Оригинальная статья / Original article
УДК 621.91.01
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-67-81

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

© А.С. Пятых[1]

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. **ЦЕЛЬ.** Повышение динамической устойчивости и производительности обработки отверстий**. МЕТОДЫ.** Теоретические основы исследования базируются на научных аспектах технологии машиностроения и резания материалов, моделирования, активного эксперимента. Экспериментальные данные получены с помощью измерительных приборов: программного комплекса на базе профилометра Taylor Hobson Form Talysurf i200, координатно-измерительной машины Carl Zeiss CONTURA G2, устройства для контроля геометрических параметров Zoller Genius 3, динамометрических комплексов Kistler 9129AA и 9253B23, аппаратно-программного комплекса CutPro и др. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** С помощью разработанной математической модели процесса сверления решена задача повышения производительности, качества поверхности и точности отверстий в деталях из алюминиевых сплавов путем выбора оптимальных режимов резания на основе диаграммы динамической устойчивости. Созданная математическая модель зависимости точности отверстий от длины рабочей части спирального сверла и режимов резания позволяет прогнозировать точность отверстия на этапе проектирования технологического процесса. Рассчитанные модальные параметры инструментальной наладки на базе цельного твердосплавного сверла могут быть использованы при построении диаграмм устойчивости процесса сверления. Разработанная методика исследования зажимных патронов позволяет оценить их влияние на динамическую устойчивость процесса сверления, на качество и точность полученных отверстий. **ВЫВОДЫ.** По результатам экспериментальных исследований предложено использовать гидропластовый зажимной патрон при сверлении отверстий с требуемой точностью (IT7-8). Экспериментально определенные коэффициенты модели сил резания позволяют учесть физико-механические свойства алюминиевых сплавов В95пчТ2, 1933Т2, 1163Т при моделировании процесса сверления как в специальных программных продуктах, так и с использованием языков программирования высокого уровня.
Ключевые слова: *точность отверстий, моделирование сверления, регрессионное уравнение, режимы резания, динамика резания.*

Информация о статье. Дата поступления 06 июня 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Пятых А.С. Повышение производительности и качества обработки отверстий на основе оценки динамики процесса резания // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 67–81. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-67-81

IMPROVING EFFECTIVE OUTPUT AND HOLE PROCESSING QUALITY BASED ON CUTTING PROCESS DYNAMICS ESTIMATION

A.S. Pyatykh

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The purpose of the work is to improve the dynamic stability and productivity of hole processing. **METHODS.** The scientific fundamentals of the technology of mechanical engineering and material cutting, modeling and active experiment form the theoretical basis of research. The experimental data are obtained with the help of measuring means including the program complex based on the Taylor Hobson Form Talysurf i200 profilometer, Carl Zeiss CONTURA G2 coordinate measuring machine, Zoller Genius 3 geometric parameter monitoring device, Kistler 9129AA and 9253B23

[1]Пятых Алексей Сергеевич, инженер-исследователь научно-исследовательской части, e-mail:alexess@istu.edu
Aleksey S. Pyatykh, Research Engineer of the Research department, e-mail: alexess@istu.edu

dynamometer complexes, CutPro hardware- software complex and others. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The developed mathematical model of the drilling process allows to solve the task of improving productivity, surface quality and accuracy of holes in the parts made of aluminum alloys by choosing optimal cutting conditions on the basis of the dynamic stability diagram. The created mathematical model of hole accuracy dependence on the length of the twist drill working part and the cutting modes enables the prediction of the hole accuracy as early as at the design stage of the technological process. The calculated modal parameters of instrumental adjustment for a solid carbide drill can be used in plotting drilling process stability diagrams. The developed procedure for studying clamping chucks allows to evaluate their effect on the dynamic stability of the drilling process as well as to estimate their effect on the quality and accuracy of produced holes. **CONCLUSIONS.** Having considered the results of experimental studies, it was proposed to use a hydroplastic chuck when drilling holes with the required accuracy in accordance with H7-H8. The experimentally determined coefficients of the cutting force model allow to take into account the physicomechanical properties of aluminum alloys V95pchT2, 1933T2, 1163T when modeling the drilling process both in special software products and using high-level programming languages.
Keywords: *hole accuracy, drilling simulation, regression equation, cutting modes, cutting dynamics*

Information about the article. Received June 06, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Pyatykh A.S. Improving effective output and hole processing quality based on cutting process dynamics estimation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 67–81. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-67-81 (In Russian)

Введение

Сверление является наиболее распространенным видом механической обработки материалов резанием и одним из важных процессов в аэрокосмической области. Например, при изготовлении широкофюзеляжного самолета обрабатывается около 50000 отверстий [1]. Сверление часто является одной из последних выполняемых операций. Это означает, что оно осуществляется, когда деталь имеет высокую добавочную стоимость. Поэтому экономическая стоимость устранения дефектов сверления может быть непомерно высокой. Чтобы повысить качество отверстий, необходимо изучение механизмов и условий, которые вызывают появление дефектов. Большое значение имеет то, что производительность процесса может быть увеличена за счет уменьшения геометрических дефектов в деталях и издержек, связанных с дополнительными операциями, исправляющими дефекты отверстий [2–4].

Снижение риска образования геометрических дефектов возможно за счет использования высокопроизводительных сверл, зажимных патронов, обеспечивающих высокую точность и усилие закрепления, станков с высокой жесткостью и точностью, режимов резания, максимально учитывающих свойства обрабатываемого материала и динамические характеристики технологической системы.

Анализ публикаций на эту тему показал, что для решения проблем обеспечения наибольшей производительности процесса сверления и наилучшего качества поверхности в настоящее время успешно применяются методы математического моделирования [5–9]. Результаты исследований, приведенные в работах [10–12], позволяют сделать вывод, что наилучшие показатели при моделировании процессов резания достигаются с помощью языков программирования высокого уровня. В качестве входных данных используются параметры резания – угол среза, коэффициент трения, напряжение сдвига, которые в свою очередь зависят от механических свойств обрабатываемого материала, геометрии режущей кромки, скорости резания и подачи. При этом необходимо такое математическое описание параметров резания, которое в последующем можно использовать при построении алгоритмов и написании программ на языках программирования высокого уровня. Параметры резания должны быть получены путем проведения опытных работ с приемлемой трудоемкостью.

Исходя из вышеизложенного, была

сформулирована цель работы: повысить производительность и качество обработки точных отверстий сверлением для условий современного высокотехнологичного производства, на основе оценки динамики процесса резания.

Для достижения цели необходимо:

– разработать математическую модель зависимости точности отверстий от длины рабочей части спирального сверла;

– разработать математическую модель процесса сверления, учитывающую динамические характеристики инструментальной наладки, жесткость технологической системы и геометрические параметры режущего инструмента для расчета диаграммы динамической устойчивости;

– на основе экспериментальных данных численно определить коэффициенты модели сил резания, характеризующие физические свойства высокопрочных алюминиевых сплавов;

– используя средства модального анализа определить динамические характеристики инструментальной наладки на базе цельного твердосплавного сверла.

Экспериментальные исследования по определению модели зависимости точности отверстия от технологических параметров процесса сверления

Целью данного эксперимента является определение реальной зависимости отклонения диаметра отверстия *Δd* от серии сверла, L_p, скорости резания, V_c, и величины подачи, f_n.

Полагаем, что математическая модель отклонения диаметра отверстия *Δd* может быть представлена уравнением

$$\Delta d = C \cdot L_p^{a_1} \cdot V_c^{a_2} \cdot f_n^{a_3}\,, \qquad (1)$$

где C, a_1, a_2, a_3,– параметры исследуемой модели.

Прологарифмируем выражение (1):

$$ln\Delta d = \ln C + a_1 \ln L_p + a_2 \ln V_c + \\ + a_3 \ln f_n. \qquad (2)$$

Переименуем выражение следующим образом:

$$y_1 = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3,$$

где $y_1 = \ln \Delta d$; x_0 – фиктивная переменная; x_1, x_2, x_3 – кодированные значения факторов; b_0, b_1, b_2, b_3 – постоянные коэффициенты.

Кодирование переменных осуществляется по следующим соотношениям:

$$x_1 = \frac{2(\ln L_p + \ln L_{p_{max}})}{\ln L_{p_{max}} - \ln L_{p_{min}}} + 1;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln V_c + \ln V_{c_{max}})}{\ln V_{c_{max}} - \ln V_{c_{min}}} + 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln f_n + \ln f_{n_{max}})}{\ln f_{n_{max}} - \ln f_{n_{min}}} + 1.$$

Верхние $\left(L_{p_{max}}, V_{c_{max}}, f_{n_{max}}\right)$, нижние $\left(L_{p_{min}}, V_{c_{min}}, f_{n_{min}}\right)$ и основные $\left(L_{p_0}, V_{c_0}, f_{n_0}\right)$ уровни представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значение уровней факторов эксперимента

Table 1

Values of experiment factor levels

Фактор	Код	Интервал	Натуральное значение фактора		
			Верхний уровень (+1)	Основной уровень (0)	Нижний уровень (-1)
L_p, мм	x_1	20	70	50	30
V_c, м/мин	x_2	50	225	175	125
f_n, мм/об.	x_3	0,1	0,4	0,3	0,2

Планирование эксперимента осуществляется согласно предложенному Боксом и Бенкиным некомпозиционному плану [13], который представляет собой определенные выборки строк из полного факторного эксперимента типа 3^k, предусматривающего проведение 15 опытов. Матрица плана изображена в табл. 2.

Вектор коэффициентов определяется по формуле

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y.$$

Дисперсии $S^2(b_j)$ коэффициентов регрессии находятся из выражения:

$$S^2(b_j) = c_{ii} S_y^2, \quad (3)$$

где c_{ii} – диагональные элементы матрицы XX^{-1}; S^2y – дисперсия эмпирической регрессии.

Среднее значение и дисперсия опыта определяются вектором опытов в центре плана:

– среднее значение:

$$y := \frac{\sum_{i=0}^{2} Y_{u_i}}{3},$$

где Y_u – вектор значений функции отклика в центре плана;

– дисперсия:

$$S_y^2 := \frac{\sum_{i=0}^{2} (Y_{u_i} - y)^2}{2}.$$

Статическая значимость коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента определяется с помощью программы Statistica 6.0, результаты расчетов представлены в табл. 3, где *L* и *K* – линейные и квадратичные коэффициенты соответственно. Коэффициенты, абсолютное значение которых больше 0,05, являются достоверными и могут быть использованы для дальнейших преобразований.

Таблица 2

Матрица результатов планирования эксперимента

Table 2

Matrix of experiment planning results

Номер опыта	x_1		x_2		x_3		Δd, мм
	код	L_p, мм	код	V_c, м/мин	код	f_n, мм/об.	
1	-1	30	-1	125	0	0,3	0,013
2	1	70	1	225	0	0,3	0,030
3	-1	30	1	225	0	0,3	0,009
4	1	70	1	225	1	0,4	0,028
5	-1	30	0	175	-1	0,2	0,008
6	1	70	0	175	-1	0,2	0,020
7	-1	30	0	175	1	0,4	0,012
8	1	70	0	175	1	0,4	0,024
9	0	50	-1	125	-1	0,2	0,021
10	0	50	1	225	-1	0,2	0,016
11	0	50	-1	125	1	0,4	0,024
12	0	50	1	225	1	0,4	0,021
13	0	50	0	175	0	0,3	0,018
14	0	50	0	175	0	0,3	0,020
15	0	50	0	175	0	0,3	0,018

Таблица 3

Регрессионные коэффициенты

Table 3

Regression coefficients

Фактор	Регрессионный коэффициент	Стандартная ошибка	*t*-критерий	*p*-уровень	Доверительный предел	
					-95%	+95%
Св. член	-3,98226	0,053067	-75,0422	0,000000	-4,10464	-3,85989
L_p (L)	0,44758	0,032497	13,7732	0,000001	0,37265	0,52252
L_p (K)	-0,18849	0,047834	-3,9406	0,004292	-0,29880	-0,07819
V_c (L)	-0,10527	0,032497	-3,2395	0,011887	-0,18021	-0,03034
V_c (K)	0,13690	0,047834	2,8619	0,021090	0,02695	0,24720
f_n (L)	0,12416	0,032497	3,8206	0,005086	0,04922	0,19909
f_n (K)	-0,5247	0,047834	-1,0968	0,304635	-0,16277	0,05784

Таким образом, регрессионное уравнение зависимости отклонения диаметра от номинального будет иметь вид:

$$\Delta d = L_p^{4{,}236-1.0435\cdot\ln(L_p)} \cdot V_c^{-16{,}481+1.573\cdot\ln(V_c)} \cdot f_n^{0.360} \cdot e^{35.588}. \quad (4)$$

Адекватность модели проверяется по критерию Фишера. Для этого вектор расчетных значений подставляется в полученную ранее формулу.

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле

$$S_E^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y}_j)^2}{N(n-1)},$$

где N – число опытов; $\bar{y}_j$ – математическое ожидание в j-м опыте.

Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости определяется как сумма чисел степеней свободы дисперсий опытов:

$$f_E = \sum_{j=1}^{N}(n_j - 1).$$

Таким образом, при числе степеней свободы дисперсии воспроизводимости, f_E, равном 2, дисперсия воспроизводимости равна:

$$S_E^2 = 1{,}333\cdot10^{-6}.$$

Число степеней свободы дисперсии адекватности определяется как разность числа опытов N и числа постоянных коэффициентов в уравнении регрессии m:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N}(\bar{y}_j-f(x_j))^2}{N-m}. \quad (5)$$

Данные для расчета представлены в табл. 4.

Исходя из данных, представленных в табл. 4, дисперсия адекватности, определяемая по формуле (5), будет равна:

$$S_{\text{ад}}^2 = 3{,}481\cdot10^{-6}.$$

Дисперсии адекватности и воспроизводимости будут однородными, если выполняется условие

$$F < F_{\text{табл}},$$

где $F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_E^2}$; $F_{табл}$ – табличное значение критерия Фишера.

Согласно [13], табличное значение критерия Фишера для данного случая составляет 19,38.

Таким образом, дисперсии адекватности и воспроизводимости однородны, и с доверительной вероятностью P = 0,95 можно утверждать, что составленное уравнение регрессии (4) адекватно. Разброс экспериментальных значений функции отклика относительно ее расчетных значений равен среднему разбросу результатов повторных измерений в каждом опыте отно-

сительно своих математических ожиданий [14].

Графики поверхности отклонения от диаметра в зависимости от параметров режимов обработки и длины рабочей части спирального сверла представлены на рис. 1.

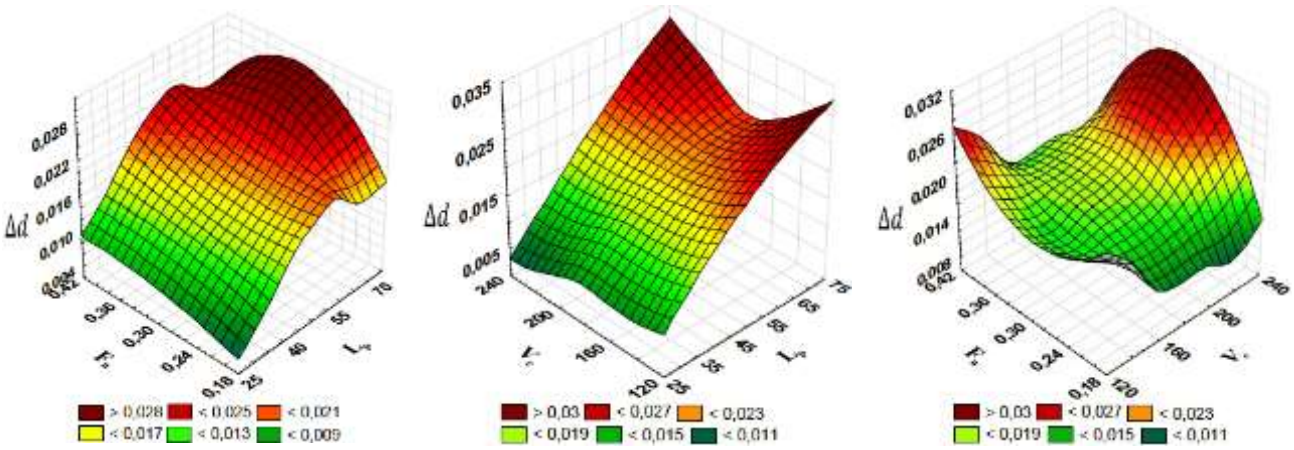
Таблица 4

Расчет дисперсии адекватности

Table 4

Calculation of adequacy variance

Номер опыта	y_{ij}	$\bar{y}_j$	$(y_i - \bar{y}_j)$	$(y_i - \bar{y}_j)^2$
1	0,013	0,013	0	0
2	0,03	0,032	-0,002	0,000004
3	0,009	0,01	-0,001	0,000001
4	0,028	0,025	0,003	0,000009
5	0,008	0,009	-0,001	0,000001
6	0,02	0,021	-0,001	0,000001
7	0,012	0,011	0,001	0,000001
8	0,024	0,027	-0,003	0,000009
9	0,021	0,023	-0,002	0,000004
10	0,016	0,018	-0,002	0,000004
11	0,024	0,029	-0,005	0,000025
12	0,021	0,024	-0,003	0,000009
13	0,018	0,02	-0,002	0,000004
14	0,02	0,02	0	0
15	0,018	0,02	-0,002	0,000004



a ***b*** ***c***

Рис. 1. Зависимости отклонения диаметра от заданного:
a – от подачи инструмента f_n и длины рабочей части L_p;
b – от скорости резания V_c и длины рабочей части L_p;
c – от подачи инструмента f_n и скорости резания V_c
Fig. 1. Dependences of diameter deviation from the specified one:
a – from the tool feed f_n and working part length L_p;
b – from the cutting speed V_c and working part length L_p;
c – from the tool feed f_n and cutting speed V_c

На основе полученных данных можно сделать вывод, что отклонение от диаметра значительным образом зависит от длины рабочей части спирального сверла. Повышение подачи инструмента ведет к увеличению отклонения от диаметра. При изменении скорости резания существуют такие значения, при которых отклонение от диаметра является минимальным.

Методика и условия проведения эксперимента

Теоретические аспекты разработки математической модели процесса сверления на основании анализа исследований [5, 6, 8, 15–17] представлены в работах [18, 19]. В данном разделе приведены экспериментальные исследования адекватности разработанной математической модели.

Для сверления отверстий используется спиральное твердосплавное сверло диаметром 9 мм. Данное сверло было измерено на устройстве для настройки и контроля инструмента вне станка. В табл. 5 приведены технические параметры сверла R840-0900-50-A1A и технические условия для сверла повышенной точности А1 согласно ГОСТ 2034-80.

Для закрепления сверла использовался гидропластовый патрон. Данный патрон исследовался в работе [20] и показал наилучшие результаты для сверления отверстий.

Расчет режимов резания выполняется на основании данных диаграммы динамической устойчивости, для построения которой была разработана математическая модель (6). Экспериментальным путем определены коэффициенты модели сил резания для обрабатываемого материала В95пчТ2 [21–23].

Таблица 5

Параметры режущего инструмента

Table 5

Cutting tool parameters

Контролируемые параметры	Технические условия (ГОСТ 2034-80 (для сверла точности А1))	Измеренные параметры для сверла R840-0900-50-A1A
Поле допуска диаметра режущей части сверла, измеренное в начале рабочей части	*h8*	*m7*
Точность	*IT10-13*	*IT8-10*
Шероховатость, мкм:		
задних поверхностей режущей части	3,2	1,58
направляющих ленточек R_z	3,2	2,12
поверхности хвостовика R_a	0,8	0,23
поверхностей канавок R_z	6,3	2,96
Допуск осевого биения	0,07	0,01
Допуск радиального биения	0,12	0,02
Допуск симметричности поперечной кромки относительно оси рабочей части сверла	0,04	0,01
Предельные отклонения угла при вершине и заднего угла	не более ± 3	не более -1,5

Частота вращения шпинделя n определяется из выражения:

$$n = \frac{\omega_n}{\frac{1}{\pi}\text{arctg}(\frac{b\omega_n}{k-m\omega_n^2})} + N, \quad (6)$$

где ω_n – частота собственных колебаний системы, Гц; *k* – коэффициент демпфирования, %; *m* – модальная масса, кг; *n* = 1,2,3…

Жесткость резания g определяется как

$$g = \frac{(k-m\omega_n^2)^2+(b\omega_n)^2}{2(k-m\omega_n^2)}.$$

Результаты моделирования в программе Matlab 2014b представлены на рис. 2. Кружками отмечены обороты шпинделя, на которых будет проводится сверление отверстий.

Согласно данным инструментального каталога производителя режущего инструмента Sandvik, для сверления отверстий в алюминиевом сплаве N1.3. C.UT (аналог В95пчТ2) скорость резания должна составлять от 120 до 230 м/мин, подача сверла – от 0,2 до 0,4 мм/об. Таким образом был составлен план эксперимента, который предполагает просверливание глухих отверстий на режимах, указанных в табл. 6.

Заготовка представляла собой блок размером 400×250×50 мм и закреплялась на стационарном динамометре Kistler, который в свою очередь был установлен на столе станка HSC 75 linear. Данные собирались с помощью блока АЦП 5028 и в дальнейшем обрабатывались в программном продукте DynoWare. Также в процессе эксперимента исследовались вибрации. Для этого использовался трехканальный акселерометр с магнитным закреплением на шпинделе станка.

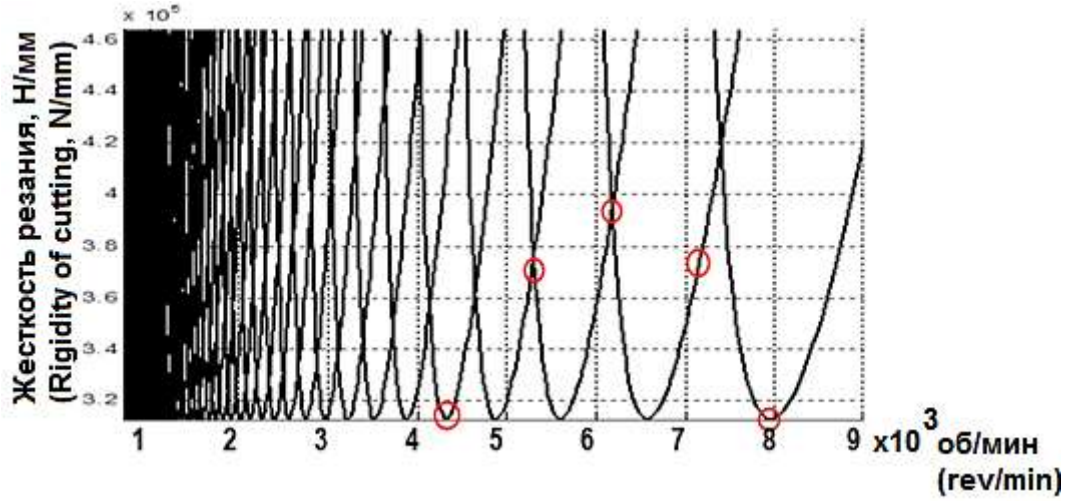


Рис. 2. Диаграмма динамической устойчивости процесса сверления
Fig. 2. Drilling process dynamic stability diagram

Таблица 6

План эксперимента

Table 6

Experiment plan

Изменяемый параметр	f_n, мм/об.	V_c, м/мин	n, об./мин	a_p, мм	Охлаждение	$V_{fв}$, мм/мин
Значение	0,2–0,4	125–225	4421–7958	10–30	СОЖ/Воздух	1200–90000
Шаг	0,05	25	885	5	–	–

Преобразование сигнала осуществлялось с помощью платы National Instruments. Запись сигнала и обработка данных осуществлялись в программном комплексе LabView, в котором для этих целей была разработана программа.

Для оценки влияния параметров обработки на силы резания были построены графики зависимости сил резания от величины подачи инструмента (рис. 3, *a*) и от скорости резания (рис. 3, *b*).

График, представленный на рис. 3, *a,* подтверждает, что увеличение подачи инструмента влечет за собой пропорциональное увеличение силы резания, направленной вдоль оси сверла Z. В отношении сил резания, направленных вдоль осей X и Y, тенденция сохраняется.

В отличие от линейной зависимости сил резания от подачи инструмента зависимость сил резания от скорости резания имеет более сложную форму. Существует скорость резания, которая является оптимальной в определенных технологических условиях. При сравнении графика, представленного на рис. 3, *b*, с диаграммой областей стабильного резания, отчетливо видно, что при сверлении отверстий на скорости резания, попадающей в области стабильности, силы резания являются минимальными. При сверлении отверстий на скоростях резания, попадающих в зоны нестабильности, силы резания являются максимальными. Сверление отверстий на скоростях резания, находящихся на границах устойчивости, является неочевидным.

Таким образом, согласно зависимостям, представленным на рис. 3, *b*, обработка отверстий на скорости резания V_c=175 м/мин является наиболее предпочтительной с точки зрения возникновения деформационных сил резания.

Для оценки влияния режимов резания на процесс обработки построены графики зависимости среднеквадратичного значения (СКЗ) виброускорений от подачи инструмента (рис. 4, *a*) и скорости резания (рис. 4, *b*).

Согласно графику, представленному на рис. 4, *a*, СКЗ виброускорения уменьшается при увеличении подачи инструмента до определенного значения и после начинает увеличиваться. С точки зрения уровня вибраций системы, подача инструмента равная 0,3 мм/об. является оптимальной.

Согласно данным графика, представленного на рис. 4, *b*, скорость резания при сверлении оказывает значительное влияние на уровень вибраций системы. Увеличение скорости резания до определенных значений (150, 175 м/мин) благоприятно сказывается на протекании процесса сверления: вибрации в технологической системе минимальные. Увеличение скорости резания до 200 м/мин вызывает увеличение уровня вибраций, что отражено на графике.

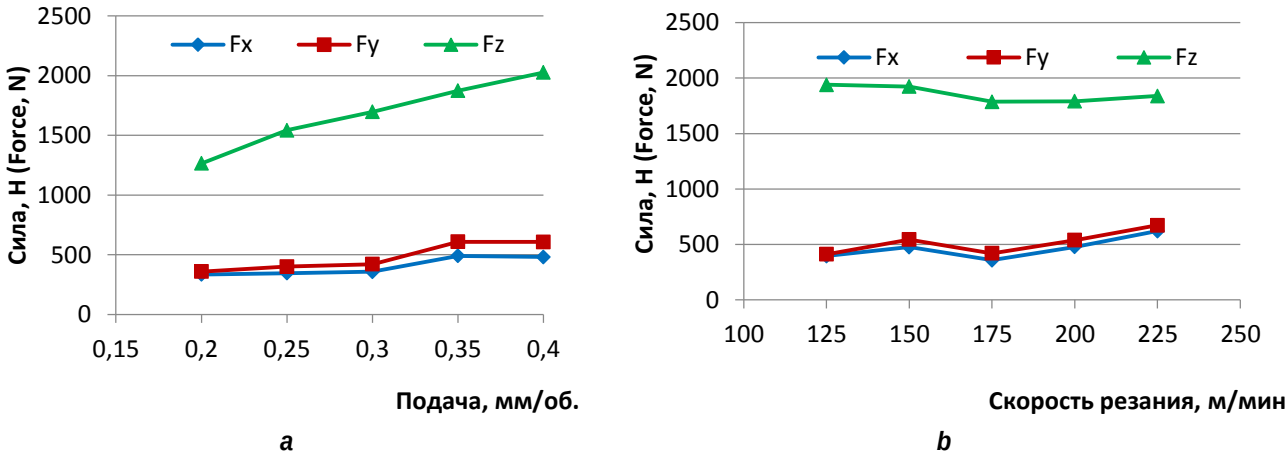


Рис. 3. Графики зависимости сил резания от подачи инструмента (a) и скорости резания (b)
Fig. 3. Plots of cutting forces dependence on the tool feed (a) and the cutting speed (b)

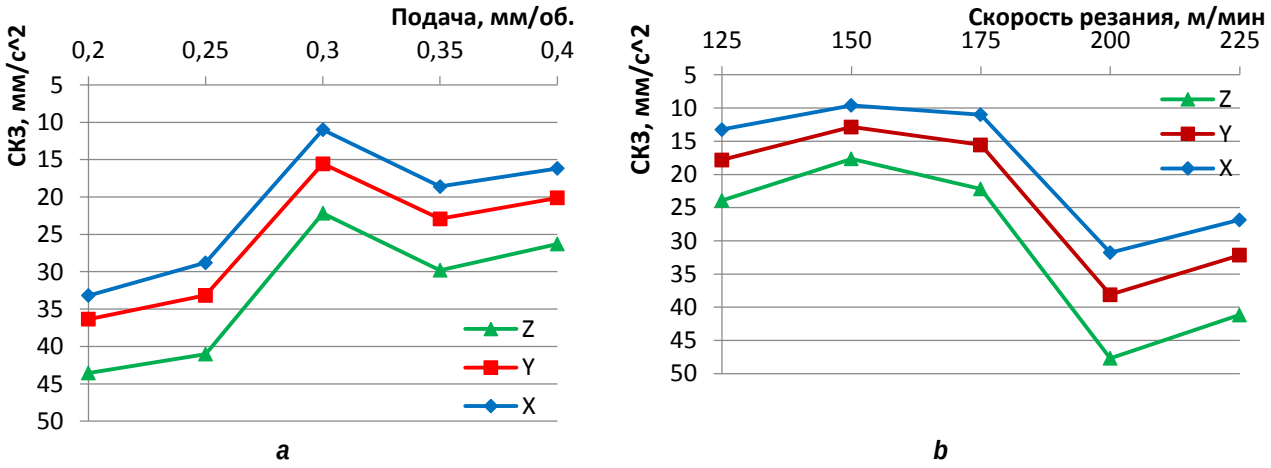


Рис. 4. Графики изменения СКЗ виброускорения по трем осям в зависимости от подачи инструмента (a) и скорости резания (b)
Fig. 4. Plots of vibration acceleration RMS variation by three axes depending on the tool feed (a) and the cutting speed (b)

Контроль высоты микронеровностей поверхностей отверстий проводился с помощью контактного профилометра Taylor Hobson TalySurf i200 с алмазным наконечником. В качестве контролируемых параметров по ГОСТ 25142-82 выбраны R_a и R_z как наиболее универсальные и используемые в производстве. Для программного анализа полученной профилограммы использовался фильтр Гаусса, ширина полосы пропускания – 300:1 (по ISO).

На основании полученных данных были построены графики зависимости шероховатости поверхности отверстия от скорости резания (рис. 5, *a*) и скорости вывода инструмента (рис. 5, *b*).

Скорость вывода сверла из отверстия (см. рис. 5, *b*) оказывает непосредственное влияние на формирование качества поверхности отверстия. Для сохранения качества поверхности требуется выводить сверло из отверстия на скорости, равной скорости подачи инструмента.

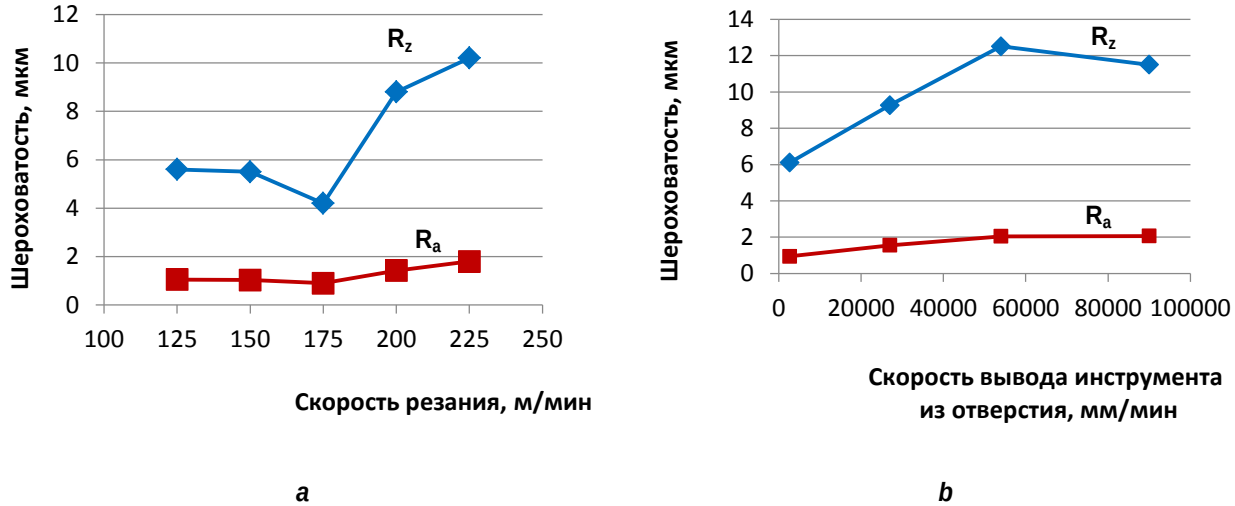


Рис. 5. Графики зависимости шероховатости поверхности отверстия от скорости резания (a) и скорости вывода инструмента из отверстия (b)
Fig. 5. Plots of hole surface roughness dependence on the cutting speed (a) and the speed of tool withdrawal from the hole (b)

Проведенные экспериментальные исследования показали, что параметры обработки оказывают большое влияние на шероховатость поверхности. При высокой скорости резания и высоких подачах наблюдается ухудшение качества поверхности. При высоких скоростях обработки может происходить разрыхление материала, связанное с высокой температурой в зоне резания. Также негативное влияние на шероховатость поверхности оказывает вибрация инструмента (сверла). С увеличением скорости подачи увеличивается скорость удаления стружки, что тоже может привести к плохой поверхности отверстия.

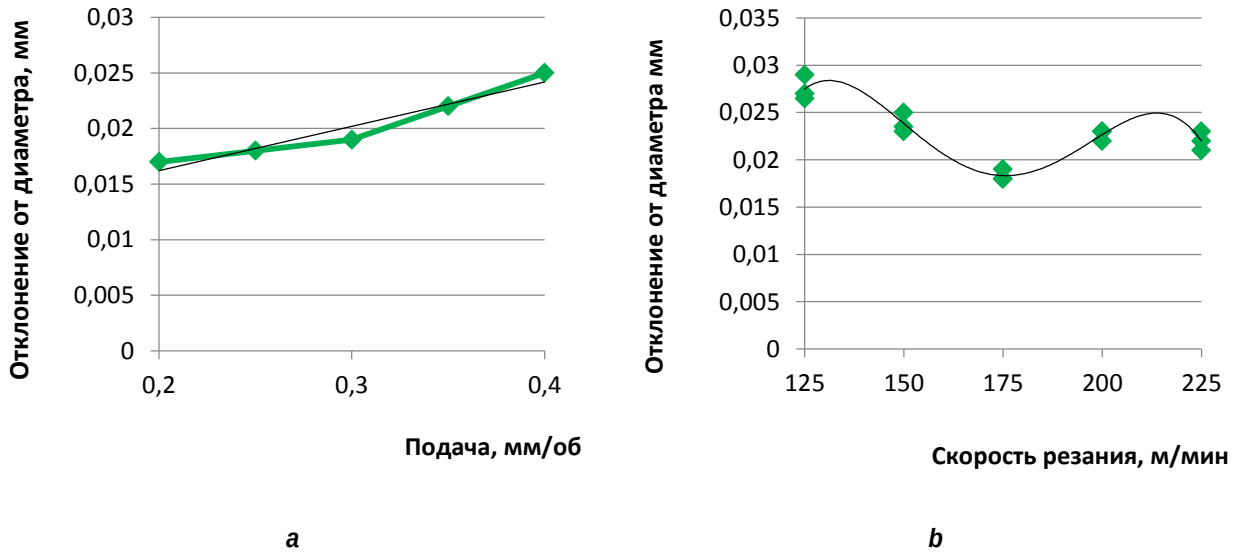
Контроль точности отверстий проводился с помощью координатно-измерительной машины (КИМ) Carl Zeiss CONTURA G2. На рис. 6 показано влияние режимов резания на диаметральный размер просверленного отверстия.

При увеличении подачи инструмента происходит отклонение диаметра отверстия от заданного в большую сторону. Это связано, прежде всего, с относительно малой жесткостью спирального сверла и возрастающей силой, действующей вдоль оси инструмента.

На графике видно (рис. 6, *b*), что с увеличением скорости резания происходит снижение отклонения от заданного диаметра отверстия. С увеличением частоты вращения шпинделя устойчивость системы возрастает.

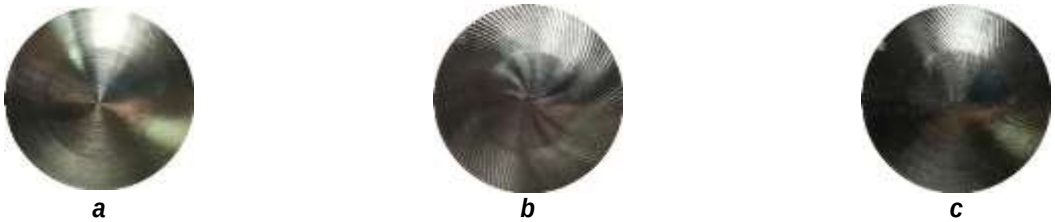
Устойчивость процесса резания при сверлении отверстий сверлом R840–0900–50A1A для различных комбинаций частот вращения шпинделя была определена на основании измеренных сил, данных с акселерометра при резании с учетом качества поверхности на дне отверстия. Данные виброускорения, полученные с помощью трехканального акселерометра, раскладываются в ряд Фурье. Для каждой собственной частоты колебаний инструментальной наладки анализируются гармоники и их амплитуда.

На рис. 7 показана обработанная поверхность дна отверстия, на которой видны следы вибраций с частотой поперечной моды. При частоте 6189 об./мин (175 м/мин) частотные спектры сил резания и частотные спектры колебаний не показывают никаких пиков около поперечной моды, и также около крутильно-осевой моды. Следов вибрации на обработанной поверхности также не наблюдается.



a *b*

Рис. 6. Графики зависимости отклонения диаметра отверстий от подачи инструмента (a) и скорости резания (b)
Fig. 6. Plots of hole diameter deviation dependence on the tool feed (a) and the cutting speed (b)

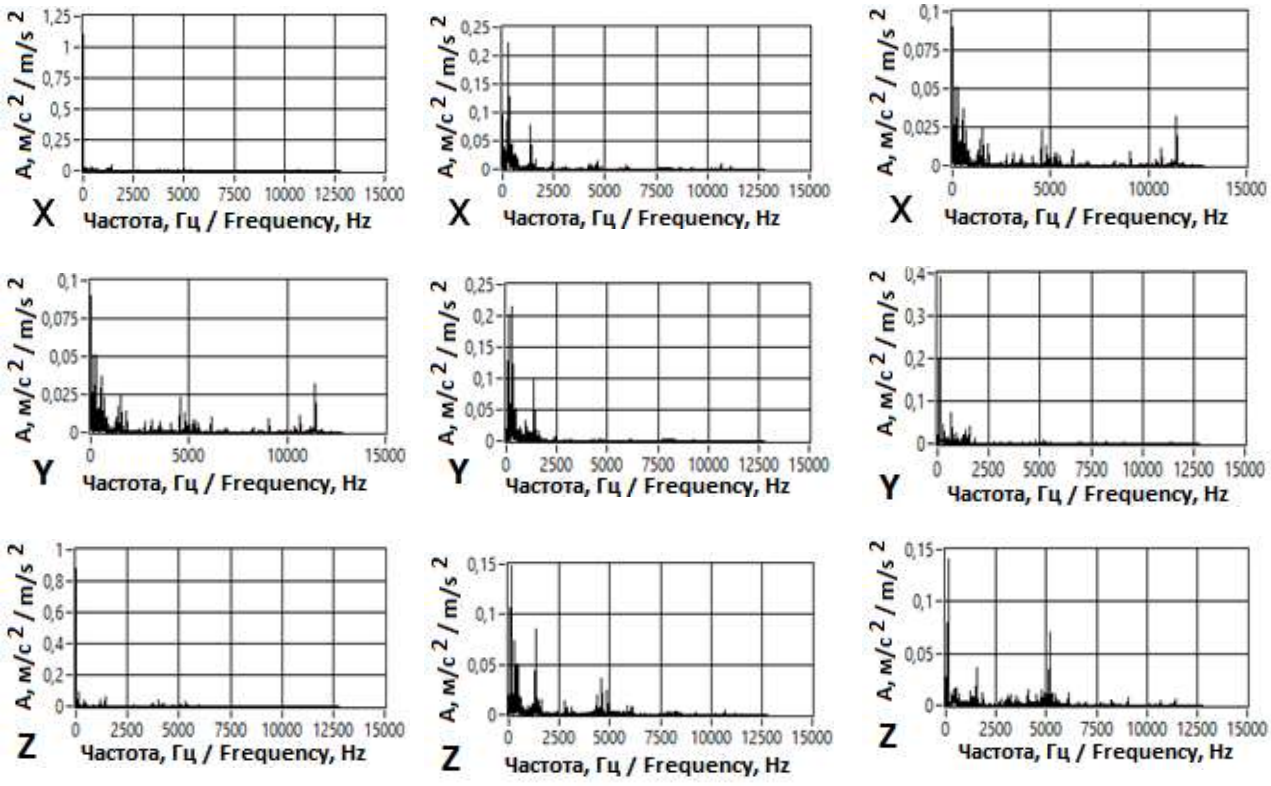


a *b* *c*

Рис. 7. Торцовая поверхность отверстий при сверлении:
a – в зоне динамической устойчивости; b – на границе динамической устойчивости;
c – в зоне динамической неустойчивости
Fig. 7. End face of holes under drilling: a – in the zone of dynamic stability;
b – on the boundary of dynamic stability; c – in the zone of dynamic instability

На рис. 8 приведены частотные спектры сигналов виброускорения, полученные при сверлении отверстий на разных частотах шпинделя, подача инструмента f_n составляла 0,3 мм/об., глубина отверстий a_p =15 мм. При частоте вращения шпинделя 7073 и 7957 об./мин (соответственно 200 и 225 м/мин) частотный спектр колебаний показывает доминирующий пик на частоте поперечной моды. Пики около собственной частоты поперечной моды вместе с увеличением амплитуд колебаний и сил показывают поперечную неустойчивость.

Полученные результаты в ходе экспериментальных исследований успешно коррелируются с результатами математического моделирования, представленными на рис. 2. При сверлении на скорости 175 м/мин (6189 об/мин) и подачей инструмента 0,3 мм/об поверхность отверстий соответствует 7 квалитету. При этом отклонение диаметра отверстия от номинального не превышает 0,020 мм (табл. 7).



a *b* *c*

Рис. 8. Частотные спектры сигналов виброускорения:
a – n = 6189 об./мин, b – n = 7073 об./мин, c – n = 7073 об./мин
Fig. 8. Frequency spectra of vibration acceleration signals:
a – n = 6189 rpm, b – n = 7073 rpm, c – n = 7957 rpm

Таблица 7

Оптимальные режимы резания для сверления отверстий в алюминиевом сплаве В95пчТ2 сверлом R840–0900–50 A1A

Table 7

Optimal cutting modes for drilling holes in aluminum alloy V95pchT2 with a drill R840-0900-50 A1A

Скорость резания, V_c,мм/мин	Подача инструмента, fn, мм/об.	Скорость вывода инструмента из отверстия, V_o, мм/мин	Охлаждающая среда	Шерохова-тость, *Ra*, мкм	Отклонение от диаметра, мм
175	0,3	2700	СОЖ	0,45–0,55	0,018–0,020

Основные результаты и выводы

В ходе выполнения работы были получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана математическая модель, отражающая влияние режимов резания и длины рабочей части спирального сверла на точность отверстий в деталях из алюминиевых сплавов.

2. Выполнено моделирование диаграммы динамической устойчивости процесса сверления спиральным сверлом диаметром 9 мм средней серии. Экспериментально подтверждено соответствие теоретических результатов практическим. Установлено влияние скорости вывода инструмента на сохранение качества поверхности отверстия. При выводе инструмента из отверстия на скорости, равной скорости подачи инструмента, качество поверхности отверстия является наилучшим. По результатам теоретических и экспериментальных исследований решена задача повышения производительности процесса резания, качества поверхности и точности отверстий в деталях из алюминиевых сплавов путем выбора оптимальных режимов резания на основе диаграммы динамической устойчивости.

3. Получены коэффициенты модели сил резания для авиационных алюминиевых сплавов. Данные коэффициенты универсальны для моделирования процесса сверления и могут применяться как в специальных программных продуктах, моделирование в которых основано на использовании физико-механических свойств обрабатываемого материала, так и в комплексах с использованием языков программирования высокого уровня.

4. Определены модальные параметры инструментальной наладки на базе цельного твердосплавного сверла. Данные параметры позволяют учесть динамические свойства инструментальной наладки при расчете областей стабильного резания.

5. Предложена методика, позволяющая оценить влияние зажимного патрона на динамическую устойчивость процесса сверления, на качество и точность полученных отверстий. По результатам экспериментальных исследований предложено использовать гидропластовый зажимной патрон при сверлении отверстий с требуемой точностью до IT7-8. При этом сверление должно осуществляться на станке – обрабатывающем центре с ЧПУ (фрезерный или токарно-фрезерный с фрезерным шпинделем) с бесступенчатым управлением частотой вращения шпинделя. Радиальное биение шпинделя не должно превышать: измеренное в непосредственной близости к торцу шпинделя – 0,005 мм, измеренное на расстоянии 300 мм от торца – 0,015 мм. Эти требования позволят обеспечить конусы шпинделя (ISO, BT, HSK, Capto), выполненные по стандартам ISO 7388 (ГОСТ 25827-2014), ISO 12164 (ГОСТ Р ИСО 12164) или ISO 26623.

Представленные результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 1.7686.2017/7.8.

Библиографический список

1. Jiménez A., Arizmendi M., Cumbicus W.E. Model for the prediction of low-frequency lateral vibrations in drilling process with pilot hole // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 96. P. 1971–1990. DOI: 10.1007/s00170-018-1671-0
2. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-2. С. 476–479.
3. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // Вестник ИрГТУ. 2013. № 12 (83). С. 103–111.
4. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Оптимизация процессов механообработки на основе модального и динамометрического анализа // Наука и технологии в промышленности. 2013. № 1-2. С. 42–46.
5. 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. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2014.11.012
6. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. Cambridge University Press. 2012. 366 p.
7. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. Vol. 99. P. 1271–1281.
8. Roukema J.C., Altintas Y. Generalizedmodeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007. Vol. 47 (9). P. 1455–1473. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005
9. Zhou Y., Yang W., Zhou Y., Xu Z., Shi X. Consistency evaluation of hole series surface quality using vibration signal // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 92. Issue 1-4. P. 1069–1079. DOI: 10.1007/s00170-017-0184-6
10. Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: working surface description approach // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012. No. 6. P. 158–175. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-269
11. Voronov S.A., Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: Algorithm of surface modification and instantaneous chip thickness determination // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012. No. 6. P. 70–83. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-261
12. Voronov S.A., Kiselev I.A., Arshinov S.V. Dynamics' numerical simulation application procedure of multi–axis die–milling at process design // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012. No. 6. P. 50–66. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-260
13. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
14. Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента [Электронный ресурс]. URL: http://libraryno.ru/2-6-regressionnyy-analiz-rezul-tatov-odnofaktornogo-eksperimenta-osn_plan_exp/ (03.05.2018).
15. Орликов М.Л. Динамика станков. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Выща шк., 1989. 272 с.
16. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
17. Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием / пер. с англ. В.А. Пастухова. М.: Машиностроение, 1977. 325 с.
18. Пятых А.С. Математическая модель геометрии режущей части спирального сверла // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 12–15 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. С. 232–236.
19. Пятых А.С. Моделирование динамической устойчивости процесса сверления // Механики XXI веку: материалы XVI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Братск, 17–18 мая 2017 г.) Братск: Изд-во БрГУ, 2017. № 16. С. 133–137.
20. Пятых А.С. Исследование зажимных патронов для сверления точных отверстий // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4 (32). С. 70–74. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-4-70-74
21. Пятых А.С., Савилов А.В. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2. С. 211–216.
22. Пятых А.С., Савилов А.В. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процесса сверления // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 69–73. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-69-73
23. Серебренникова А.Г., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Исследование зависимости сил резания от геометрических параметров токарного резца // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 12–15 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. С. 241–246.

References

1. Jiménez A., Arizmendi M., Cumbicus W.E. Model for the prediction of low-frequency lateral vibrations in drilling process with pilot hole // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 96. P. 1971–1990. DOI: 10.1007/s00170-018-1671-0
2. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. The modern methods of optimization the high productive milling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013, vol. 15, no. 6-2, pp. 476–479. (In Russian)
3. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Vibration effect on accuracy and quality of hole surface under drilling. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2013, no. 12 (83), pp. 103–111. (In Russian)
4. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. Machining

processes optimization based on modal and dynamometric analysis. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and Technology in Industry]. 2013, no. 1-2, pp. 42–46. (In Russian)
5. Ahmadi K., Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015, vol. 89, pp. 208–220. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.012
6. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. Cambridge University Press, 2012, 366 p.
7. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005, vol. 99, pp. 1271–1281.
8. Roukema J.C., Altintas Y. Generalizedmodeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007, vol. 47 (9), pp. 1455–1473. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005
9. Zhou Y., Yang W., Zhou Y., Xu Z., Shi X. Consistency evaluation of hole series surface quality using vibration signal. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017, vol. 92, issue 1-4, pp. 1069–1079. DOI: 10.1007/s00170-017-0184-6
10. Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: working surface description approach. Engineering Journal: Science and Innovation. 2012, no. 6, pp. 158–175. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-269
11. Voronov S.A., Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: Algorithm of surface modification and instantaneous chip thickness determination. Engineering Journal: Science and Innovation. 2012, no. 6, pp. 70–83. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-261
12. Voronov S.A., Kiselev I.A., Arshinov S.V. Dynamics' numerical simulation application procedure of multi–axis die–milling at process design. Engineering Journal: Science and Innovation. 2012, no. 6, pp. 50–66.
DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-260
13. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Experiment planning when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 280 p. (In Russian)
14. *Regressionnyi analiz rezul'tatov odnofaktornogo eksperimenta* [Regression analysis of one-factor experiment results]. Available at: http://libraryno.ru/2-6-regressionnyy-analiz-rezul-tatov-odnofaktornogo-eksperimenta-osn_plan_exp/ (accessed 3 May 2018).
15. Orlikov M.L. *Dinamika stankov* [Machine tool dynamics]. Kiev: Vyshcha shkola Publ., 1989, 272 p.
16. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Machine tool dynamics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967, 360 p. (In Russian)
17. Armarego I.Dzh.A., Braun R.Kh. Obrabotka metallov rezaniem [The machining of metals]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977, 325 p. (In Russian)
18. Pyatykh A.S. *Matematicheskaya model' geometrii rezhushchei chasti spiral'nogo sverla* [Mathematical model of the twist drill cutting part geometry]. *Materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Proceedings of IX All-Russian scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia"]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2017, pp. 232–236. (In Russian)
19. Pyatykh A.S. *Modelirovanie dinamicheskoi ustoichivosti protsessa sverleniya* [Modeling drilling process dynamic stability]. *Materialy XVI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Mekhaniki XXI veku"* [Proceedings of XVI All-Russian scientific and technical conference with international participation "XXI century mechanics"]. Bratsk: BrGU Publ., 2017, no. 16, pp. 133–137. (In Russian)
20. Pyatykh A.S. Investigation of chucks for drilling precise holes. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods Technologies]. 2016, no. 4 (32), pp. 70–74.
DOI: 10.18324/2077-5415-2016-4-70-74 (In Russian)
21. Pyatykh A.S., Savilov A.V. The identification cutting force coefficients for simulation of the machining. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2015, vol. 17, no. 2, pp. 211–216. (In Russian)
22. Pyatykh A.S., Savilov A.V. Determination of cutting force coefficients to simulate the drilling process. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods Technologies]. 2016, no. 2 (30), pp. 69–73. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-69-73 (In Russian)
23. Serebrennikova A.G., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. *Issledovanie zavisimosti sil rezaniya ot geometricheskikh parametrov tokarnogo reztsa* [Study of cutting forces dependence on the geometrical parameters of a turning cutter]. *Materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Proceedings of IX All-Russian scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport in Siberia"]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2017, pp. 241–246. (In Russian)

Критерии авторства

Пятых А.С. провел исследования, подготовил статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Pyatykh A.S. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.