

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-204-216>

УДК 621.91.01/621.914.22

Влияние угла наклона режущей кромки вращающегося инструмента на силу резания при скоростной обработке сложнопрофильных поверхностей деталей на станках с ЧПУ

Докт. техн. наук, проф. Н. Н. Попок¹⁾, инж. В. С. Анисимов¹⁾

¹⁾Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (Новополоцк, Республика Беларусь)

Реферат. Целью работы является повышение производительности обработки сложнопрофильных поверхностей деталей на станках с ЧПУ. Для достижения поставленной цели решается задача исследования составляющих сил резания при обработке заготовок вращающимся инструментом с крутонаклонной режущей кромкой на различных режимах резания. Применяются теоретический и экспериментальный методы исследований. В результате теоретических исследований получены формулы для расчета нормальной силы резания при обработке плоской поверхности вращающейся детали концевой фрезой, учитывающие влияние угла наклона режущей кромки и соотношения составляющих сил резания. Установлен диапазон изменения угла наклона режущей кромки, обеспечивающий снижение силы резания. Для проверки теоретических зависимостей проведены экспериментальные исследования составляющих сил резания при обработке заготовки из алюминиевого сплава Д16Т концевыми фрезами различных фирм-производителей. С использованием специального программно-измерительного комплекса получены осциллограммы амплитудных изменений составляющих сил резания при различных значениях глубины резания и врезания, подачи на зуб и скорости резания. Установлены зависимости влияния угла наклона режущей кромки на силу резания, подтверждающие результаты теоретических исследований. Определены значения поправочных коэффициентов на скорость резания, учитывающие угол наклона режущей кромки инструмента и свойства обрабатываемого материала, что позволяет корректировать значения скорости резания и обеспечить повышение производительности обработки до двух раз.

Ключевые слова: сложнопрофильная поверхность, деталь, концевая фреза, угол наклона режущей кромки, сила резания, мощность привода, производительность, станок с ЧПУ

Для цитирования: Попок, Н. Н. Влияние угла наклона режущей кромки вращающегося инструмента на силу резания при скоростной обработке сложнопрофильных поверхностей деталей на станках с ЧПУ / Н. Н. Попок, В. С. Анисимов // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 3. С. 204–216. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-204-216>

Effect of the Angle of Inclination of the Cutting Edge of a Rotating Tool on the Cutting Force during High-Speed Machining of Complex-Profile Surfaces of Parts on CNC Machines

N. N. Popok¹⁾, V. S. Anisimov¹⁾

¹⁾Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. The aim of the work is to increase the productivity of processing complex-profile surfaces of parts on CNC machines. To achieve this goal, the task of studying the components of cutting forces when processing workpieces with a rotating tool with a steeply inclined cutting edge in various cutting modes is solved. Theoretical and experimental research methods are used. As a result of theoretical research, formulas have been obtained for calculating the normal cutting force when

Адрес для переписки

Попок Николай Николаевич
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
ул. Блохина, 29,
211440, г. Новополоцк, Республика Беларусь
Тел.: + 375 29 596-08-39
n.popok@psu.by

Address for correspondence

Popok Nikolay N.
Euphrosyne Polotskaya State University
of Polotsk
29, Blokhin str.,
211440, Novopolotsk, Republic of Belarus
Тел.: + 375 29 596-08-39
n.popok@psu.by

processing a flat surface of a rotating part with an end mill, taking into account the influence of the angle of inclination of the cutting edge and the ratio of the components of the cutting force. The range of change in the angle of inclination of the cutting edge is set, which reduces the cutting force. To verify theoretical dependencies, experimental studies of the components of the cutting force were carried out when processing a billet made of aluminum alloy D16T with end mills from various manufacturers. Using a special software and measuring complex, oscillograms of amplitude changes in the components of the cutting force at different values of cutting depth and embedding, feed to the tooth and cutting speed were obtained. The dependences of the influence of the cutting edge inclination angle on the cutting force are established, confirming the results of theoretical studies. The values of the correction coefficients for the cutting speed are determined, taking into account the angle of inclination of the cutting edge of the tool and the properties of the processed material, which allows to adjust the values of the cutting speed and ensure an increase in processing productivity up to two times.

Keywords: complex profile surface, part, end mill, angle of inclination of the cutting edge, cutting force, drive power, productivity, CNC machine

For citation: Popok N. N., Anisimov V. S. (2025) Effect of the Angle of Inclination of the Cutting Edge of a Rotating Tool on the Cutting Force during High-Speed Machining of Complex-Profile Surfaces of Parts on CNC Machines. *Science and Technique*. 24 (3), 204–216. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-204-216> (in Russian)

Введение

При механической обработке сложнопрофильных поверхностей деталей большое значение имеют величины силы резания, совершаемой при этом работы и потребляемой мощности приводами станка. Особенно актуален учет этих параметров при обработке на станках с ЧПУ, для которых характерен нестационарный процесс резания с изменяющимися во времени кинематическими и динамическими показателями. Как правило, современные станки с ЧПУ позволяют фиксировать мощность в процессе резания и корректировать элементы режима резания. Дополнительные возможности по управлению процессом резания обеспечивает применение режущих инструментов с крутонаклонной режущей кромкой, совершающей касательное движение к обрабатываемой поверхности [1]. Влияние изменения угла наклона режущей кромки за счет кинематических особенностей обработки деталей, форма которых сочетает цилиндрические, конические, сферические, плоские и криволинейные поверхности вращающимся инструментом (фрезой), на динамические характеристики процесса резания в настоящее время изучено недостаточно. Результаты рассмотренных ниже исследований положены в основу совершенствования и развития обработки сложнопрофильных поверхностей деталей вращающимся инструментом, реализуемой на современных трех- и пятиосевых станках с ЧПУ.

Основная часть

Согласно методике, изложенной в [2], определим нормальную силу N , силу трения F и ее составляющие F_N и F_T для схемы обработ-

ки плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (рис. 1).

Часть главной составляющей силы резания P_Z

$$P'_Z = P_Z - F_{1Z}. \quad (1)$$

Часть силы подачи P_X

$$P'_X = P_X - N_1. \quad (2)$$

Вспомогательный угол ϑ

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P_Y}{P_Z}. \quad (3)$$

Нормальная к режущей кромке сила N_{YZ} , действующая вдоль поверхности резания:

$$N_{YZ} = P'_Z \frac{\cos(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta}. \quad (4)$$

Вспомогательный угол θ

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P'_X}{N_{YZ}}. \quad (5)$$

Нормальная к передней поверхности сила N

$$N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta}. \quad (6)$$

Нормальная сила трения F_N

$$F_N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta} \sin(\theta + \gamma). \quad (7)$$

Касательная сила трения F_T

$$F_T = P'_Z \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta}. \quad (8)$$

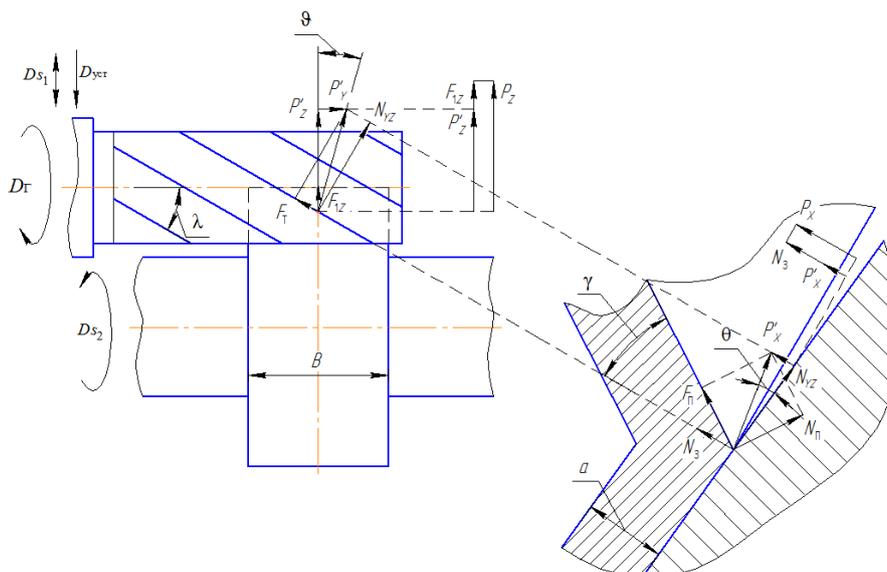


Рис. 1. Схема для определения нормальной силы и сил трения на передней поверхности инструмента с углом $\lambda \neq 0$
 Fig. 1. Diagram for determining the normal force and friction forces on the front surface of a tool with an angle $\lambda \neq 0$

Угол между нормальной и полной силой трения η

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{F_T}{F_N} \quad (9)$$

Полная сила трения F

$$F = \frac{F_N}{\cos \eta} \quad (10)$$

Средний коэффициент трения μ

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (11)$$

Определим величины характеристик процесса резания, входящих в формулы (1)–(11), для рассматриваемого случая обработки лыски (плоской поверхности) детали вращающимся инструментом (концевой фрезой). Примем, что ширина обрабатываемой поверхности (глубина резания) составляет 7 мм, глубина врезания 1 мм. Весь припуск снимается за один проход. Материал заготовки – сплав алюминия Д16Т с $\sigma_B = 440$ МПа. В качестве режущего инструмента используется 4-зубая твердосплавная концевая фреза диаметром 10 мм, скорость резания принимается равной 250 м/мин. Зная исходные данные об обрабатываемом материале и режущем инструменте, рассчитывается главная составляющая силы резания P_Z по общепринятой формуле $P_Z = C_{PZ} t^{x_{PZ}} s^{y_{PZ}} \times v^{z_{PZ}} K_{PZ}$ [3].

При определении влияния угла наклона режущей кромки λ на процесс резания принимают следующие значения составляющих силы резания: $P_X = 0$ и $P_Y = 0$.

Результаты расчетов представлены в виде фрагмента графиков на рис. 2.

Если учитываются все три составляющие силы резания P_X, P_Y и P_Z , то, согласно формуле (3), изменяется положение результирующего вектора силы резания относительно режущей кромки инструмента. Это приводит к изменению угла ϑ . В свою очередь, угол ϑ , входящий в формулу (4), влияет на значение угла λ , уменьшая или увеличивая его. Это изменение λ в зависимости от заданных условий резания (в нашем случае $\lambda = 0-27^\circ$) приводит к некоторому снижению нормальной силы N (рис. 2). Если учитывается только тангенциальная составляющая силы резания P_Z , которая имеет наибольшее значение по сравнению со значениями P_X и P_Y , то при $\lambda = 0$ нормальная сила N имеет максимальное значение, которое по мере увеличения λ (от 0 до 90°) уменьшается до 0 (рис. 2).

Аналогичным образом анализируется влияние угла наклона режущей кромки на нормальную силу N по формуле (6), на нормальную и касательную силы трения – по (7) и (8) с учетом углов θ (формула (5)) и η (формула (9)), а также на работу деформации, сдвига и трения.

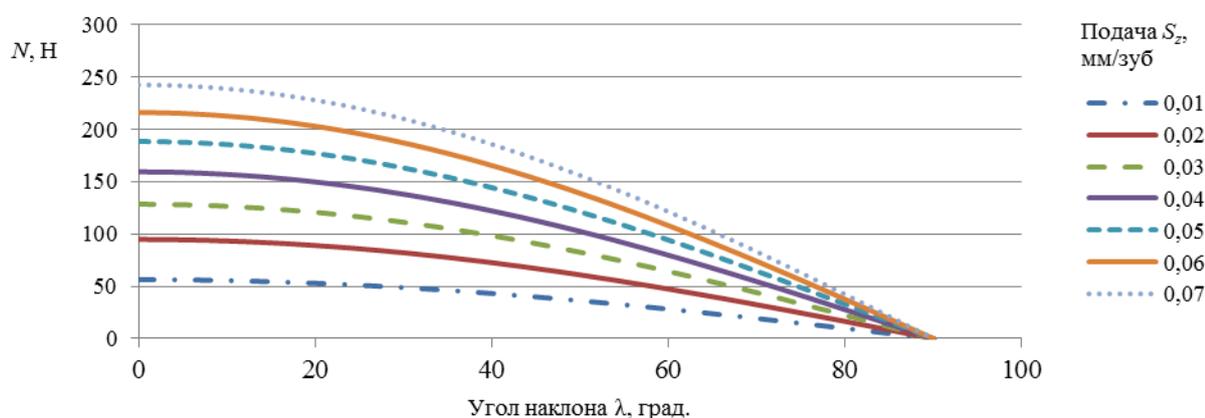


Рис. 2. Влияние угла наклона режущей кромки λ на нормальную силу резания при соотношении составляющих силы резания $P_x = 0$ и $P_y = 0$

Fig. 2. Influence of the angle of cutting edge inclination angle λ on the normal cutting force at the ratio of the components of the cutting force $P_x = 0$ and $P_y = 0$

Для проверки полученных теоретических формул и расчетных данных проведены экспериментальные исследования сил резания на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ FANUC Robodrill серии α -D21LiB. Технические характеристики станка: частота вращения шпинделя 10000 мин^{-1} , программируемая рабочая подача 30000 мм/мин , мощность главного двигателя $7,5 \text{ кВт}$, размеры рабочей зоны $700 \times 400 \times 330 \text{ мм}$. Форма заготовки – цилиндрическая, материал заготовки – сплав алюминия марки Д16Т. В качестве режущего инструмента используются концевые фрезы различных фирм, наименование и геометрические параметры которых представлены в табл. 1.

Измерение сил резания производится с использованием специального сконструированного и изготовленного в условиях научно-

исследовательской лаборатории программно-измерительного комплекса (ПИК), включающего (рис. 3): установочное приспособление фирмы System3R (Швеция); шасси обработки и регистрации данных фирмы National Instruments (США); функциональные модули сбора данных, с помощью которых осуществляются первичное преобразование и оцифровка данных с акселерометра, и тензометрический преобразователь фирмы National Instruments (США); шасси сбора данных, с помощью которого осуществляются передача оцифрованных данных на систему обработки и регистрация данных фирмы National Instruments (США); первичный тензометрический преобразователь. ПИК позволяет фиксировать силы резания в направлении осей X , Y , Z координатной системы станка.

Таблица 1

Наименование и геометрические параметры концевых фрез
Name and geometric parameters of end mills

Наименование фрезы	Радиус вершины (фаска), мм	Угол наклона главной режущей кромки лезвия фрезы λ , град.	Задний угол α , град.	Угол наклона вспомогательной режущей кромки λ_1 , град.	Количество зубьев
USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65	0,5	30°	$9^\circ \pm 5'$	$1^\circ \pm 10'$	4
SECO JS514100D2C.0Z4-NXT 5115144-059	(0,1)	46°	$9^\circ \pm 10'$	$3^\circ 30' \pm 10'$	4
Guhring #19978 10 WN R-N	(0,1)	30°	$9^\circ 30' \pm 5'$	$1^\circ 30' \pm 10'$	4
Guhring #6765 10 WN R-RF1	(0,2)	48°	$10^\circ \pm 10'$	$2^\circ 30' \pm 10'$	4
Guhring #19964 10WNR-HRF (шаг зубьев 1 мм, $r_b = 0,6 \text{ мм}$; $r_{\text{вн}} = 0,3 \text{ мм}$)	(0,1)	20°	$10^\circ 30' \pm 10'$	$2^\circ \pm 10'$	4
Guhring #5504 12R-NRF (шаг зубьев 1,3 мм, $r_b = 0,6 \text{ мм}$; $r_{\text{вн}} = 0,3 \text{ мм}$)	(0,5)	30°	$10^\circ 30' \pm 10'$	$2^\circ \pm 10'$	4

Следует учитывать, что в общепринятой координатной системе, связанной с режущим инструментом, по оси X будет действовать радиальная составляющая силы резания P_Y , по оси Y – тангенциальная составляющая силы резания P_Z и по оси Z – осевая составляющая силы резания P_X .



Рис. 3. Программно-измерительный комплекс:
1 – установочное приспособление; 2 – шасси обработки и регистрации данных; 3 – функциональные модули сбора данных; 4 – шасси сбора данных; 5 – первичный тензометрический преобразователь

Fig. 3. Software and measurement complex:
1 – installation device; 2 – data processing and recording chassis; 3 – functional data acquisition modules; 4 – data acquisition chassis; 5 – primary strain gauge converter

Заготовка диаметром D размещается в установочном приспособлении ПИК (рис. 4) и имеет возможность поступательного перемещения вдоль осей X или Y в движении подачи D_S . Фреза устанавливается в шпинделе станка по

оси Z на глубину врезания A (a_e) и глубину резания t (ширину фрезерования b) с возможностью главного вращательного движения D_G .

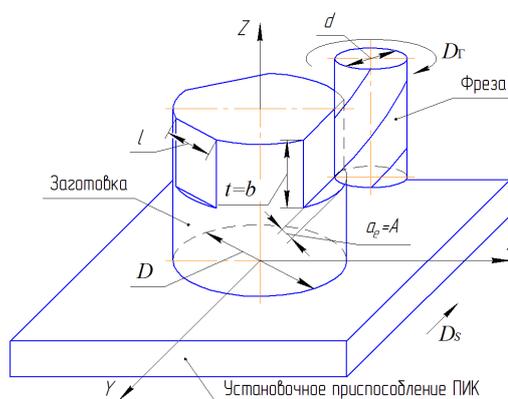


Рис. 4. Схема обработки плоской поверхности при проведении эксперимента

Fig. 4. The scheme of processing a flat surface during the experiment

В ходе эксперимента производится последовательная обработка плоской поверхности сегмента лыски заготовки длиной l и глубиной врезания a_e (рис. 5).

На каждый последующий проход фрезы в движении подачи D_S заготовка поворачивается на очередной обрабатываемый сегмент длиной l лыски, при этом учитывается длина подвода фрезы l_1 . Для приведенных на рис. 5b данных a_e угол врезания фрезы в заготовку α_e изменяется в пределах 9–20°.

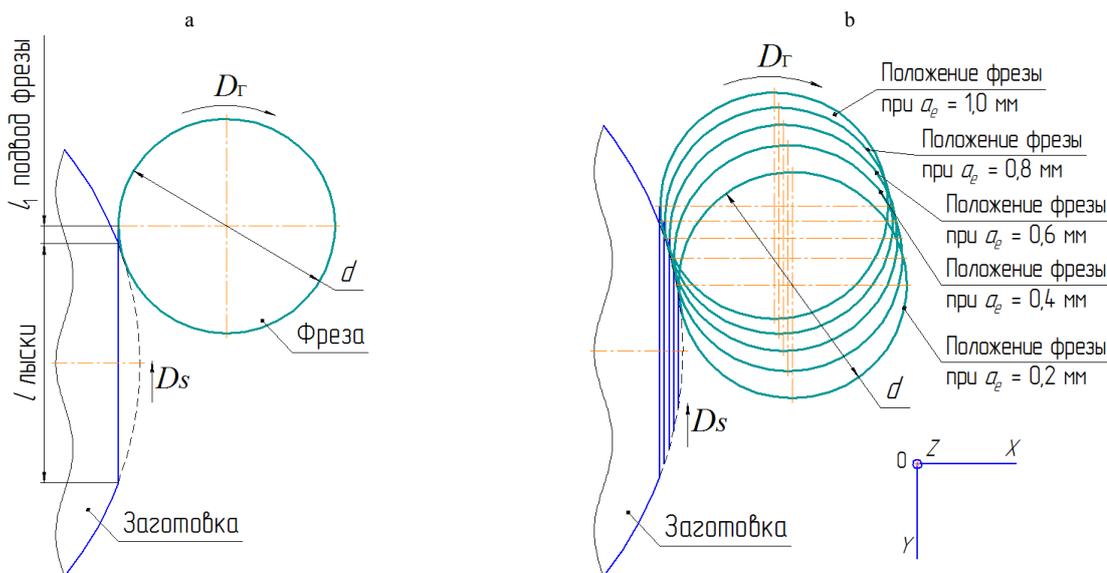


Рис. 5. Схема обработки лыски заготовки (а) и начальные положения фрезы при срезании слоя с глубиной врезания a_{ei} (b)

Fig. 5. Processing scheme of the workpiece (a) and the initial positions of the cutter when cutting a layer with a cutting depth a_{ei} (b)

В ПИКе предусмотрено дополнительное вращательное движение заготовки вокруг собственной оси. Таким образом, технические возможности станка и ПИК позволяют реализовать обработку плоских, цилиндрических и криволинейных поверхностей детали вращающейся фрезой с врезанием по касательной к обрабатываемой поверхности заготовки.

При обработке заготовок выбираются рекомендуемые [3, 4, 10] элементы режима резания v , S , t и согласовываются с техническими характеристиками станка (табл. 2).

Последовательность изменения элементов режима резания в опытах составляется таким образом, чтобы учесть особенности как одно-, так и трехфакторного эксперимента (табл. 3).

Таблица 2

Элементы режима резания, согласованные с техническими характеристиками станка
Elements of the cutting mode, consistent with the technical characteristics of the machine

При диаметре фрезы $d = 10$ мм					
Количество зубьев z				4	
Подача на зуб f_z , мм/зуб	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Минутная подача f_m , мм/мин	572,96	891,27	1273,24	1718,87	2228,17
Глубина врезания a_e , мм	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Скорость резания v , м/мин	150	175	200	225	250
Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹	4774,65	5570,42	6366,2	7161,97	7957,75
При диаметре фрезы $d = 12$ мм					
Количество зубьев z				4	
Подача на зуб f_z , мм/зуб	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Минутная подача f_m , мм/мин	477,47	742,72	1061,03	1432,4	1856,81
Глубина врезания a_e , мм	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Скорость резания v , м/мин	150	175	200	225	250
Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹	3978,87	4642,02	5305,17	5968,31	6631,46

Таблица 3

Значения элементов режима резания в опытах эксперимента
Values of the elements of the cutting mode in the experimental tests

№ опыта	Глубина врезания a_e , мм	Подача на зуб f_z , мм/зуб	Минутная подача f_m , мм/мин	Скорость резания v , м/мин	Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹
1	0,2	0,07	2230	250	7960
2	0,4	0,07	2230	250	7960
3	0,6	0,07	2230	250	7960
4	0,8	0,07	2230	250	7960
5	1	0,07	2230	250	7960
6	1	0,03	955	250	7960
7	1	0,04	1274	250	7960
8	1	0,05	1592	250	7960
9	1	0,06	1910	250	7960
10	1	0,07	2230	250	7960
11	1	0,07	1337	150	4775
12	1	0,07	1560	175	5570
13	1	0,07	1782	200	6366
14	1	0,07	2005	225	7162
15	1	0,07	2230	250	7960
16	0,2	0,03	955	250	7960
17	0,2	0,07	1337	150	4775
18	1	0,03	573	150	4775
19	0,2	0,03	573	150	4775

На рис. 6 показаны фрагменты осциллограмм с дисплея ПИК амплитудных изменений составляющих силы резания в течение времени подвода фрезы и обработки сегмента лыски невращающихся и вращающихся заготовок при глубине врезания $a_e = 1,0$ мм, ширине (глубине) резания $a_p = 7,0$ мм, минутной подаче $f_m = 1300$ мм/мин, частоте вращения шпинделя $n = 6400$ мин⁻¹. Как видно на рис. 6, осциллограммы позволяют установить изменения значений составляющих силы резания при входе и выходе фрезы в зону резания и значения силы резания по длине обработки сегмента лыски заготовки.

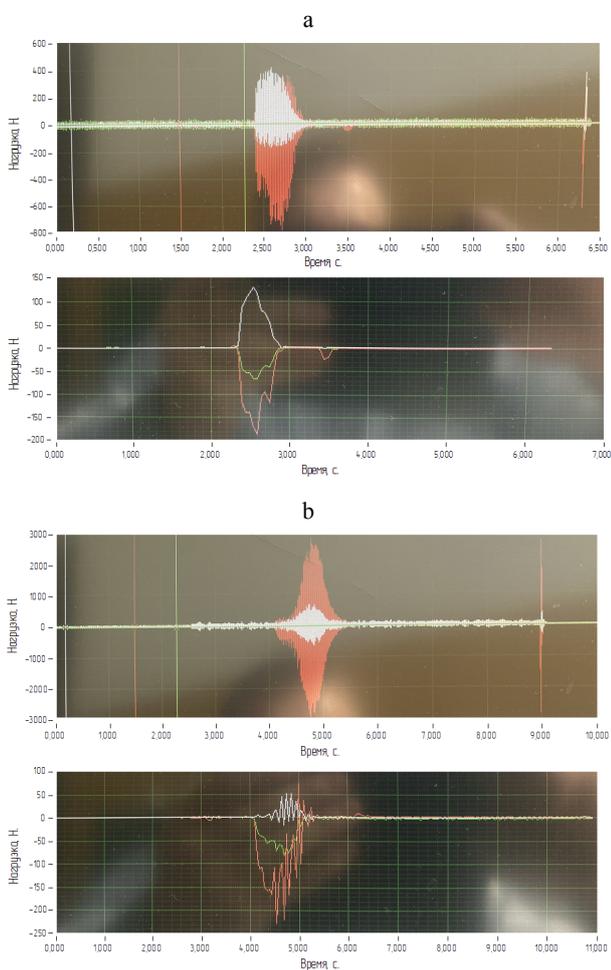


Рис. 6. Фрагменты осциллограммы амплитудных изменений составляющих силы резания при попутном фрезеровании невращающейся заготовки (а) и при встречном фрезеровании (b) вращающейся заготовки

Fig. 6. Fragments of the oscillogram of amplitude changes in the components of the cutting force with passing milling of a non-rotating workpiece (a) and when counter milling (b) a rotating workpiece

Время фиксации силы резания на дисплее ПИКа сопоставляется со временем обработки лыски. Полученные осциллограммы обрабатываются соответствующим образом (пересчитываются) по максимальным и минимальным пикам изменения силы резания и приводятся к виду, фрагментарно представленному на рис. 7. В данном случае количество записанных блоков данных характеризует чувствительность применяемой регистрирующей аппаратуры, которая позволяет фиксировать 25000 сигналов в секунду (1 с соответствует 20 блокам).

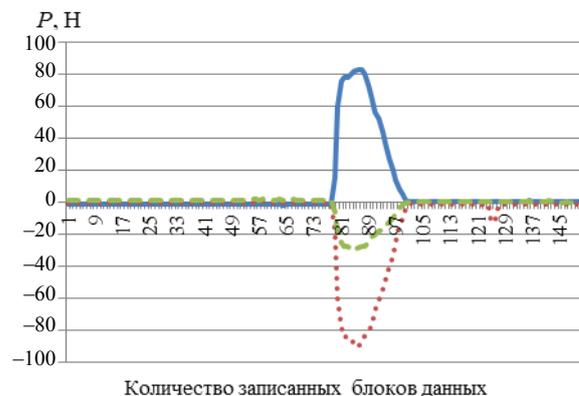


Рис. 7. Фрагмент обработанной осциллограммы:

Fig. 7. Fragment of the processed waveform:
 — P_x , — P_y , - - - - - P_z

По результатам эксперимента строятся зависимости изменения составляющих силы резания P_x, P_y, P_z от глубины резания, подачи на зуб и скорости резания для различных фрез и значений угла наклона режущей кромки. Фрагменты графиков показаны на рис. 8.

Как видно из графиков, с увеличением значений скорости резания от 150 до 250 м/мин составляющие силы резания P_x, P_y и P_z изменяются незначительно.

Сопоставление значений составляющих силы резания P_x, P_y, P_z для различных фрез и при изменении элементов режима резания представлены на рис. 9.

Как видно из графиков, наибольшее влияние на составляющие P_x и P_z оказывает увеличение значений a_e и f_z , причем уменьшение длины режущей кромки (фрезы Guhring #19964 10WNR-HRF (20°) и Guhring #5504 12R-NRF (30°)) приводит к наименьшим значениям P_x и P_z . Увеличение скорости резания v до значений 250 м/мин практически не влияет на изменения составляющей силы резания P_y .

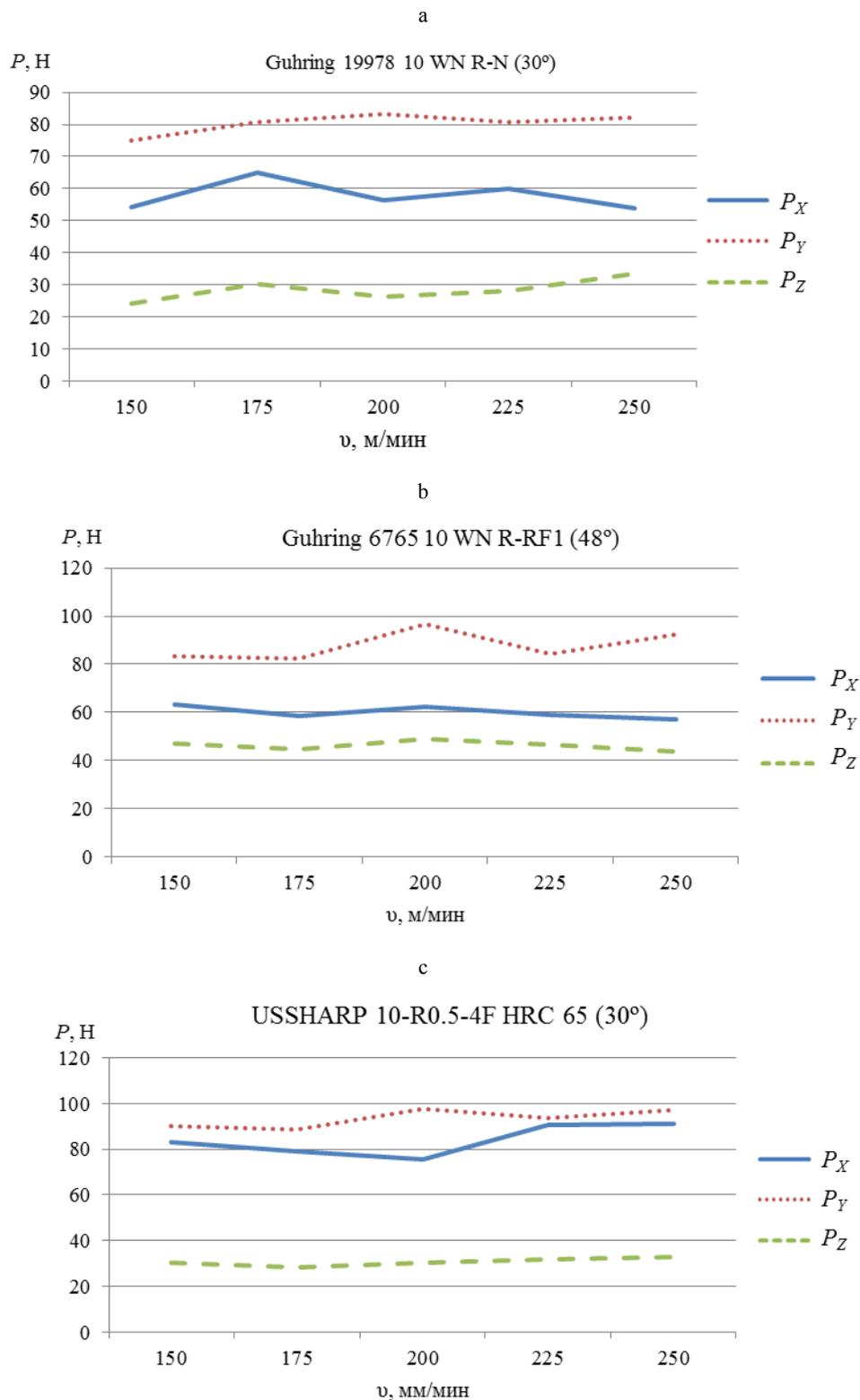


Рис. 8. Зависимости изменения составляющих силы резания P_x , P_y , P_z от скорости резания при обработке фрезами Guhring 19978 10 WN R-N (30°) (a), Guhring 6765 10 WN R-RF1 (48°) (b), USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65 (30°) (c)

Fig. 8. Dependences of changes in the components of the cutting force P_x , P_y , P_z on the cutting speed when processing with Guhring cutters 19978 10 WN R-N (30°) (a), Guhring 6765 10 WN R-RF1 (48°) (b), USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65 (30°) (c)

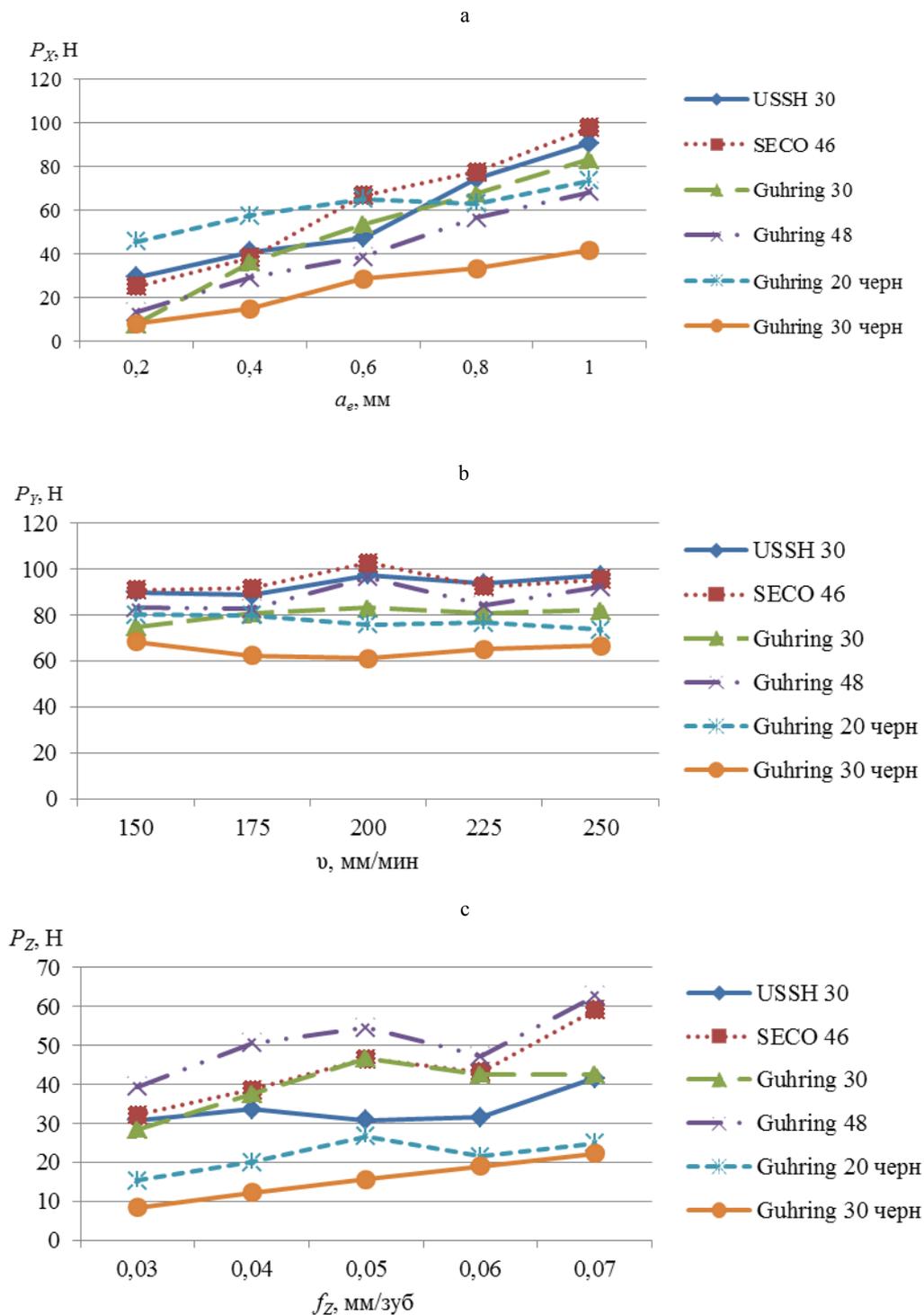


Рис. 9. Графики изменения составляющих P_x , P_y , P_z силы резания для различных фрез в зависимости от глубины врезания a_e (а), скорости резания v (б) и подачи на зуб f_z (с)
 Fig. 9. Graphs of changes in the components P_x , P_y , P_z of the cutting force for various cutters depending on the cutting depth a_e (a), cutting speed v (b) and feed to the tooth f_z (c)

С учетом полученных теоретических и экспериментальных зависимостей нормальной

силы и составляющих силы резания P_x , P_y , P_z определяется поправочный коэффициент на

силу резания при изменении угла наклона режущей кромки лезвия инструмента K_λ .

Значения коэффициента K_λ рассчитываются по следующим формулам:

– для нормальной силы

$$K_{\lambda N} = 1 \pm \frac{N_{\text{наиб}} - N_{\text{наим}}}{N_{\text{наиб}}},$$

– для составляющей силы резания P

$$K_{\lambda P} = 1 \pm \frac{P_{\text{наиб}} - P_{\text{наим}}}{P_{\text{наиб}}}.$$

Рассматривается диапазон λ от 30° до 60° , причем $\lambda_{\text{наим}}$ соответствует значениям $N_{\text{наиб}}$ и $P_{\text{наиб}}$, а $\lambda_{\text{наиб}}$ – $N_{\text{наим}}$ и $P_{\text{наим}}$. Принимается, что нормальная сила N прямо пропорционально связана с составляющими силы P_x, P_y, P_z .

В результате расчетов получены следующие значения поправочных коэффициентов на угол наклона режущей кромки:

– для теоретических зависимостей $K_{\lambda N} = 0,773$;

– для экспериментальных зависимостей:

$K_{\lambda P_x} = 0,775 - 0,820$; $K_{\lambda P_y} = 0,783 - 0,842$; $K_{\lambda P_z} = 1,158 - 1,167$, которые свидетельствуют о совпадении значения $K_{\lambda N}$ и $K_{\lambda P_x}, K_{\lambda P_y}$, полученных на основании теоретических расчетов и экспериментальных исследований.

Как следует из расчетов, увеличение угла наклона режущей кромки от 30° до 48° приводит к росту составляющей силы резания P_z (осевой) и падению составляющей силы резания P_y (тангенциальной) в 1,19–1,28 раза и P_x (радиальной) – в 1,22–1,29 раза.

Для использования полученных результатов при обработке материалов со свойствами, отличными от алюминиевого сплава марки Д16Т, воспользуемся данными справочника [3], в котором влияние свойств материала на скорость резания учитывается поправочным коэффициентом K_v . Скорость резания определяется по формуле

$$v = v_{Т6} K_v = \frac{C_v}{T^m f^x S^y} K_{Mv} K_{Пv} K_{Иv}, \quad (12)$$

где $v_{Т6}$ – табличное значение скорости резания; K_v – поправочный коэффициент на ско-

рость резания; C_v – поправочный коэффициент на свойства обрабатываемого материала; T – период стойкости инструмента; t – глубина резания; S – подача; m, x, y – показатели степени; K_{Mv} – коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала на скорость резания; $K_{Пv}$ – то же, учитывающий состояние поверхности заготовки; $K_{Иv}$ – то же, учитывающий материал инструмента.

Также учтем данные, приведенные в работе [8], по которым поправочный коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала на скорость резания, приравнивается к коэффициенту обрабатываемости $K_{Mv} = K_O = \frac{v_x}{v_{ст}}$ и коэффициент сравни-

тельной обрабатываемости цветных металлов рассматривается по отношению к стали 45, т. е. K_O для стали 45 принимается за единицу. С учетом такого подхода коэффициент обрабатываемости алюминиевого сплава концевыми фрезами из твердого сплава равен 1,3 [8, с. 33, табл. 1–3].

Воспользовавшись рекомендациями фирмы Guhring [табл. 2] по скорости резания стали $v_c = 175$ м/мин, при обработке алюминиевого сплава Д16Т, получим $v_d = v_c \cdot K_O = 175 \cdot 1,3 = 227,5$ м/мин. Полученное значение v_d находится в рекомендуемом диапазоне 200–415 м/мин.

С учетом поправочного коэффициента на угол наклона режущей кромки K_λ скорость при обработке алюминиевого сплава будет равна $v_{д\lambda} = v_{д6} \cdot K_\lambda = 200 \cdot (1,16 \div 1,23) = 232 \div 246$ м/мин. Тогда скорость резания для стали будет равна

$$v_{с\lambda} = \frac{v_{д\lambda}}{K_O} = \frac{232 \div 246}{1,3} = 178,5 \div 189 \text{ м/мин, что}$$

несколько выше рекомендуемого фирмой Guhring значения $v_c = 175$ м/мин.

Поправочный коэффициент на материал в формуле для расчета скорректированной скорости резания может быть получен из соотношения поправочных коэффициентов на угол $\lambda - K_\lambda$ и на обрабатываемость K_O :

$$K_{M\lambda} = \frac{K_{\lambda}}{K_0};$$

$$K_0 = \frac{v_x}{v_{\text{эт}}} = \frac{200}{175} = 1,14,$$

где $K_{\lambda} = 1,16-1,23$; $v_x = 200$ м/мин – скорость резания алюминиевого сплава [4, 10]; $v_{\text{эт}} = 175$ м/мин – скорость резания стали (эталонная).

Тогда $K_{M\lambda} = \frac{1,16 \div 1,23}{1,14} = 1,02 \div 1,14$, что

несколько меньше рекомендуемого значения $K_0 = 1,3$ [8].

То есть значение скорости резания стали будет равно: $v_c = v_{\text{ГБ}} K_{M\lambda}$, где $K_{M\lambda}$ будет учитывать сравнительную обрабатываемость стали и алюминиевого сплава и влияние угла наклона режущей кромки. Тогда $v_c = 175 \cdot (1,02 \div 1,14) = 178,5 \div 199,5$ м/мин.

Значения скорости резания стали, полученные первым ($v_c = 178-189$ м/мин) и вторым ($v_c = 178,5 \div 199,5$ м/мин) предложенными способами, практически совпадают, что свидетельствует о правильности подхода приравнивания поправочного коэффициента, учитывающего влияние свойств обрабатываемого материала на скорость резания, к коэффициенту сравнительной обрабатываемости алюминиевых и стальных материалов.

Полученные рекомендации использовались при изготовлении деталей, представленных на рис. 10. Сочетание сложнопрофильных поверхностей деталей обрабатывалось, как правило, одним инструментом – концевой и охватывающей фрезами за два установа (рис. 10а, б) и один установ (рис. 10с, d) на токарном станке с ЧПУ модели EMCO S45 и вертикально-фрезерном станке с ЧПУ модели FANUC Robodrill серии α -D21LiB соответственно.



Рис. 10. Образцы изготовленных деталей с цилиндрическими и плоскими (а), сферическими (б), коническими (с) и криволинейными (d) поверхностями

Fig. 10. Samples of manufactured parts with cylindrical and flat (a), spherical (b), conical (c) and curved (d) surfaces

При этом значения скорости резания назначались выше рекомендуемых в каталоге [4, 10], что позволило увеличить минутную подачу и производительность обработки в 1,2–1,3 раза, а также повысить точность получаемых поверхностей деталей за счет сокращения количества установов и смены баз.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена схема фрезерования плоской поверхности вращающейся заготовки на токарном станке и получены формулы для нормальной силы и силы трения. В результате анализа формул установлено уменьшение нормальной силы при увеличении угла наклона режущей кромки, что позволяет за счет изменения последнего управлять силой и мощностью резания.

2. Результаты экспериментальных исследований подтверждают полученные теоретические зависимости при фрезеровании заготовок концевой фрезой. С увеличением угла наклона режущих кромок в пределах 30° – 48° установлено уменьшение силы резания на 19–29 %. Уменьшению силы резания также способствует врезание фрезы в заготовку по касательной, попутное фрезерование вращающейся заготовки и прерывистость (уменьшение длины) режущей кромки. Полученные зависимости позволяют оптимизировать режим резания, повысить производительность обработки и эффективность использования мощности привода станка.

3. По результатам экспериментальных исследований установлено, что увеличение угла наклона главной режущей кромки лезвия фрезы λ с 30° до 48° при обработке лыски неподвижной заготовки обеспечивает снижение тангенциальной и радиальной составляющих силы резания на 20–30 %. При обработке вращающейся заготовки по схеме попутного фрезерования происходит снижение амплитудных значений тангенциальной и радиальной составляющих силы резания до 3 раз по сравнению с обработкой неподвижной заготовки,

а при встречном фрезеровании, наоборот, амплитудные значения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания увеличиваются с 400 до 3000 Н.

4. Установлены значения поправочных коэффициентов, учитывающих влияние угла наклона режущей кромки K_{λ} и свойств обрабатываемого материала K_{Mv} на силу и скорость резания в пределах $K_{\lambda} = 1,19$ – $1,29$ и $K_{Mv} = 1,02$ – $1,14$ соответственно, что позволяет при увеличении значений угла наклона режущей кромки с 30° до 48° обеспечить снижение силы резания на 19–29 %, увеличение скорости и производительности обработки в 1,19–1,29 раза при догрузке мощности приводов на 20–30 %.

5. Рекомендуется следующий алгоритм реализации скоростной обработки сложнопрофильных поверхностей (сочетание цилиндрических, конических, сферических и плоских) деталей: 1) выбор концевой фрезы с углом наклона режущей кромки $\lambda = 30^{\circ}$ – 60° ; 2) выбор схемы обработки поверхности детали с касательным движением резания; 3) увеличение скорости резания в 1,2–1,3 раза, что обеспечивает повышение производительности обработки до 1,3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н. Н. Динамика процесса резания фрезами с крутонаклонными режущими кромками / Н. Н. Попок, В. С. Анисимов, К. В. Корба // Инновационные технологические системы и процессы в машиностроении: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. С. 122–128.
2. Бобров, В. Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В. Ф. Бобров. М.: Машгиз, 1962. 152 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение-1, 2001. Т. 2. 912 с.
4. Guhring Super Line 2016 // Guhring. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/guehring/superline-2016/9235-706023.html>.

5. Справочник конструктора-инструментальщика / под общ. ред. В. И. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1994. 560 с.
6. Филиппов, Г. В. Режущий инструмент / Г. В. Филиппов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. 392 с.
7. Mitsubishi Materials. Каталоги. URL: <https://importtools.ru/brands/metall/mitsubishi-carbide/>.
8. Даниленко, Б. Д. Возможности использования показателя обрабатываемости материала в качестве поправочного коэффициента при расчете скорости резания / Б. Д. Даниленко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 2. С. 32–35.
9. Даниленко, Б. Д. Сравнительная обрабатываемость алюминиевых сплавов / Б. Д. Даниленко // СТИН. 2011. № 5. С. 15–18.
10. Seco. Catalog & Technical Guide 2020.2 // Seco. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/seco-tools/catalog-technical-guide-20202/5699-951358.html>.
2. Bobrov V. F. (1962) *The Influence of the Angle of Inclination of the Main Cutting Edge of the Tool on the Process of Cutting Metals*. Moscow, Mashgiz Publ. 152 (in Russian).
3. Dalsky A. M., Kosilova A. G., Meshcheryakov R. K., Suslov A. G. (eds.). (2001) *Mechanical Engineer's Handbook. Vol. 2. 5th Ed.* Moscow, Mashinostroenie-1 Publ. 912 (in Russian).
4. Guhring. Super Line 2016. *Guhring*. Available at: <https://pdf.directindustry.com/pdf/guehring/superline-2016/9235-706023.html>.
5. Baranchikov V. I. (ed.). (1994) *Handbook of the Toolmaker-Designer*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 560 (in Russian).
6. Filippov G. V. (1981) *Cutting Tools*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch. 392 (in Russian).
7. Mitsubishi Materials. Catalog. Available at: <https://importtools.ru/brands/metall/mitsubishi-carbide>.
8. Danilenko B. D. (2013) Possibilities of Using the Material Machinability Index as a Correction Factor when Calculating the Cutting Speed. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, (2), 32–35 (in Russian).
9. Danilenko B. D. (2011) Comparative Machinability of Aluminum Alloys. *STIN [Machines. Tools]*, (5), 15–18 (in Russian).
10. Seco. Catalog & Technical Guide 2020.2. *Seco*. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/seco-tools/catalog-technical-guide-20202/5699-951358.html>.

Поступила 29.10.2024

Подписана в печать 09.01.2025

Опубликована онлайн 30.05.2025

REFERENCES

Received: 29.10.2024

Accepted: 09.01.2025

Published online: 30.05.2024