

Определение коэффициентов сил резания для моделирования процесса сверления

А.С. Пятых^а, А.В. Савилов^б

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^аalexess@istu.edu, ^бsaw@istu.edu

Статья поступила 15.03.2016, принята 19.04.2016

В статье представлен современный метод определения коэффициентов сил резания для их последующего прогнозирования в процессе обработки отверстий спиральными сверлами. В основу метода положены экспериментальные данные, полученные в результате рассверливания пилотных отверстий со смещением оси сверла по координатам на заранее известное расстояние. Для проведения экспериментальных тестов было выбрано цельное твердосплавное спиральное сверло короткой серии диаметром 10 мм. Для зажима инструмента использовался высокоточный патрон короткой серии. На основе рекомендаций производителя инструмента и результатов модального анализа инструментальной наладки были получены режимы резания. В процессе рассверливания пилотных отверстий изменялась величина подачи инструмента от 0,2 до 0,3 мм/об. с шагом 0,05. В ходе эксперимента при помощи трехкомпонентной динамометрической платформы измерялись силы резания и оценивался уровень вибраций узконаправленным инструментальным микрофоном. На основе полученных данных были определены коэффициенты сил резания, рассчитанные в результате рассверливания отверстий диаметрами $d_{p1} = 4$ мм, $d_{p2} = 6$ мм, $d_{p3} = 8$ мм. Результаты проведенной работы позволили сделать вывод о том, что использование указанного метода позволяет определить коэффициенты сил резания, основу которых составляют динамические характеристики технологической системы, геометрические параметры режущего инструмента и обрабатываемый материал. Применение полученных коэффициентов позволяет смоделировать процесс обработки отверстий сверлением с помощью специальных программных комплексов либо языков программирования высокого уровня и обеспечить требуемое качество получаемых отверстий.

Ключевые слова: коэффициенты сил резания; моделирование; сверление; оптимизация; модальный анализ.

Determination of cutting force coefficients to simulate the drilling process

A.S. Pyatykh^а, A.V. Savilov^б

Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^аalexess@istu.edu, ^бsaw@istu.edu

Received 15.03.2016, accepted 19.04.2016

In the article a modern method is presented to determine cutting force coefficients for predicting subsequently cutting forces during making holes with twist drills. The principle of the method is to determine cutting force coefficients on the basis of the experimental data obtained by drilling the pilot holes with the drill axis shifted along the coordinates on a distance known in advance. To carry out experimental tests, 10 mm solid-carbide stub twist drill has been chosen. For tool clamping, a high-precision drill stock of short series has been used. On the basis of the tool manufacturer's recommendations and the results of modal analysis of the tool set-up, cutting modes have been obtained. While drilling the pilot holes, tool feed rate has varied from 0.2 mm to 0.3 mm/rev with the step of 0.05. While carrying out the experiment, cutting forces has been measured by using 3-component dynamometer platform. Vibration level has been estimated with a directional instrumental microphone. On the basis of the data obtained, cutting force coefficients have been determined by calculating them in the process of drilling the holes with diameters of $d_{p1} = 4$ mm, $d_{p2} = 6$ mm, $d_{p3} = 8$ mm. The results of the work allow to conclude that by using this method, it is possible to determine cutting force coefficients, based on dynamic characteristics of technological system, geometric parameters of the cutting tool and the material under processing. The application of the coefficients allows to simulate the drilling process either with the help of special software packages or with the help of high-level programming languages, and to ensure the required quality for the holes.

Key words: cutting force coefficients; simulating; drilling; optimization; modal analysis.

Введение

Обработка отверстий в деталях машин является сложной технологической задачей, поскольку параметры этих отверстий определяют их качественные характеристики. В наибольшей степени это относится к от-

верстиям в деталях летательных аппаратов, где наряду с жесткими допусками на размер задачу усложняет расположение отверстий в труднодоступных местах и, в некоторых случаях, их значительная глубина. Это, в свою очередь, вынуждает применять инструменталь-

ные наладки с большим вылетом и, соответственно, с пониженной жесткостью.

Высокие требования к качеству отверстий не всегда позволяют использовать представленные в каталогах режущего инструмента режимы резания, поскольку они не учитывают особенности большинства элементов технологической системы. В первую очередь это касается станка, на котором выполняется обработка, и материала обрабатываемой детали.

Анализ методик назначения режимов резания и каталогов производителей режущего инструмента показал, что для получения точных зависимостей качества обработанной поверхности от режимов резания необходимо проведение трудоемких экспериментальных исследований. В условиях серийного производства исследования такого рода не представляются возможными в связи с необходимостью использования специализированной контрольно-измерительной аппаратуры, обслуживать которую могут только высококвалифицированные специалисты. К значительным финансовым потерям приводит также использование высокопроизводительных обрабатывающих центров для проведения экспериментов, а не для изготовления серийных деталей. Таким образом, для расчета эффективных режимов резания представляется рациональным использовать метод математического моделирования процесса сверления, который позволит учитывать динамические характеристики технологической системы, геометрические параметры режущего инструмента и обрабатываемый материал.

В настоящее время существует большое количество программных продуктов — как универсальных, так и специальных, позволяющих решать вышеуказанные проблемы в области моделирования процессов механообработки. Обзор научной литературы и анализ различных программных продуктов, используемых для моделирования процессов механообработки, показали, что особую популярность в области моделирования процессов резания получили программные продукты, в основе которых лежит метод конечного элементного анализа [1].

В ряде случаев успешно применяются такие программные продукты, как Deform 3D, Solid Works, AdvantEdge, T-FLEX CAD, LS-DYNA и другие, опыт использования которых описан в работах [26].

Обзор различных подходов в области моделирования процесса резания [7] позволил сделать вывод о предпочтительном использовании специальных аппаратно-программных комплексов, в которых моделирование процесса резания основано на использовании физико-механических свойств обрабатываемого материала. Однако в данном случае требуется учитывать параметры резания, такие как угол среза, коэффициент трения, напряжение сдвига. В свою очередь, параметры резания рационально определять через коэффициенты сил резания [8]. В работе [7] рассмотрен способ определения коэффициентов сил резания в результате свободного прямоугольного точения, который позволяет построить зависимость коэффициентов от переднего угла инструмента. Данный способ обладает универсальностью и позволяет использовать полученные ко-

эффициенты сил резания при других видах механообработки (фрезерование, сверление).

Однако определение коэффициентов сил резания в процессе свободного прямоугольного точения не позволяет в полной мере учесть геометрическую форму режущей части сверла.

Таким образом, для получения адекватных коэффициентов сил резания целесообразно использовать методику определения коэффициентов в процессе сверления [8–10].

Так, в работе [11] авторами рассматривается методика расчета коэффициентов сил резания при сверлении отверстий с использованием направляющих отверстий (рис. 1).

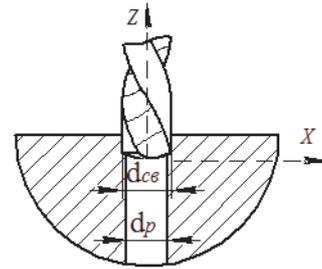


Рис. 1. Схема сверления отверстий при расчете коэффициентов сил резания: $d_{св}$ — диаметр сверла; d_p — диаметр пилотного отверстия

Ось направляющего отверстия совмещена с осью сверла (рис. 1).

Силы резания находятся согласно уравнениям (1), (2):

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z + dF_p \end{bmatrix} |k, n, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} K_{tc} dA + K_{te} \Delta b \\ K_{rc} dA + K_{re} \Delta b \\ K_{ac} dA + K_{ae} \Delta b \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где N — число режущих кромок; K — число режущих элементов; A — матрица поворота системы координат.

Существенный недостаток заключается в том, что рассмотренная методика не учитывает взаимное уничтожение радиальных сил, приложенных к режущим кромкам (рис. 2), вследствие симметрии спирального сверла [12] и не позволяет достоверно определить коэффициенты сил резания.

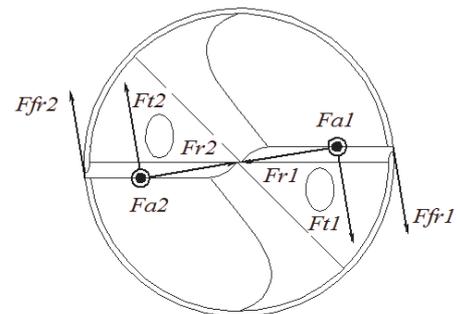


Рис. 2. Силы резания, действующие на точки a_1 и a_2 , находящиеся на режущих кромках сверла: F_{r1} , F_{r2} — радиальные силы резания; F_{t1} , F_{t2} — тангенциальные силы резания; F_{a1} , F_{a2} — осевые силы резания; F_{fr1} , F_{fr2} — силы трения на ленточке

Для решения указанных проблем рассмотрим динамическое состояние спирального сверла. Характерной особенностью динамического состояния спирального сверла является взаимное влияние осевой силы и крутящего момента [13]. При несимметричности заточки (что дает различную длину кромок) суммарная радиальная сила не равна нулю, в результате чего происходят отжим сверла и разбивка отверстия [14]. Влияние осевой силы и крутящего момента приводит к появлению продольных, поперечных и крутильных колебаний.

Нестабильность, вызванная продольными, поперечными и крутильными колебаниями, оказывает влияние на колебания инструмента относительно заготовки, которые в свою очередь вызывают периодическое изменение толщины срезаемого слоя и сил резания, величины и характера нагрузок на станок, возрастающих в несколько раз по сравнению с устойчивым резанием [15].

Коэффициенты сил резания в операциях фрезерования и точения идентифицируются из линейной регрессии поперечных и осевых сил резания, измеренных при различных подачах [8; 16–19]. При сверлении, в силу симметрии сверла, поперечные силы пренебрежимо малы, поэтому, в отличие от фрезерования, они не могут быть использованы для определения коэффициентов сил резания [20]. Чтобы нарушить симметрию резания при сверлении, необходимо использовать направляющие отверстия со смещением. То есть центр направляющего отверстия смещается по отношению к центру фактического отверстия и таким образом в результате поперечные силы используются для определения коэффициентов сил резания.

Подобная методика рассмотрена в работе [16], где авторы используют для расчетов резания смещение оси сверла на заранее известную величину относительно оси направляющего отверстия. Величина смещения сверла учитывается в системе уравнений, определяющих коэффициенты сил резания [3]:

$$, \quad (3)$$

$$, \quad (4)$$

$$, \quad (5)$$

где \mathbf{R} — матрица поворота системы координат; \mathbf{M} — матрица, содержащая параметры режущих кромок; b — ширина срезаемой стружки; \mathbf{V} — вектор, описывающий геометрию режущего элемента.

Для определения некоторых параметров резания проводился эксперимент на фрезерном обрабатывающем центре HSC 75 linear. На столе станка была установлена динамометрическая плита Kistler с закрепленной на ней плитой из алюминиевого сплава 1933T2 (заготовка для изготовления реальных авиационных деталей). Сверление проводилось цельным твердосплавным сверлом короткой серии R840-1000-30-A1A (рис. 3). Данное сверло применяется при высокопроизводительной обработке отверстий для различных областей применения [21].



Рис. 3. Инструментальная наладка: *a* — гидропластовый патрон CoroChuck 930; *b* — сверло R840-1000-30-A1A

После закрепления сверла на столе координатно-измерительной машины были измерены его режущие кромки. На режущих кромках было выбрано по десять равноудаленных точек (рис. 4), и для каждой из них получены координаты в плоскостях X, Y и Z (табл. 1). Полученные данные в последующем используются при моделировании геометрии спирального сверла.

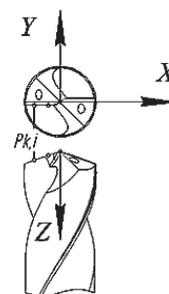


Рис. 4. Спиральное сверло с разбитой на участки режущей кромкой, где P — режущий элемент с номером *k* на *i*-й режущей кромке

Таблица 1

Координаты точек, измеренных на режущих кромках сверла

Режущий элемент	x, мм	y, мм	z, мм
P _{1,1} (P _{1,2})	0	0	0
P _{2,1} (P _{2,2})	0,5	0,41	0,18
P _{3,1} (P _{3,2})	1,0	0,50	0,35
P _{4,1} (P _{4,2})	1,5	0,78	0,50
P _{5,1} (P _{5,2})	2,0	0,94	0,70
P _{6,1} (P _{6,2})	2,5	1,00	0,87
P _{7,1} (P _{7,2})	3,0	1,12	1,05
P _{8,1} (P _{8,2})	3,5	1,12	1,23
P _{9,1} (P _{9,2})	4,0	1,17	1,41
P _{10,1} (P _{10,2})	4,5	1,17	1,58

Затем сверло было зажато в высокоточный гидропластовый патрон CoroChuck 930 короткого исполнения. Обработка отверстий проводилась с охлаждением воздухом.

В дальнейшем был проведен модальный анализ инструментальной наладки, после чего, на основании результатов модального анализа и рекомендаций производителя выбранного инструмента, составлена программа проведения эксперимента (табл. 2).

В процессе проведения эксперимента были измерены силы резания в направлениях X, Y, Z (рис. 5).

Таблица 2

Модальные параметры доминирующих поперечной и крутильно-осевой мод сверла Coro-Drill Delta C R840-1000-30-A1A

	Собственная частота, Гц	Жесткость	Коэффициент демпфирования, %
G_{xx}	2 119,22	$2,8249 \times 10^6$ Н/м	3,04
G_{yy}	2 223,26	$2,4381 \times 10^6$ Н/м	4,85
G_{zz}	2 386,74	$1,9024 \times 10^6$ Н/м	2,19
$G_{\theta z} / G_{z\theta}$	2 277,96	$8,9639 \times 10^6$ Н/рад	1,93
$G_{\theta\theta}$	2 727,81	$8,8644 \times 10^6$ Нм/рад	2,41

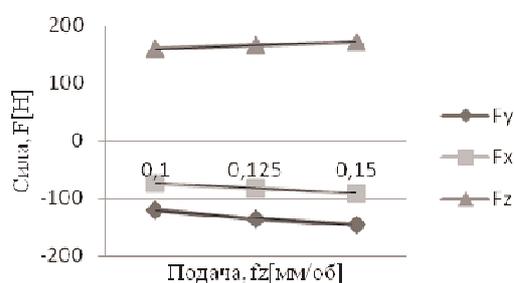


Рис. 5. Средние значения сил резания, измеренные в процессе сверления отверстия диаметром 10 мм

На рис. 5 показаны средние значения сил резания в направлениях X, Y и Z, измеренные в процессе сверления отверстия диаметром 10 мм с направляющим отверстием 8 мм, которое смещено на 1 мм от центра по оси Y. Использование для проведения эксперимента сверла короткой серии и жесткого высокоточного гидропластового патрона позволило максимально снизить возможный изгиб сверла, что положительно сказывается при расчете коэффициентов сил резания.

Тангенциальный, осевой и радиальный коэффициенты сил резания определяются в точках пересечения наклонных линий с мнимыми вертикальными линиями подачи. Заметим, что определенные коэффициенты сил резания действительны на режущих кромках, которые расположены на радиальном расстоянии более 3 мм. Чтобы определить коэффициенты сил резания на других частях режущих кромок, следует использовать направляющие отверстия меньшего диаметра. Процедура

получения коэффициентов при каждом размере направляющего отверстия аналогична описанной.

Полученные коэффициенты сил резания представлены в табл. 3.

Таблица 3

Идентифицированные коэффициенты сил резания для сверла R840-1000-30-A1A (частота вращения шпинделя 5 600 об/мин, заготовки из алюминиевого сплава 1933T2)

№ п/п	(мм)	(мм)	(МПа)	(МПа)	(МПа)	(Н/мм)	(Н/мм)	(Н/мм)
1	8	0,1	530	348	258	67	39	133
2	6	0,1	620	563	636	60	274	23
3	4	0,1	914	855	1 478	15	7	408

Заключение

Рассмотренная методика определения коэффициентов сил резания может применяться для любых типов цельных спиральных сверл. Получение коэффициентов сил резания в результате эксперимента позволяет упростить математическую модель за счет того, что геометрия инструмента учитывается непосредственно в процессе идентификации коэффициентов сил резания.

Описанный в работе подход позволяет установить коэффициенты модели сил резания, описывающие усилия, возникающие при обработке отверстий сверлением, в некоторых пределах изменения технологических параметров. Совокупность полученных коэффициентов определяет модель усилий резания, которая, в свою очередь, является основой динамической модели.

Результаты данной работы позволяют решать системы дифференциальных уравнений, полученных в результате моделирования процесса сверления, основу которых составляют коэффициенты резания. Полученные данные обладают универсальностью использования и могут применяться как в специальных программных продуктах, в которых моделирование основано на физико-механических свойствах обрабатываемого материала, так и с использованием языков программирования высокого уровня.

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России (комплексный проект 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»).

Литература

1. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2001. 496 с.
2. Пашков А.Е., Герасимов В.В. Математическое моделирование процесса формирования факела дроби в дробеметном аппарате контактного типа // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2011. Вып. 12 (59). С. 48-52.

3. Горбунов И.В., Ефременков И.В., Леонтьев В.Л. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ-системах // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2013 № 4 (4). С. 846-853.
4. Пестрецов С.И. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания / С.И. Пестрецов. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 104 с.
5. Криворучко Д.В., Залого В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: моногр. Сумы: Университетская книга, 2012. 496 с.
6. CHEN Zhuo, QIN Lu-fang, Yang Li-juan. Cutting Force Simulation of Titanium based on DEFORM-3D. 3rd International Conference on Material // Mechanical and Manufacturing Engineering, 2009. P. 1846-1849.
7. Пятых А.С., Савилов А.В. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2015 № 17 (2). С. 211-216.
8. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press, 2012. 366 p.
9. Драчев О.И. Обоснование выбора параметров технологической системы для сверления отверстий // Металлообработка. 2008 № 1. С. 2-6.
10. Быкадор В.С. Влияние динамики процесса сверления на формирование глубоких отверстий // Вестн. ДГТУ. 2010 № 8 (51). С. 1207-1218.
11. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling, International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. Vol. 99. P. 1271-1281.
12. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. М.: Машиностроение, 2007. 304 с.
13. Огневенко Е.С. Повышение производительности обработки отверстий путем выбора оптимальных режимов резания на основе анализа динамики процесса сверления: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Барнаул, 2010. 16 с.
14. CHEN Zhuo, QIN Lu-fang, Yang Li-juan. Cutting Force Simulation of Titanium based on DEFORM-3D // 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering, 2006. P. 1846-1849.
15. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // Вестн. ИРГТУ. 2013 № 12. С. 103-110.
16. Ahmadi K., Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015. Vol. 89. P. 208-220.
17. Kaymakci M. Generalized modeling of metal cutting mechanics. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science in the faculty of graduate studies, 2009. Vol. 137.
18. Gao G., Baohai W., Dinghua Z., Ming L. Mechanistic identification of cutting force coefficients in bull-nose milling process // Chinese Journal of Aeronautics, 2013. № 26 (3). P. 823-830.
19. J. Gradišek M., Kalveramb K., Weinert J. Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2004. P. 401-414.
20. Parsiana A., Magnevall M., BenobT., Eynianb M. Mechanistic Approach to Model Cutting Forces in Drilling with Indexable Inserts, Procedia CIRP, 2014. P. 74-79.
21. Руководство по обработке отверстий. Sandvik Coromant. Швеция, типография Sandvikens Tryckeri, 2006. 240 с.
2. Pashkov A.E., Gerasimov V.V. Mathematical simulation of the shot spray forming process in the contact type shot-blasters // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2011. Vyp. 12 (59). P. 48-52.
3. Gorbunov I.V., Efremenkov I.V., Leont'ev V.L. Features of the simulation of machining processes in CAE systems // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013. № 4 (4). P. 846-853.
4. Pestretsov S.I. Computer modeling and optimization of cutting processes: ucheb. posobie Tambov: Izd-vo Tambov. gos. tekhn. un-ta, 2009. 104 p.
5. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. Simulation of the cutting process using finite element method: metodologicheskie osnovy: monogr. Sumy: Universitetskaya kniga, 2012. 496 p.
6. CHEN Zhuo, QIN Lu-fang, Yang Li-juan. Cutting Force Simulation of Titanium based on DEFORM-3D. 3rd International Conference on Material // Mechanical and Manufacturing Engineering, 2009. P. 1846-1849.
7. Pyatykh A.S., Savilov A.V. The identification cutting force coefficients for simulation of the machining // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. № 17 (2). P. 211-216.
8. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press, 2012. 366 p.
9. Drachev O.I. Justification of process system parameter selection for hole drilling // Metalloobrabotka. 2008. № 1. P. 2-6.
10. Bykador V.S. Effect of drilling operation dynamics on deep hole accuracy // Vestnik of DSTU. 2010. № 8 (51). P. 1207-1218.
11. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling, International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. Vol. 99. P. 1271-1281.
12. Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. Cutting materials. M.: Mashinostroenie, 2007. 304 p.
13. Ognevenko E.S. Increasing hole machining performance by selecting the optimum cutting conditions based on analysis of the dynamics of the drilling process: avtoref. dis. ...kand. tekhn. nauk. Barnaul, 2010. 16 p.
14. CHEN Zhuo, QIN Lu-fang, Yang Li-juan. Cutting Force Simulation of Titanium based on DEFORM-3D // 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering, 2006. P. 1846-1849.
15. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Vibration Effect on Accuracy and Quality of Hole Surface under Drilling // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. № 12. P. 103-110.
16. Ahmadi K., Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015. Vol. 89. P. 208-220.
17. Kaymakci M. Generalized modeling of metal cutting mechanics. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science in the faculty of graduate studies, 2009. Vol. 137.
18. Gao G., Baohai W., Dinghua Z., Ming L. Mechanistic identification of cutting force coefficients in bull-nose milling process // Chinese Journal of Aeronautics, 2013. № 26 (3). P. 823-830.
19. J. Gradišek M., Kalveramb K., Weinert J. Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2004. P. 401-414.
20. Parsiana A., Magnevall M., BenobT., Eynianb M. Mechanistic Approach to Model Cutting Forces in Drilling with Indexable Inserts. Procedia CIRP, 2014. P. 74-79.
21. Guide to processing of holes. Sandvik Coromant. Shvetsiya, tipografiya Sandvikens Tryckeri, 2006. 240 p.

References

1. Zarubin V.S. Mathematical modeling technique. M.: Izd-vo MGTU im N.E. Bauman, 2001. 496 p.