

УДК 621.91.01

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-28-34

**ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ
НА СТАНКЕ С ЧПУ****д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК, В.С. АНИСИМОВ***(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Рассматривается повышение производительности обработки сложнопрофильных поверхностей деталей и эффективности мощности приводов станка с ЧПУ путем использования концевых фрез с крутонаклонными режущими кромками. Приведены зависимости изменения сил резания от времени и режимов обработки фрезами различных фирм-производителей.

Ключевые слова: *сложнопрофильная поверхность, деталь, концевая фреза, сила резания, мощность привода, производительность, станок с ЧПУ.*

Введение. В современной технике широко применяются детали, форма которых включает сочетание различных поверхностей: цилиндрических, конических, сферических, винтовых, плоских и криволинейных, например, шаровые пальцы рычагов автомобилей, оси тяги ремизы, тройники запорной арматуры, корпуса с полостями, матрицы и пуансоны штампов, кулачки и эксцентрики механизмов автоматов и т.п. При механической обработке таких поверхностей деталей на станках с ЧПУ реализуются сложные кинематические схемы и траектории резания, переменные величины скоростей и подач заготовки и режущего инструмента. Стремление в этом случае повысить производительность обработки за счет увеличения значений скорости и подачи приводит к снижению потребляемой мощности приводов станка и неэффективной их загрузке. То есть требуется увеличить производительность обработки сложнопрофильных поверхностей деталей при обеспечении максимально возможных значений потребляемой мощности приводов станков с ЧПУ и сохранении требуемой стойкости режущих инструментов.

Одним из путей решения этой задачи является использование вращающихся инструментов: концевых фрез, ротационных резцов и т.п., обеспечивающих касательное движение крутонаклонных режущих кромок¹. Тенденция по все более широкому применению таких типов инструментов прослеживается в ряде ведущих зарубежных фирм, таких, например, как «SandvikCoromant» (Швеция), «Seco» (Япония), «Hertel» (Германия), «Guhring» (Германия), «Iscar» (Израиль), «TaeguTec» (Корея) и др.². При этом не обосновывается, за счет каких кинематических, физических и технологических особенностей обеспечиваются преимущества касательного движения резания и режущих инструментов с крутонаклонными кромками. В ряде ранее проведенных исследований явлений, сопровождающих сложные виды обработки резанием, например, Г.И. Грановским [1], В.Ф. Бобровым [2], Е.Г. Коноваловым [3], П.И. Ящерицыным [4] и др. эти преимущества доказаны, но в основном для традиционно используемых в то время величин скоростей и мощностей приводов станков, возможностей реализации трех- и пятиосевой обработки на станках с ЧПУ, применения прогрессивных режущих инструментов, в т.ч. с износостойким покрытием и т.п. В настоящее время актуальным является исследование кинематических и физических характеристик скоростных видов обработки сложнопрофильных поверхностей деталей на одном рабочем месте – станке с ЧПУ вращающимися режущими инструментами с касательным движением крутонаклонной режущей кромки [5; 6].

В данной работе рассматриваются результаты исследований силы резания концевыми фрезами с различными углами наклона режущей кромки.

Основная часть. Экспериментальные исследования сил резания проводились на вертикальном обрабатывающем центре FANUC Robodrill серии a-D21LiB. Технические характеристики станка: частота вращения шпинделя – 10 000 мин⁻¹, программируемая рабочая подача – 30 000 мм/мин, мощность главного двигателя – 7,5 кВт, размеры рабочей зоны – 700×400×330 мм. Форма заготовки – цилиндрическая, материал заготовки – сплав алюминия марки Д16Т. В качестве режущего инструмента использовались концевые фрезы различных фирм, наименование и геометрические параметры которых представлены в таблице 1.

Измерение сил резания производилось с использованием специального сконструированного и изготовленного в условиях научно-исследовательской лаборатории программно-измерительного комплекса (ПИК), включающего (рисунок 1): установочное приспособление фирмы System 3R (Швеция); усилители сигналов акселерометров фирмы Briel Kjaer (Дания); функциональные модули сбора данных для первичного преобразования и их оцифровки с акселерометра; тензометрический преобразователь фирмы National Instruments (США); шасси сбора данных для передачи уже 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.

¹ ГОСТ 25762. Обработка резанием. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 24 с.

² SECO. Каталог. Техническое руководство, 2020. – 435 с.

Таблица 1. – Наименование и геометрические параметры концевых фрез

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, $r_b = 0,6$ мм; $r_{вн} = 0,3$ мм)	(0,1)	20	$10^\circ 30' \pm 10'$	$2^\circ \pm 10'$	4
Guhring #5504 12R-NRF (шаг зубьев 1,3 мм, $r_b = 0,6$ мм; $r_{вн} = 0,3$ мм)	(0,5)	30	$10^\circ 30' \pm 10'$	$2^\circ \pm 10'$	4



1 – установочное приспособление; 2 – усилители сигналов акселерометров; 3 – функциональные модули сбора данных; 4 – шасси сбора данных; 5 – первичный тензометрический преобразователь

Рисунок 1. – Программно-измерительный комплекс

Заготовка диаметром D размещается в установочном приспособлении ПИК (рисунок 2) и имеет возможность вместе поступательно перемещаться вдоль осей X или Y в движении подачи D_s . Фрезу установили в шпинделе станка по оси Z на глубину врезания A и глубину резания t (ширину фрезерования b) с возможностью главного вращательного движения D_r .

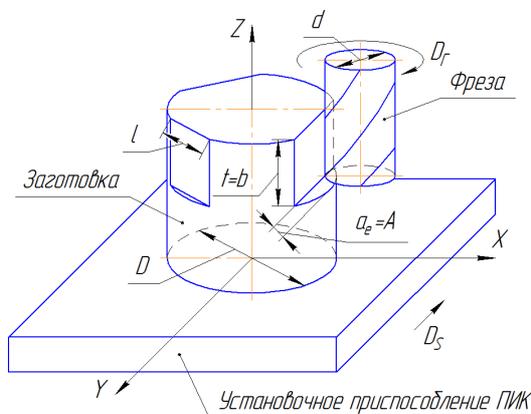


Рисунок 2. – Схема проведения эксперимента

В ходе эксперимента производилась последовательная обработка плоской поверхности сегмента заготовки длиной l (рисунок 3).

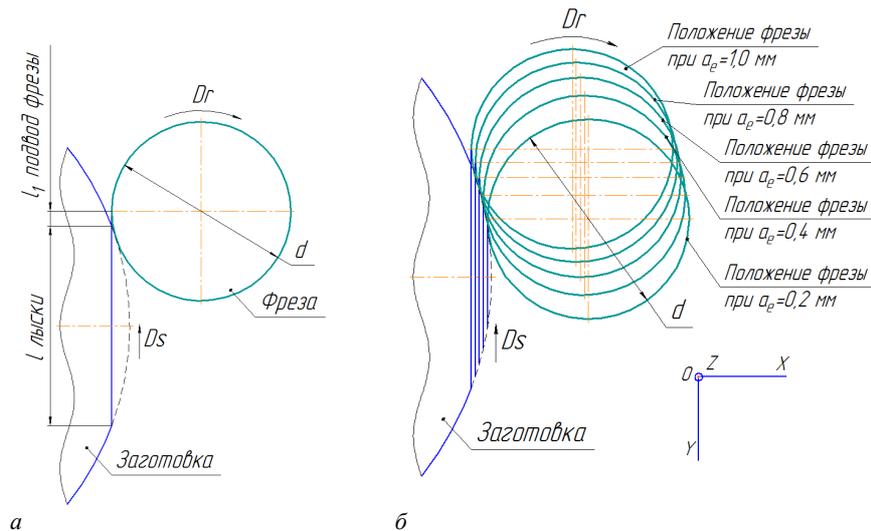


Рисунок 3. – Схема обработки лыски заготовки (а) и начальные положения фрезы при срезании слоя толщиной a_{ei} (б)

На каждый последующий проход фрезы в движении подачи Ds заготовка поворачивалась на очередной обрабатываемый сегмент длиной l лыски, при этом учитываются увеличивающиеся длины контакта подвода фрезы l_1 и глубины резания a_e от 0,2 до 1,0 мм. 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 выбирались рекомендуемые^{3,4} элементы режима резания v , S , t (таблица 2) и согласовывались с техническими характеристиками станка (таблица 3).

Таблица 2. – Рекомендуемые значения элементов режима резания

Наименование фрезы	Скорость резания v , м/мин	Глубина резания a_e , мм	Ширина врезания a_p , мм	Подача на зуб f_z , мм/зуб	Обрабатываемый материал
USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65	140–250	$=0,1D$	$=1D$	0,03–0,08	сталь
SECO JS514100D2C.0Z4-NXT 5115144-059	500 (400–600)	$=0,3D$	$=1D$	0,090	алюминий
	205 (175–235)			0,095	сталь
Guhring #19978 10 WN R-N	180–220	$=0,1D$	$=1D$	0,059	алюминий
	306–374			0,065	
	373–457			0,059	сталь
	157–193			0,053–0,059	
Guhring #6765 10 WN R-RF1	340	$=0,1D$	$=0,8D$	0,138	сталь
	360	$=0,02D$		0,066	
Guhring #19964 10WNR-HRF (шаг зубьев 1 мм, $r_b = 0,6$ мм; $r_{вн} = 0,3$ мм)	72–88	$=(0,5 \times 1)D$	$=1D$	0,018	сталь
	87–143			0,025–0,030	
Guhring #5504 12R-NRF (шаг зубьев 1,3 мм, $r_b = 0,6$ мм; $r_{вн} = 0,3$ мм)	97–119	$=(0,5 \times 1)D$	$=1D$	0,036–0,046	сталь
	87–143			0,046–0,048	

Таблица 3. – Элементы режима резания, согласованные с техническими характеристиками станка

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

³ Каталог инструментов GuhringSuperLine, 2016. – 150 с.

⁴ Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 912 с.

Окончание таблицы 3

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

Последовательность изменения элементов режима резания в опытах составляется таким образом, чтобы учесть особенности как одно-, так и трехфакторного экспериментов (таблица 4).

Таблица 4. – Значения элементов режима резания в опытах эксперимента

№ 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 рисунке 4 показаны фрагменты осциллограмм с дисплея ПИК амплитудных изменений составляющих силы резания в течение времени подвода фрезы и обработки лыски (сегмента) невращающихся и вращающихся заготовок при глубине врезания $a_e = 1,0$ мм, ширине резания $a_p = 1,0$ мм, минутной подаче $f_m = 1300$ мм/мин, частоте вращения шпинделя $n = 6400$ мин⁻¹. Осциллограммы позволяют установить изменения значений составляющих силы резания при входе и выходе фрезы в зону резания и значения силы резания по длине обработки сегмента заготовки.

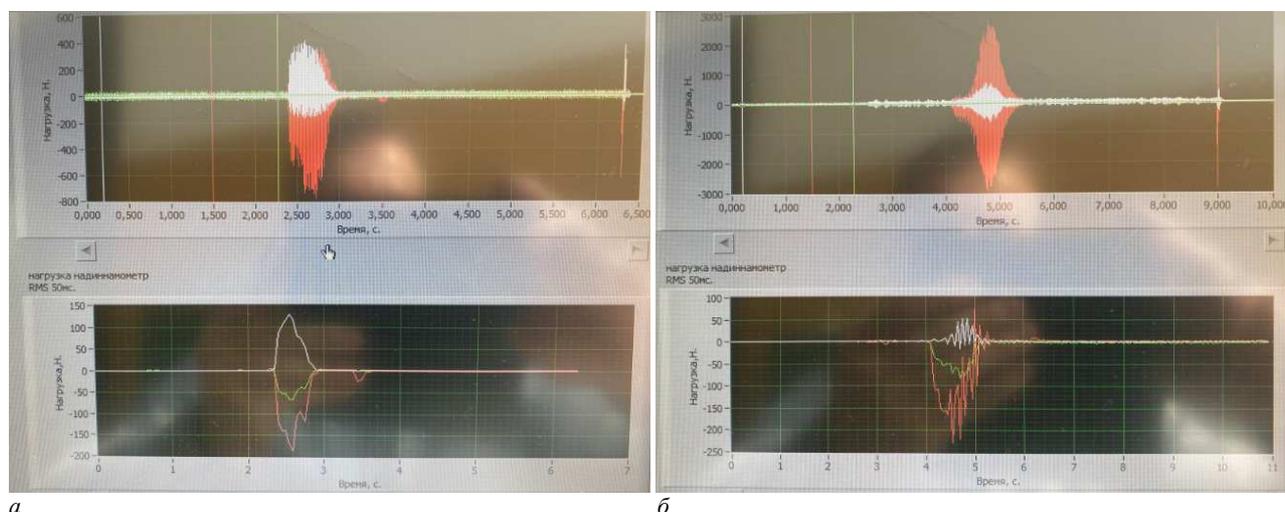


Рисунок 4. – Фрагменты осциллограмм амплитудных изменений составляющих силы резания при обработке невращающейся (а) и вращающейся (б) заготовок при встречном фрезеровании

Время фиксации силы резания на дисплее сопоставляется со временем обработки лыски (таблица 5). При обработке каждого последующего сегмента возрастает время обработки τ от 0,2 до 1,5 с, длина лыски l от 5 до 11 мм и глубина врезания a_e от 0,2 до 1,0 мм.

Таблица 5. – Расчетное время обработки лыски

№ опыта	Длина лыски l , мм	Длина подвод фрезы l_1 , мм	Время обработки τ , с	№ опыта	Длина лыски l , мм	Длина подвод фрезы l_1 , мм	Время обработки τ , с
1	5,0438	0,4347	0,17711	11	11,1355	0,9899	0,65307
2	7,1106	0,6188	0,24987	12	11,1355	0,9899	0,55963
3	8,681	0,7627	0,30529	13	11,1355	0,9899	0,48992
4	9,992	0,8825	0,35155	14	11,1355	0,9899	0,43512
5	11,1355	0,9899	0,39198	15	11,1355	0,9899	0,39198
6	11,1355	0,9899	0,91397	16	5,0438	0,4347	0,41295
7	11,1355	0,9899	0,68570	17	5,0438	0,4347	0,29507
8	11,1355	0,9899	0,54866	18	11,1355	0,9899	1,52202
9	11,1355	0,9899	0,45727	19	5,0438	0,4347	0,68768
10	11,1355	0,9899	0,39198				

Полученные осциллограммы обрабатываются соответствующим образом (пересчитываются) по максимальным и минимальным пикам изменения силы резания и приводятся к виду, фрагментарно представленному на рисунке 5. В данном случае количество записанных блоков данных характеризует чувствительность применяемой регистрирующей аппаратуры, которая позволяет фиксировать 25 000 сигналов в 1 с (1 с соответствует 20 блокам).

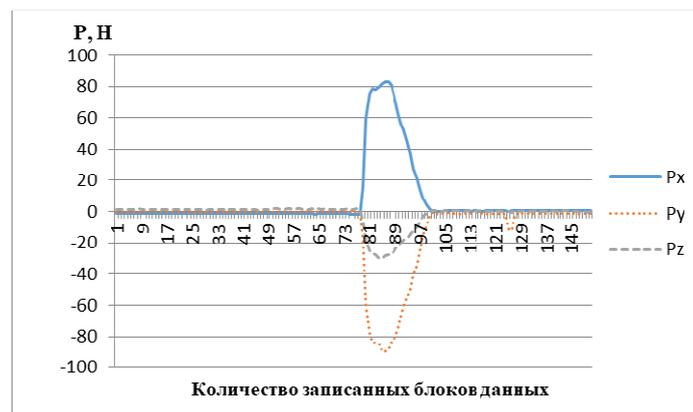


Рисунок 5. – Фрагмент обработанной осциллограммы

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 рисунке 6.

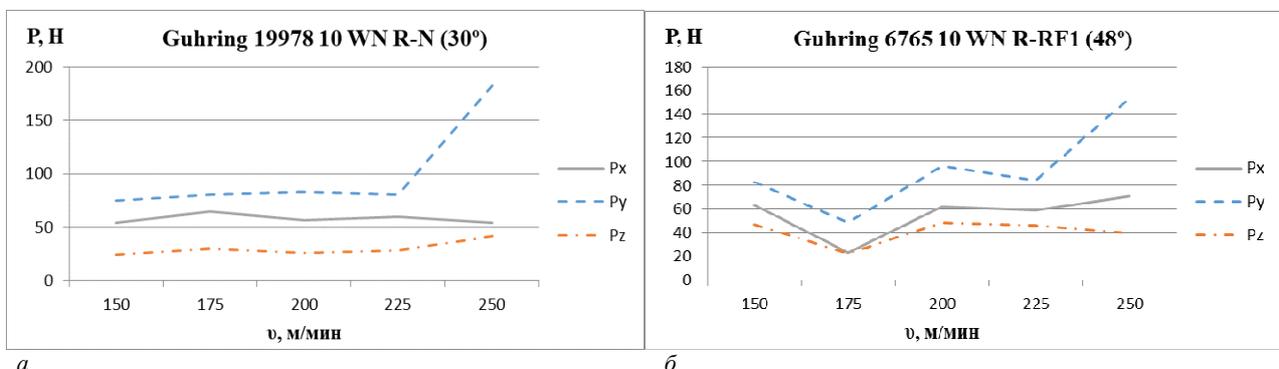
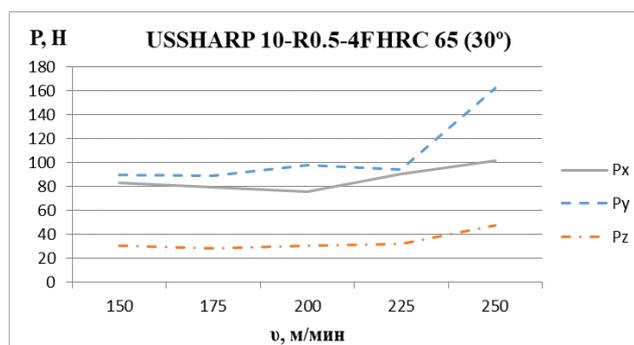


Рисунок 6. – Зависимости изменения составляющих силы резания P_x , P_y , P_z от скорости резания при обработке фрезами Guhring 19978 10 WN R-N (30°) (а), Guhring 6765 10 WN R-RF1 (48°) (б), USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65 (30°) (в) (начало)

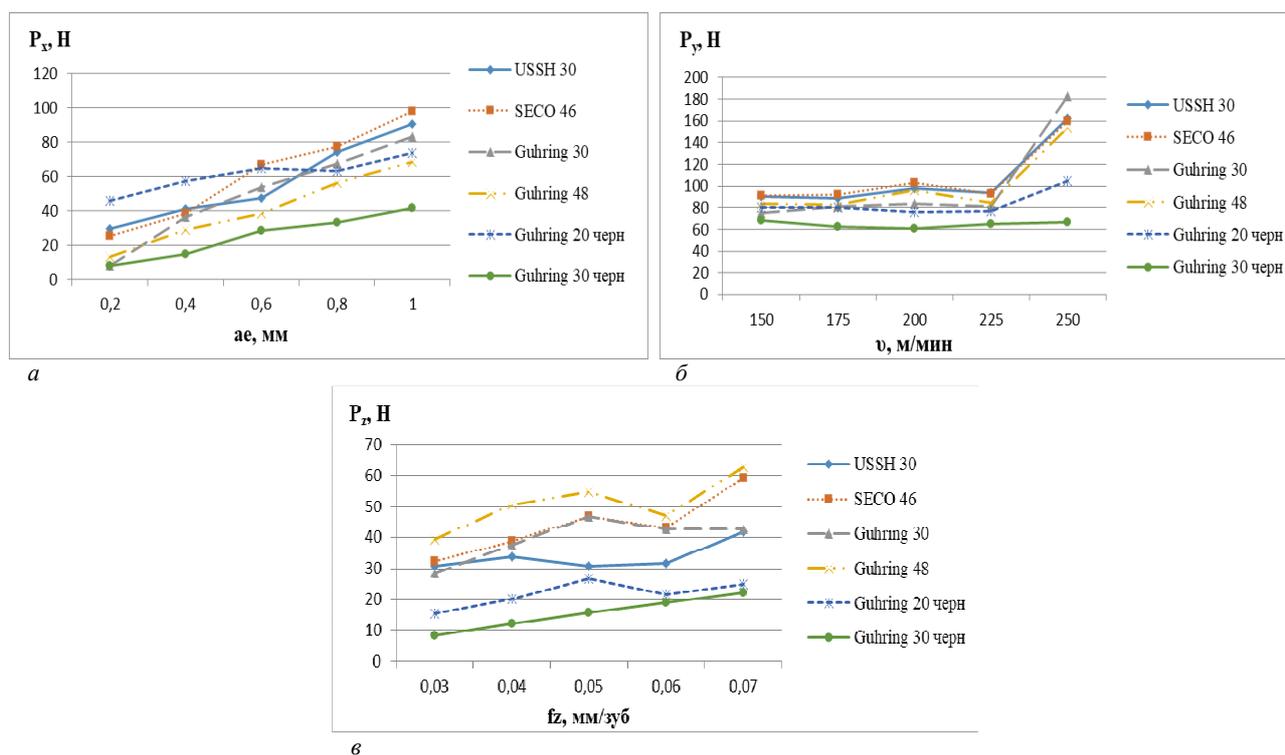


б

Рисунок 6. – Зависимости изменения составляющих силы резания P_x , P_y , P_z от скорости резания при обработке фрезами Guhring 19978 10 WN R-N (30°) (а), Guhring 6765 10 WN R-RF1 (48°) (б), USSHARP 10-R0.5-4F HRC 65 (30°) (в) (окончание, начало – с. 32)

Как видно из графиков, с увеличением значений скорости резания от 150 до 250 м/мин составляющие силы резания P_x и P_z изменяются незначительно, а значения P_y в диапазоне 225–250 м/мин резко возрастают, что объясняется, по-видимому, образованием наплыва на передней поверхности лезвия в выбранном диапазоне скорости резания, который увеличивает отрицательные значения переднего угла и, следовательно, составляющие силы резания P_y .

Сопоставление значений составляющих силы резания P_x , P_y , P_z для различных фрез и при изменении элементов режима резания представлено на рисунке 7.



а

б

в

Рисунок 7. – Зависимости изменения составляющих P_x , P_y , P_z силы резания для различных фрез от глубины резания a_e (а), скорости резания v (б) и подачи на зуб f_z (в)

Наибольшее влияние на составляющие P_x и P_z оказывает увеличение значений a_e и f_z (см. рисунок 7), 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 225 м/мин практически не влияет на изменения составляющей силы резания P_y . При значении v более 225 м/мин значения составляющей силы резания P_y резко возрастает.

Заключение. Согласно результатам проведенных исследований, при увеличении угла наклона главной режущей кромки лезвия фрезы λ° с 30° до 48° происходит снижение составляющих силы резания P_x , P_y , P_z на

17–24% при обработке лыски неподвижной заготовки. При обработке вращающейся заготовки в попутном фрезеровании происходит снижение амплитудных значений составляющих силы резания P_x , P_y , P_z до 3 раз по сравнению с неподвижной заготовкой, а при встречном фрезеровании, наоборот, амплитудные значения увеличиваются с 400 до 3000 Н. При обработке неподвижной заготовки фрезой с прерывистой режущей кромкой происходит снижение составляющих силы резания P_x , P_y , P_z до 2 раз, а при увеличении угла наклона главной режущей кромки лезвия λ° этой фрезы с 20 до 30° составляющие силы резания уменьшаются до 2,5–3 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский Г.И. Кинематика резания. – М.: Машгиз, 1948. – 199 с.
2. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 152 с.
3. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. – Минск: Наука и техника, 1972. – 272 с.
4. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицин, А.В. Борисенко, И.Г. Дривотин и др. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 229 с.
5. Попок Н.Н., Анисимов В.С. Кинематика обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2019. – № 11. – С. 31–38.
6. Попок Н.Н., Анисимов В.С. Деформация и стружкообразование при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2020. – № 3. – С. 28–34.

REFERENCES

1. Granovskii, G.I. (1948). *Kinematika rezaniya*. Moscow: Mashgiz. (In Russ.)
2. Bobrov, V.F. (1962). *Vliyaniye ugla naklona glavnoi rezhushchei kromki instrumenta na protsess rezaniya metallov*. Moscow: Mashgiz. (In Russ.)
3. Konovalev, E.G., Sidorenko, V.A. & Sous', A.V. (1972). *Progressivnye skhemy rotatsionnogo rezaniya metallov*. Minsk: Nauka i tekhnika. (In Russ.)
4. Yashcheritsin, P.I., Borisenko, A.V., Drivotin, I.G. & Lebedev, V.Ya. (1987). *Rotatsionnoe rezanie materialov*. Minsk: Nauka i tekhnika. (In Russ.)
5. Popok, N.N. & Anisimov, V.S. (2019). Kinematika obrabotki poverkhnostei detalei vrashchayushchimsya rezhushchim instrumentom s kasatel'nym dvizheniem rezhushchei kromki [Kinematics of processing surfaces of parts with a rotating cutting tool with tangential movement of the cutting edge]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 11, 31–38. (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Popok, N.N. & Anisimov, V.S. (2020). Deformatsiya i struzhkoobrazovanie pri obrabotke ploskikh i krivolineinykh poverkhnostei detalei vrashchayushchimsya re-zhushchim instrumentom na tokarnykh i frezernykh stankakh s ChPU [Deformation and chip formation when processing flat and curved surfaces of parts with a rotating cutting tool on cnc lathes and milling machines]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 3, 28–34. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 26.01.2024

DYNAMICS OF MECHANICAL MACHINING WITH END MILLS ON CNC MACHINE

N. POPOK, V. ANISIMOV
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

Increasing the productivity of processing complex-profile surfaces of parts is considered and power efficiency of CNC machine drives by using end mills with steep cutting edges. Dependences of changes in cutting forces on time and processing modes using milling cutters from various manufacturers are given.

Keywords: complex surface, part, end mill, cutting force, drive power, productivity, CNC machine.