

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СИЛ РЕЗАНИЯ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНООБРАБОТКИ**

© 2015 А.С. Пятых, А.В. Савилов

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Поступила в редакцию 08.04.2015

В данной статье приведены результаты исследований по определению коэффициентов сил резания и коэффициента демпфирования материала для алюминиевого сплава В95пчТ2 применяемые при моделировании процесса механообработки.

Ключевые слова: коэффициенты сил резания, моделирование, демпфирование, механообработка.

Модернизация производства, проводимая на ряде отечественных машиностроительных предприятий, связана с внедрением современных обрабатывающих центров и прогрессивного режущего и вспомогательного инструмента ведущих мировых производителей. Это позволило резко повысить технологический уровень производства, но не позволило достичь мирового уровня производительности в металлообработке. Основными причинами являются: выбор неоптимальных режущих и вспомогательных инструментов и назначение неоптимальных режимов резания. Как показывает мировой опыт, выбор инструмента и назначение режимов резания осуществляется по критерию максимальной производительности для конкретной технологической системы и с учётом экономически приемлемой стойкости инструмента [1]. Рекомендации производителей по выбору инструмента и назначению режимов резания не позволяют решить обозначенные проблемы. Это обусловлено тем, что они не учитывают особенности большинства элементов технологической системы. В первую очередь следует отметить станок, на котором выполняется обработка и материал обрабатываемой детали.

Наиболее остро эта проблема отражается на авиационной промышленности. Если в прошлые времена отечественные самолётостроительные предприятия использовали одинаковые станки, режущие и вспомогательные инструменты, эффективное применение которых было регламентировано многочисленными нормативными документами, разработанными отраслевыми институтами, то в настоящее время имеет место разнообразие, как станочного парка предприятий, так и инструментального обеспечения. Ситуация усугубляется несоответствием отечественных и зарубежных конструкционных материалов. В первую очередь это относится к титановым

сплавам. Однако, как будет показано ниже, это справедливо и по отношению к алюминию.

Вышеуказанные проблемы решают моделированием процессов механообработки. В настоящее время распространены несколько различных подходов в области моделирования резания. Например, широко используют метод линий скольжения для таких операций как внедрение клина или снятие стружки. Однако решения, полученные данным методом, не способны качественно описать протекание процесса. Также используют численные методы, построенные на вариационных принципах Лагранжа и Журдена. Достаточно подробно существующие приближенные методы решения краевых задач механики деформированного твердого тела описаны в [2, 3, 4, 5].

Исходным пунктом приближенного решения краевой задачи является аппроксимация сплошной некоторой конечномерной дискретной моделью [2]. В последние годы широкое применение для решения краевых задач получил метод конечных элементов. Метод конечных элементов основан на идее аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами [6, 7, 8].

В настоящее время существует большое количество программных комплексов, в основе которых лежит метод конечных элементов. Как универсальные ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, так и специализированные в области механической обработки – DEFORM, ADVENTEDGE. Каждый из рассмотренных продуктов в различной степени справляется с поставленной задачей.

ANSYS Workbench кроме стандартной базы материалов обладает гибкой системой задания свойств материалов. Это позволяет создавать всевозможные материалы с различными видами свойств. В ABAQUS реализован программный модуль, который позволяет создавать материалы с различными свойствами. Особенностью LS-DYNA является то, что в данной системе не существует библиотеки материалов. Вместо этого,

Пятых Алексей Сергеевич, аспирант кафедры оборудования и автоматизации машиностроения.

E-mail: alexess@istu.edu

Савилов Андрей Владиславович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: saw@istu.edu

существует возможность выбора типа материала с заданными параметрами из более 260 типов. Это позволяет создавать модели материалов с минимумом известных параметров, такими как плотность, текучесть, модуль Юнга [9].

Специализированные программные продукты DEFORM и ADVENTEGE позволяют получать физические величины, которые определяют эффективность процесса резания. К таким показателям относятся силы резания (при осевой обработке – осевая сила и крутящий момент), температура в зоне резания, остаточные напряжения в заготовке, количественные характеристики пластической деформации (например, коэффициент усадки стружки). Для оптимизации процессов механообработки необходимо провести зависимости между величинами, характеризующими эффективность резания (стойкость инструмента, качество и шероховатость поверхности детали), и начальными технологическими условиями.

Данные программные комплексы позволяют смоделировать процесс резания, однако, результаты расчетов не являются универсальными и не могут охватить весь интервал режимов резания при механической обработке [10, 11]. Одной из причин расхождения результатов математической модели и экспериментальной является, то, что при расчете задается стандартизированный материал из базы программного комплекса, который часто не соответствует реальному обрабатываемому материалу, либо материал задается минимальным набором физических характеристик.

Существуют специальные аппаратно-программные комплексы для моделирования процессов механообработки, такие как CutPro/ShopPro. Комплекс CutPro позволяет рассчитывать области стабильного резания, основываясь на деформационной модели резания [1]. В отличие от большинства рассмотренных выше подходов он достаточно полно учитывает физические процессы в зоне резания для каждого конкретного металла, что подтверждается результатами экспериментов [12]. Входными данными при этом являются динамические характеристики инструментальной наладки, геометрия инструмента, материал инструмента и обрабатываемый материал. База обрабатываемых материалов CutPro включает только зарубежные сплавы. Но она может быть дополнена и другими металлами, параметры, резания которых определяют практическим путём.

Проводить моделирование практически без ограничений позволяют языки программирования высокого уровня, такие как C++, Delphi и Java. Но процесс моделирования с их помощью является достаточно трудоёмким. Если точно известны все функциональные зависимости в моделируемой системе и количественные харак-

теристики составляющей модели, то целесообразно использовать программный продукт Matlab [13], который содержит обширную библиотеку математических функций, что, в свою очередь, облегчает работу программиста. В этом случае также необходимо учитывать параметры резания (угол среза, коэффициент трения, напряжение сдвига). Эти параметры зависят от механических свойств обрабатываемого материала, геометрии режущей кромки, скорости резания и подачи. В последних случаях необходимо такое математическое описание параметров резания, которое в последующем можно удобно использовать при построении алгоритмов и написании программ на вышеуказанных языках программирования. Также, параметры резания должны быть получены путём проведения опытных работ с приемлемой трудоёмкостью. Одним из вариантов являются коэффициенты сил резания [14].

В случае моделирования процесса механообработки коэффициенты сил резания могут быть получены при свободном прямоугольном резании при различных передних углах резца и различных подачах. Как правило, для проведения экспериментов передний угол резца варьируется от -10° до $+10^\circ$ с шагом 2, при этом угол наклона режущей кромки не изменяется и равен 0° [14].

Для определения некоторых параметров резания был проведен эксперимент на токарном станке NEF400, в шпиндель которого была установлена труба из алюминиевого сплава В95пчТ2 (рис. 1). Важно отметить, что труба была изготовлена из горячекатаной плиты данного сплава, которая является заготовкой для изготовления реальных авиационных деталей. Обработка

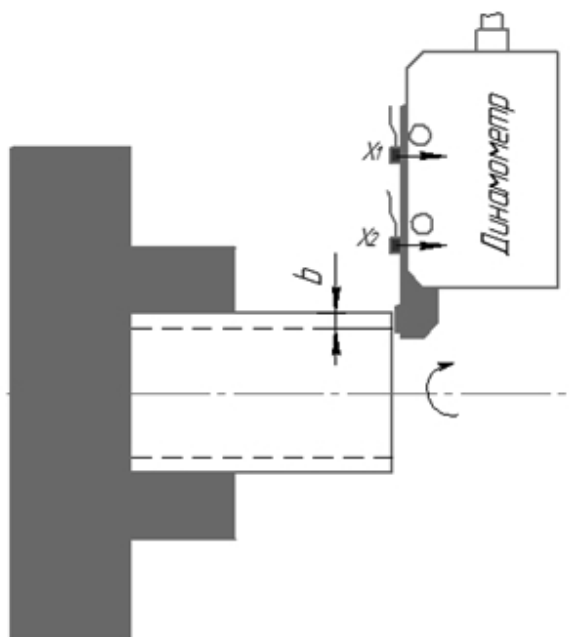


Рис. 1. Наладка станка для определения коэффициентов сил резания

проводилась в осевом направлении резцом с передним углом $\gamma = 10^\circ$ и углом наклона главной режущей кромки λ . Резец был установлен в резцедержатель динамометра Kistler 9129AA (рис. 1), который в свою очередь был установлен в револьверную головку станка. Силы резания измерялись в осевом, радиальном и тангенциальном направлении. Толщина стружки измерялась на инструментальном микроскопе. Скорость резания не изменялась и была постоянной 2000 об/мин. (~238 м/мин.), подача варьировалась от 0,1 мм/об до 0,2 мм/об с шагом 0,05.

После чего были построены графики зависимости сил резания от величины подачи в осевом и тангенциальном направлении (рис. 2). Построенные графики представляют собой линии тренда рассчитанные по методу наименьших квадратов по формуле $y = A_t x + B_t$, где A_t – наклон, B_t – смещение, b – ширина резания.

На основании полученных зависимостей были рассчитаны тангенциальные (K_{tc} и K_{te}) и осевые коэффициенты сил резания (K_{fc} и K_{fe}) по формулам (1) и (2):

$$K_{tc} = \frac{A_t}{b}; K_{ts} = \frac{B_t}{b}; F_t = A_t h + B_t; \quad (1)$$

$$K_{fc} = \frac{A_f}{b}; K_{fs} = \frac{B_f}{b}; F_f = A_f h + B_f, \quad (2)$$

где K_{tc}, K_{fc} – коэффициенты сил резания; K_{ts}, K_{fs} – коэффициенты сил контакта.

После чего по формулам (3), (4), (5), (6) и (7) были рассчитаны сдвигающие силы F_{tc} и F_{fc} угол сдвига φ_c , угол трения β_a , напряжение сдвига τ_s :

$$F_{tc} = K_{tc} b f_n, \quad (3)$$

$$F_{fc} = K_{fc} b f_n, \quad (4)$$

$$\varphi_c = \tan^{-1} \frac{h \cos \gamma}{1 - h \sin \gamma}, \quad (5)$$

$$\beta_a = \gamma + \tan^{-1} \frac{F_f}{F_t}, \quad (6)$$

$$\tau_s = \frac{F \cos(\varphi_c + \beta_a - \gamma)}{b \left(\frac{f_n}{\sin \varphi_c} \right)}, \quad (7)$$

где f_n – подача; b – ширина резания; h – толщина стружки; φ_c – угол сдвига; β_a – угол трения; τ_s – напряжение сдвига; F_t – тангенциальная сила резания; F_f – осевая сила резания.

Результаты расчетов коэффициентов сил резания приведены в табл. 1

Стоит отметить, что данная методика определения коэффициентов сил резания действительна только для острозаточенного инструмента, в противном случае наличие радиального скругления режущей кромки с радиусом, соизмеримым с подачей, начинает преобладать процесс выдавливания, а не резания. При длительной обработке вследствие износа инструмента по задней поверхности формулы расчета сил резания не точны, так как не учитывают вклад сил взаимодействия по задней грани для изношенного инструмента [14, 15].

В связи с этим следует использовать при моделировании процесса резания коэффициенты демпфирования, которые учитывают радиус закругления режущей кромки и задний угол.

Процесс определения коэффициентов демпфирования для алюминиевого сплава В95пчТ2 заключается в измерении ускорения в двух точках на резце в направлении подачи. Наладка станка такая же, как при определении коэффициентов сил резания (рис. 1). Для обработки трубки диаметром 38 мм с толщиной стенки 3 мм была использована токарная пластина Sandvik DCGT 11 T3 04-UM H13A с радиусом закругления 36 мкм и задним углом 7 градусов. Инструмент предварительно был измерен на приборе Zoller Genius III. Подача не изменялась и была постоянной 0,2 мм/об., скорость резания варь-

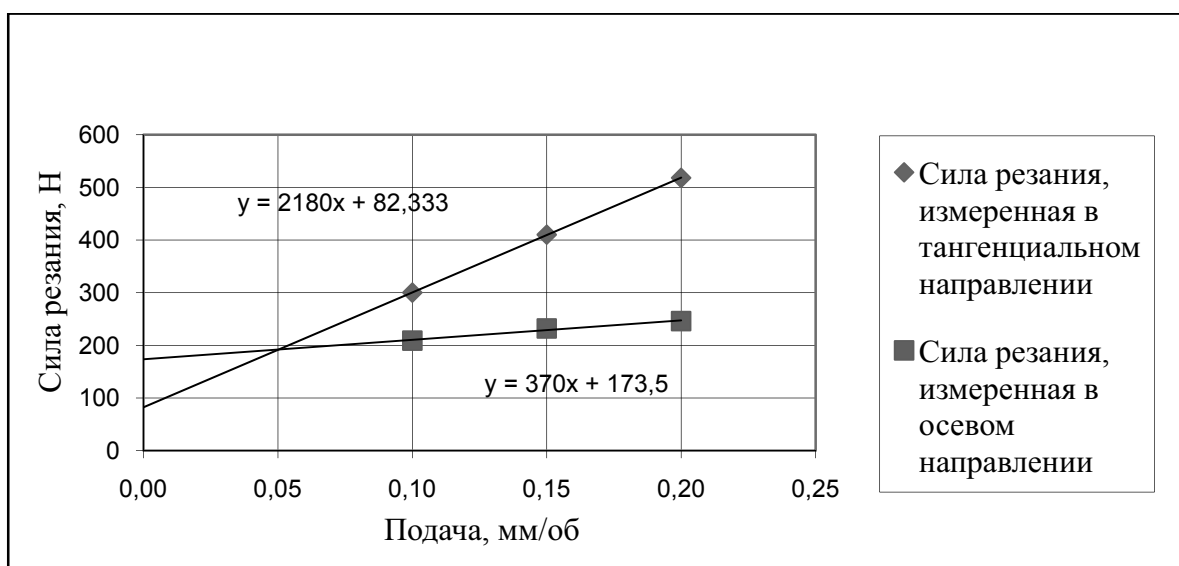


Рис. 2. Средние значения сил резания, измеренные при прямоугольном точении

Таблица 1. Параметры алюминиевого сплава В95пчТ2, полученные при прямоугольном точении; коэффициент тангенциальной силы резания $K_{te}=27,44 \text{ Н/мм}$, коэффициент осевой силы резания $K_{fe}=57,83 \text{ Н/мм}$.

№ п/п	Подача, мм/об	Тангенциальная сила, F_t , Н	Осевая сила, F_f , Н	F_{tc} , Н	F_{fc} , Н	Толщина стружки h , мм	Угол сдвига ϕ_c , град	Угол трения β_a , град	Напряжение сдвига τ_s , МПа
1	0,100	300	209	218	36	0,555	31,2	19,3	289,7
2	0,150	410	232	328	59	0,576	32,3	20,1	291,7
3	0,200	518	246	436	73	0,689	37,7	19,5	306,1

ировалась: 500 м/мин, 750 м/мин, 850 м/мин, 1000 м/мин и 2000 м/мин. На резце были закреплены два акселерометра, данные с которых считывались на каждой скорости резания и анализировались, как показано на рисунке 3, для определения общего коэффициента демпфирования.

Коэффициент демпфирования структуры (без учета процесса резания) был получен из графика, полученного в результате «таре – теста», проведенного в осевом направлении по аналогии

с «таре – тестом» сверла [12] (рис. 3). Параметры частотной характеристики полученные с использованием программного комплекса CutPro представлены в табл. 2.

Для определения коэффициента демпфирования процесса резания рассмотрим схему схода стружки при прямоугольном свободном резании (рис. 4) [16][17].

Когда точка отрыва входит в обрабатываемый материал, то он распадается на две части.

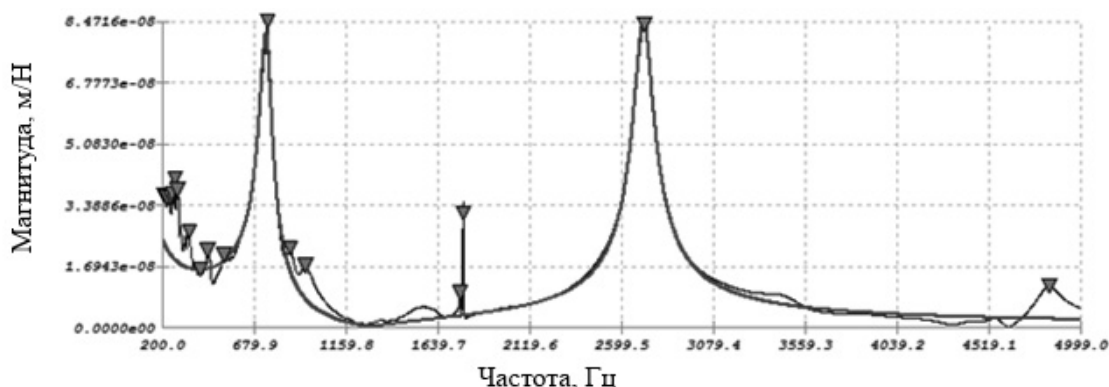


Рис. 3. Результаты модального анализа

Таблица 2. Модальные параметры

Мода	Вид	Частота, Гц	Коэффициент демпфирования, %	Остаток (Re), м/Н	Остаток (Im), м/Н	Модальная жесткость, Н/м	Масса, кг
1	N/A	743,4023	4,431	-2,4372E-07	1,6741E-05	1,3964E+08	6,4004
2	N/A	2713,8804	1,915	1,4730E-06	2,7689E-05	3,0797E+08	1,0592

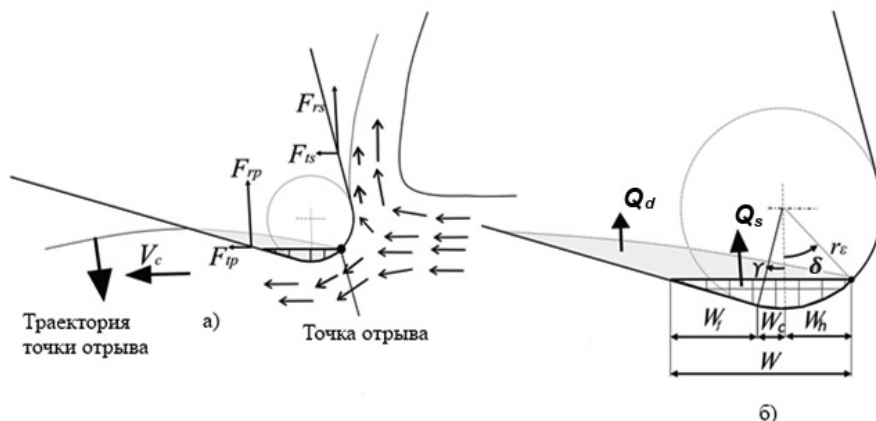


Рис. 4. Схема схода стружки при прямоугольном свободном резании: а) схема схода стружки в области точки отрыва; б) зона снимаемого объема

Материал, который выше точки отрыва скользит по передней поверхности режущей кромки и образует стружку, а часть ниже точки разделения будет сходиться по боковой поверхности. На первую часть материала оказывают влияние силы F_{rs} и F_{ts} , на вторую часть силы F_{rp} и F_{tp} [17].

$$F_{rp} = K_{sp} \cdot Q, \quad (8)$$

$$Q = Q_s + Q_d, \quad (9)$$

$$F_{tp} = \mu F_{rp}, \quad (10)$$

где μ – коэффициент трения, Q , Q_s и Q_d – объемы снимаемого материала статически и динамически в зоне деформации, K_{sp} – удельный коэффициент силы резания, который зависит от механических свойств материала.

При радиусе заточки $r_s = 0$ объем снимаемого материала равен нулю, т.е. $Q_s = \frac{1}{4} \cdot r_s$. В случае, когда инструмент и/или заготовка вибрирует в направлении подачи, объем снимаемого материала Q варьируется, так же как и Q_d , который как полагается, является основным источником демпфирования процесса резания в механической обработке. Объем Q_s является постоянным на протяжении всего цикла колебаний, и не способствует рассеиванию энергии и демпфированию системы, таким образом, статической частью от общего объема можно пренебречь при изучении демпфирования сил резания [17].

$$F_{rp} = K_{sp} \cdot Q_d, \quad (11)$$

Чой и Лян представили зависимость между объемом вытесненного материала, скорости резания, скорости вибрации и шириной износа по передней поверхности, предполагая, что амплитуда колебаний мала и ей можно пренебречь [18].

$$Q_d = -\frac{bW^2}{2V_c} \frac{dr}{dt}, \quad (12)$$

где b – ширина стружки, r – отклонение инструмента в направлении подачи, V_c – скорость реза-

ния, W – ширина износа по передней поверхности.

Данное уравнение справедливо для инструмента с нулевым радиусом заточки; влиянием заднего угла на процесс резания пренебрегают. Отметим, что данное уравнение приближенно подходит для рассматриваемого случая, так как оно справедливо, когда амплитуда стремится к нулю. Из-за отсутствия гармонического возбуждения, амплитуда колебаний мала в операциях точения [17].

Данное уравнение было преобразовано таким образом, чтобы учесть радиус заточки и задний угол, и используется, чтобы рассмотреть процесс демпфирования при точении.

Заточенный инструмент, когда статической частью вытесненного материала пренебрегают, смоделирован как лезвие с эквивалентной длиной изнашивания.

$$W = W_h + W_c + W_f, \quad (13)$$

$$W_h = r_s \sin \delta, \quad (14)$$

$$W_c = r_s \sin \alpha, \quad (15)$$

$$W_f = r_s (\cos \alpha - \cos \beta) \operatorname{ctg} \alpha, \quad (16)$$

где K_{sp} – удельный коэффициент силы резания, который зависит от механических свойств материала; r_s – это радиус заточки; δ – угол разделения, и, как предполагается, он равен 50 градусам [9]; α – задний угол.

Подставляя формулы (12), (13), (14), (15) и (16) в выражение (11) получаем:

$$F_{rp} = -C_{pr} \frac{dr}{dt}; \quad (17)$$

$$C_{pr} = K_{sp} \frac{bW^2}{2V_c}. \quad (18)$$

Используя метод наименьших квадратов, удельный коэффициент силы резания K_{sp} для алюминиевого сплава В95пчТ2 составляет 19000 Н/мм³ как показано на рис. 5.

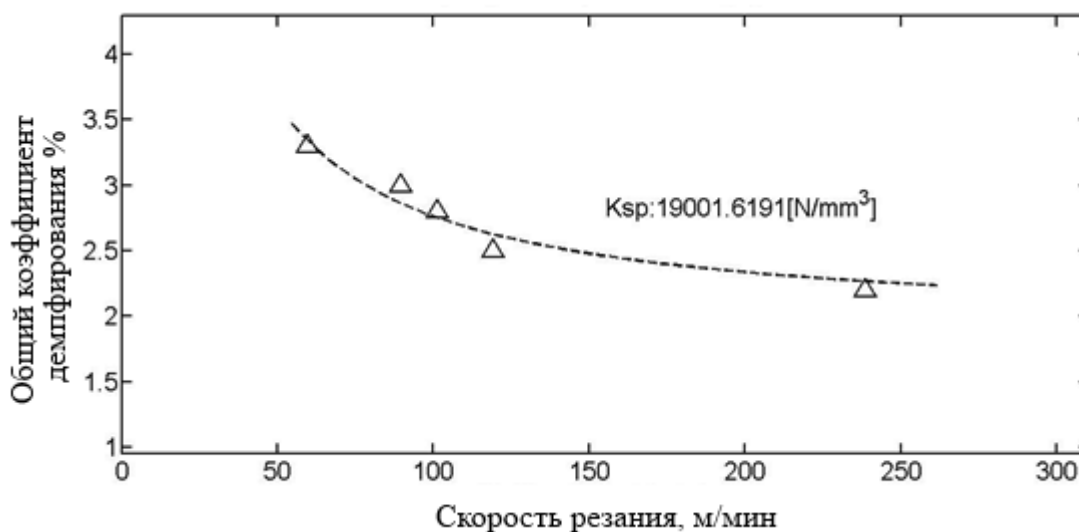


Рис. 5. Общие коэффициенты демпфирования, полученные при модальном анализе на разных скоростях резания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика определения коэффициентов сил резания и коэффициента демпфирования материала пригодна для вычисления сил резания при различных видах механообработки. Использование в экспериментах резцов с варьируемыми передними углами при определении коэффициентов сил резания позволит построить зависимость коэффициентов от переднего угла инструмента, что в свою очередь позволит использовать сверла с различными передними углами при расчете сил резания. Использование удельного коэффициента силы резания позволит учитывать процесс демпфирования материала при расчете сил резания.

Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. №u218.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования / А.В. Савилов (и др.) // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. №6(2). С. 476-479.
2. Васин С.А., Хлудов С.Я. Проектирование сменных многогранных пластин. Методологические принципы. М.: Машиностроение, 2006. 352 с.
3. Поздеев А.А., Трусов П.П., Няшин Ю.И. Большие упругопластические деформации. М.: Наука, 1986. 232 с.
4. Колтунов М.А., Кравчук А.С., Майборода В.П. Прикладная механика деформируемого твердого тела. М.: Высш. шк., 1983. 349 с.
5. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 1976. 464 с.
6. Смирнов В.В. Метод конечных элементов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/smirnov/main.asp> (дата обращения: 31.03.2015)
7. Киселев И.А. Моделирование динамики процесса фрезерования тонкостенных сложнопрофильных деталей: автореф. дисс. ... канд. тех. наук: 01.02.06 М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 21 с.
8. Петраков Ю.В., Драчёв О.И. Моделирование процессов резания. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 240 с.
9. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ-системах / И. В. Горбунов, И. В. Ефременков, В. Л. Леонтьев, А. Р. Гисметулин // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4(4). С. 846–853.
10. Определение математических моделей расчета средней температуры в зоне резания / А.М. Арзумян (и др.) // Вестник ГИУА. Серия «Механика, машиноведение, машиностроение». 2013. №1. С. 1-6.
11. Виноградов Ю.В. Моделирование процесса резания металла методом конечных элементов: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.13.18. Тула: ТГУ, 2004. 19 с.
12. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении / А.В. Савилов (и др.) // Вестник ИрГТУ. 2013. №12. С. 103-110.
13. Информационное обеспечение математических моделей в технических задачах / П.Я. Крауиньш (и др.) // Проблемы информатики. 2012. №5. С.134-137.
14. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press, 2012. 366 p.
15. Яковлев М.Г. Повышение производительности токарной обработки маложестких деталей из никелевых сплавов на основе моделирования динамики процесса резания: автореф. дисс. ... канд. тех. наук: 05.03.01 М.: МГТУ «Станкин», 2009. 21 с.
16. Ahmadi K., Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills, 2015. Vol. 132. pp. 3-12.
17. Ahmadi K., Altintas Y. Identification of Machining Process Damping Using Output-Only Modal Analysis, 2014. Vol. 136.
18. Chiou R.Y., Liang S.Y. Chatter Stability of a Slender Cutting Tool in Turning with Tool Wear Effect, 1998. pp. 315-327.

THE IDENTIFICATION CUTTING FORCE COEFFICIENTS FOR SIMULATION OF THE MACHINING

© 2015 A.S. Pyatykh, A.V. Savilov

Irkutsk National Research Technical University

This article presents the results of research to identified the cutting force and the damping coefficient of the material for aluminum alloy used in modeling the process of machining.

Keywords: cutting force coefficients, simulation, damping, machining.