Текст] / Д. И. Волков, С. Л. Проскуряков // Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. – Уфа, 2011. – Т. 15, № 3 (43). – С. 72–78.
10. Бурков, П. В. Динамическое численное моделирование напряженно-деформированного состояния обрабатываемого изделия и стружки [Текст] / П. В. Бурков, Ю. П. Стефанов // Вестн. Томск. гос. педагог. ун-та. – Томск, 2004. – № 6 (43). – С. 76–80.
11. Григорьев, С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента [Текст] / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 380 с.
12. Залогова, В. А. Имитационная модель прямоугольного свободного резания [Текст] / В. А. Залогова, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик // Вісн. Сум. держ. ун-ту : зб. наук. пр. Серія: Технічні науки. – Суми, 2005. – Вып. 11 (83). – С. 55–66.
13. Амосов, Е. А. Моделирование процесса стружкообразования [Текст] / Е. А. Амосов // Вестн. Самарск. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – Самара, 2005. – № 39. – С. 91–97.
14. Modeling High Speed Machining with the SPH Method [Text] / C. Espinosa, J. Lacome, J. Limido, M. Salaun, C. Mabru, R. Chieragatti. // 10th International LS-DYNA® Users Conference, June 8–10, 2008, Dearborn, Michigan USA : conference proceedings. – Dearborn, 2008. – P. 1-1 – 1-12.
15. Михайлов, А. Н. Анализ физических процессов при обработке резанием Ti6Al4V инструментами с покрытием TiAlN на основе функционально ориентированного подхода [Текст] / А. Н. Михайлов, Е. В. Сидорова, Д. В. Волохов // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнар. зб. наук. пр. / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2011. – Вып. 41. – С. 225–233.
16. Kuhl, E. An arbitrary Lagrangian Eulerian finite- element approach for fluid-structure interaction phenomena [Text] / E. Kuhl, S. Hulshoff, R. De Borst // International journal for numerical methods in engineering. – 2003. – V. 57. – P. 117–142.
17. Лимарь, А. А. Влияние износостойких покрытий на стокостные характеристики режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых коррозионностойких металлов [Текст] / А. А. Лимарь // Вісн. Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». – К., 2013. – № 2 (68). – С. 116–121.
18. Мозговой, Н. И. Исследования влияния физико-механических свойств стеклопластиков на процесс резания [Текст] / Н. И. Мозговой, Я. Г. Мозговая // Вестн. Алтайской науки. – Барнаул, 2013. – № 2-1. – С. 15–19.
19. Бурков, П. В. Динамическое численное моделирование напряженно-деформированного состояния обрабатываемого изделия и стружки [Текст] / П. В. Бурков, Ю. П. Стефанов // Вестн. Томск. гос. педагог. ун-та. – Томск, 2004. – № 6 (43). – С. 76–80.

Поступила в редакцию 08.07.2014, рассмотрена на редколлегии 10.09.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии машиностроения С. С. Добротворский, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

ТЕРМОМЕХАНИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ РІЖУЧИМ ІНСТРУМЕНТОМ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИМ ПОКРИТТЯМ

О. Г. Наріжний, Ю. М. Куценко, М. В. Гром, Д. Р. Степаненко

Стаття присвячена створенню термомеханічної моделі різання ріжучим інструментом зі зносостійким покриттям з ціллю здешевлення процесу впровадження нових зразків високотехнологічного інструмента. Розглянута задача відноситься до класу багатокритеріальних задач параметричної оптимізації. Для рішення поставленої задачі запропоновано використати метод ALE. Використання цього методу дозволяє уникнути труднощів, виникаючих у разі створення нових поверхонь, що трудно при використанні методу кінцевих елементів. Створено механічну модель різання ріжучим інструментом з покриттям, проведено аналіз адекватності поведінки моделі.

Ключові слова: процес різання, різець зі зносостійким покриттям, математична модель, метод ALE.

THE THERMOMECHANICAL MODEL OF CUTTING PROCESS BY CUTTING TOOLS WITH THE WEAR-RESISTANT COATING

A. G. Narizhniy, U. N. Kutsenko, M. V. Grom, D. R. Stepanenko

The article is devoted to the creation of a thermomechanical model of cutting with the cutting tool with the coating. Application this model allow to reduce the cost of the implementation process of new models of high-tech tool. The problem belongs to the class of multiobjective problems of parametric optimization. ALE method is proposed to solve this problem. This method allow avoid the difficulties arising with creating new surface. Such problem is difficult to implement in the application of the finite element method. Was created model of mechanical cutting with the cutting tool with the coating. Mechanical cutting model are created cutter coated. Was analyzed the adequacy of model and it behavior.

Key words: the cutting process, the cutter with a coating, the mathematical model, the method of ALE.

Наріжний Александр Георгиевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail : narizniyag@ukr.net.

Куценко Юрий Николаевич – соискатель кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

Гром Максим Валерьевич – магистрант кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail : MailMaximGrom@yandex.ru.

Степаненко Денис Романович - магистрант кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail : denstep@ukr.net.