

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З АЛЮМІНІЮ

Рассматривается измерение составляющих сил резания при исследовании процесса финишной обработки тонкостенных деталей, изготовленных из алюминиевого сплава, концевой фрезой. При этом проводится расчет теоретических значений составляющих сил резания и получение математических зависимостей результирующей силы резания от исходных режимов резания, а также анализ адекватности полученных математических моделей. Полученные математические модели по результатам контрольных измерений составляющих сил резания адекватны изучаемому процессу.

Measuring of components of cutting forces is examined at research process of finish treatment of the thin-walled details, made from an aluminium alloy, by an end milling cutter. The calculation of theoretical values of components of cutting forces and receipt of mathematical dependences of resulting cutting force is thus conducted from the initial cutting parameters, and also analysis of adequacy of the got mathematical models. The got mathematical models on results the control measurings of components of cutting forces are adequate the studied process.

У сучасному виробництві велика частина корпусних деталей складної форми виготовляється переважно фрезерною обробкою. При цьому необхідно забезпечити високу якість обробленої поверхні, а також продуктивність механічної обробки, особливо при фінішній обробці тонкостінних деталей.

Ефективним методом вирішення даної задачі є автоматизація і керування технологічного процесу. Для виконання керування необхідно вибрати непрямий параметр, на основі якого виконується керування. Одним із таких інформативних параметрів є сила різання, дослідження якої розглянуто в достатньо великій кількості робіт [1, 2, 3].

Тому задачею є дослідити процес фінішної обробки кінцевою фрезою та визначити залежність сили різання від режимів обробки, створити математичні моделі процесів обробки з подальшим їх використанням в системі керування.

Перед проведенням експерименту було проведено теоретичні розрахунки складових сили різання за методикою, яку наведено в [4, 5]. Схема дії складових сил різання при фрезеруванні кінцевою фрезою за подачею за вказаною методикою представлена на рис. 1.

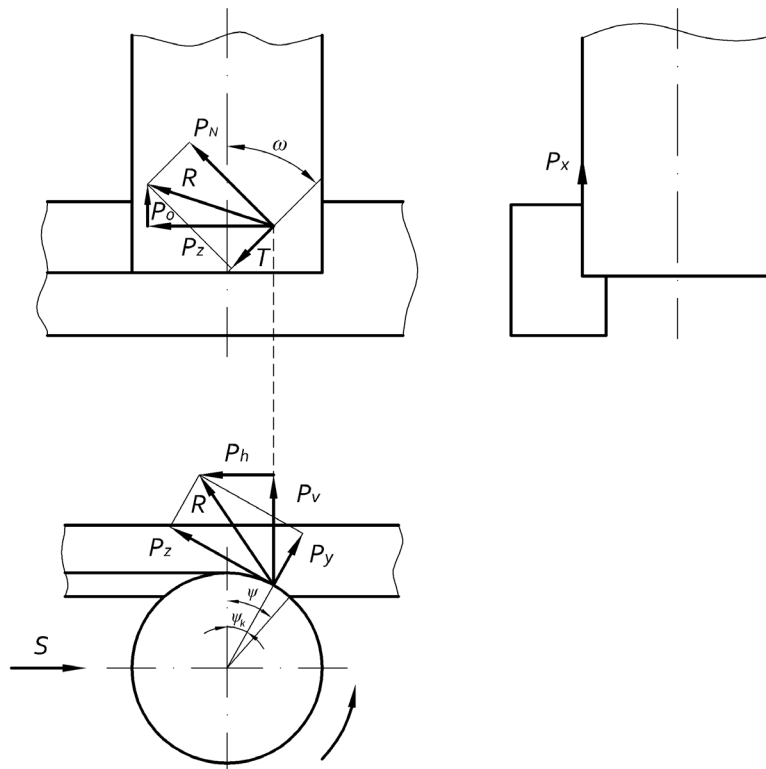


Рис. 1. Схема дії складових сил різання при фрезеруванні кінцевою фрезою за подачею

В схемі використанні такі позначення: P_z – колова (тангенціальна) складова сили різання; P_x – осьова складова сили різання при обробці торцем фрези; P_y – радіальна складова сили різання; P_v – вертикальна складова сили різання; P_h – горизонтальна складова сили різання; P_o – осьова складова сили різання; P_n – складова сили різання по нормалі; T – складова сили різання за дотичною до гвинтових канавок; R – рівнодіюча сила; S – напрямок подачі; V – напрямок швидкості різання; ω – кут підйому зуба; ψ – кут контакту фрези, ψ_k – кут контакту фрези в точці k .

За методикою, головна складова сили різання P_z при фрезеруванні розраховується за формулою:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n_{cm}^w} \cdot K_{mp}$$

де K_{mp} – поправочний коефіцієнт на якість оброблюваного матеріалу;

C_p – коефіцієнт, що враховує умови обробки;

x, y, u, q, w – показників степеня;

S_z – подача; t – глибина фрезерування;

B – ширина фрезерування; D – діаметр фрези;

z – кількість зубів фрези; n_{cm} – кількість обертів

Початковими даними при теоретичному розрахунку складових сил різання є характеристики різального інструменту (діаметр фрези $D = 16$ мм; кількість зубів фрези $z = 3$), початкові режими фрезерування (ширина фрезерування $B = 1.3$ мм; глибина фрезерування $t = 0.5.1$ мм; подача $S_m = 50.200$ мм/хв; кількість обертів $n = 1120.2240$ об/хв) та наступні коефіцієнти: $K_{mp} = 1$; $C_p = 68.2$; $x = 0.86$; $y = 0.72$; $u = 1$; $q = 0.86$; $w = 0$.

Після проведення розрахунків фрезерування алюмінієвого сплаву кінцевою фрезою отримуємо теоретичні значення тангенціальної складової сили різання P_z . Інші значення складових сил розраховуються з наступних співвідношень:

$$P'_v(P_x) = 0.75 \cdot P'_z ;$$

$$P'_h(P_y) = 0.85 \cdot P'_z ;$$

$$P'_y = 0.35 \cdot P'_z ;$$

$$P'_o(P_z) = 0.28 \cdot P'_z \cdot \text{tg}(\omega) ;$$

$$P'_z = 0.5 \cdot P'_z .$$

де $P'_z, P'_v, P'_h, P'_y, P'_o$ – складові сили різання за схемою розподілення сил, що наведено на рис. 1.

P_x, P_y, P_z – складові сили різання за координатами вимірювання УДМ-600 та координатами верстата, які показано на ескізі (рис. 2).

Узагальнені результати теоретичного розрахунку складових сил різання наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку значень складових сил різання

B	t	Sm	Sz	n	V	P'z	P'v (Px)	P'h (Py)	P'y	P'o (Pz)	Pz
мм	мм	мм/хв	мм/зуб	об	м/хв	Н	Н	Н	Н	Н	Н
1	1	200	0,030	2240	112,54	3,75	2,81	3,19	1,31	0,38	1,88
1	1	100	0,019	1800	90,43	2,67	2,00	2,27	0,93	0,27	1,33
1	1	50	0,015	1120	56,27	2,28	1,71	1,94	0,80	0,23	1,14
1,5	1	200	0,037	1800	90,43	6,59	4,94	5,60	2,31	0,67	3,29
1,5	0,75	100	0,024	1400	70,34	3,74	2,81	3,18	1,31	0,38	1,87
1,5	0,75	200	0,030	2240	112,54	4,40	3,30	3,74	1,54	0,45	2,20
1,5	0,5	200	0,048	1400	70,34	4,35	3,26	3,70	1,52	0,44	2,18
3	1	200	0,030	2240	112,54	11,26	8,44	9,57	3,94	1,15	5,63
3	1	100	0,019	1800	90,43	8,00	6,00	6,80	2,80	0,82	4,00
3	0,75	100	0,019	1800	90,43	6,25	4,69	5,31	2,19	0,64	3,12
3	0,5	200	0,048	1400	70,34	8,70	6,53	7,40	3,05	0,89	4,35
3	0,5	100	0,030	1120	56,27	6,20	4,65	5,27	2,17	0,63	3,10

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено план досліджень, в якому при постійних значеннях геометрії і матеріалу інструменту і оброблюваного матеріалу змінювались режими обробки, зокрема глибина і ширина фрезерування, подача та швидкість обертів шпинделя. В якості заготовки для експериментальних досліджень процесу фінішного фрезерування було обрано заготовку алюмінієвого сплаву АК-6, ескіз якої представлений на рис. 2.

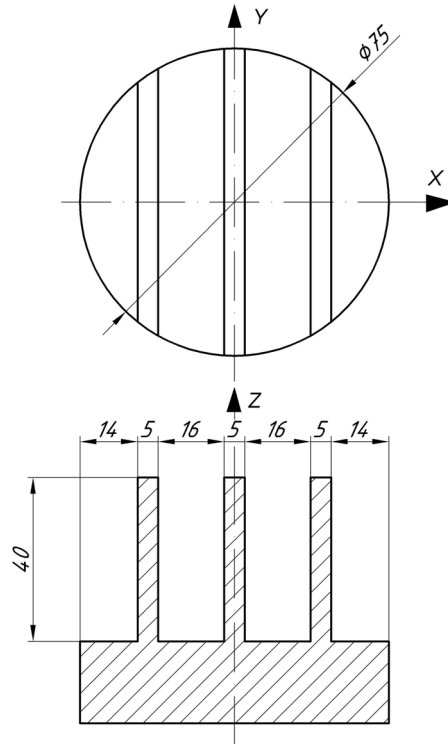


Рис. 2. Ескіз заготовки з алюмінієвого сплаву

Експериментальні дослідження силових характеристик процесу фрезерування проводились на стенді, представленого на рис. 3, на основі вибраної методики визначення силових характеристик [6].

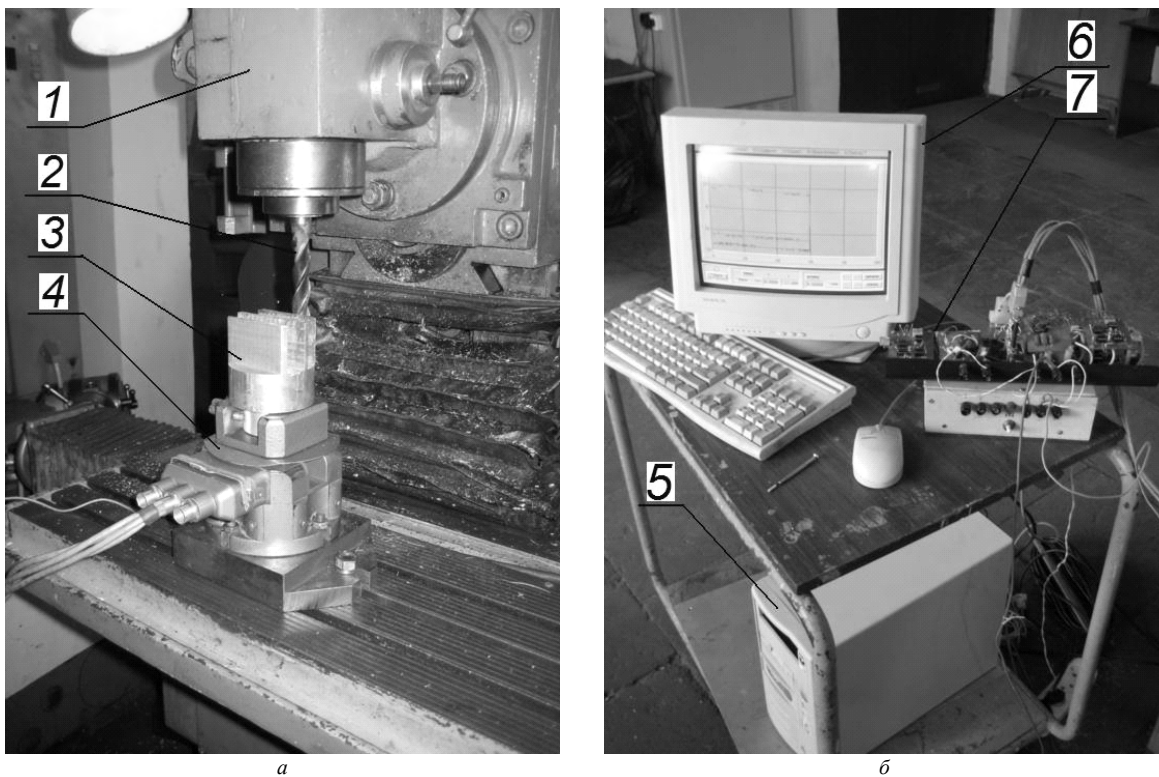


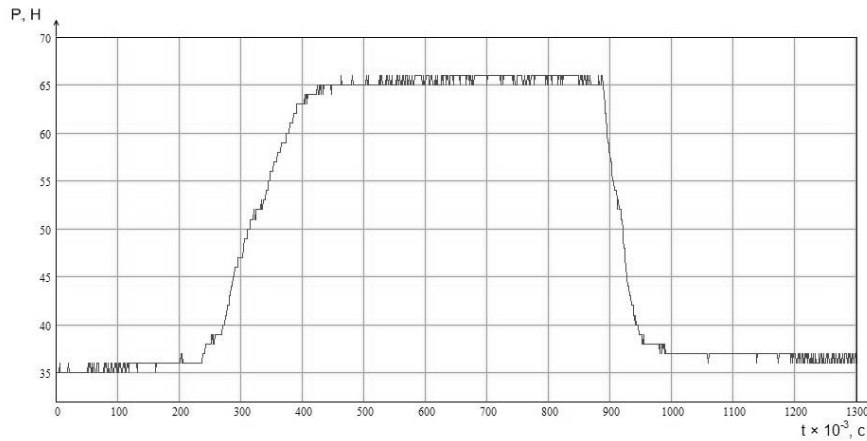
Рис. 3. Стенд експериментальних досліджень

До складу стенду входить фрезерний верстат 6Б75ВФ1 (поз. 1), та стандартний комплект вимірювальних приладів: динамометр УДМ-600 (поз. 4), кінцева фреза з швидкорізальної сталі Р18 (поз. 2), заготовка із алюмінієвого сплаву АК6 (поз. 3), дисплей, на який виводяться результати вимірювань (поз. 6), ПК, на якому

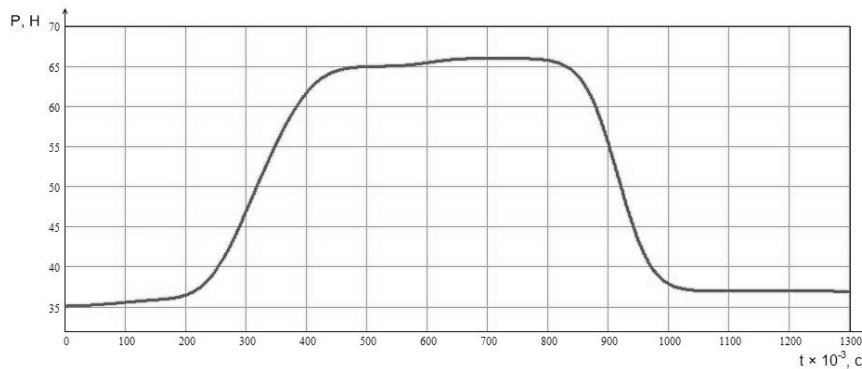
обробляється і зберігається інформація (поз. 5), блок АЦП моделі «L-126» (поз. 7). Дані виводяться на екран і зберігаються на ПК, з можливістю збереження на інших носіях інформації.

Тарирування силовимірювального датчика проводилося за методикою ВНДІ Інструменту за допомогою еталонного динамометра ДОСМ-3-50 систем Н.Т. Токаря (ГОСТ 9500-84 зі змінами від 23.06.2009) і також записувалося в окремі файли для P_x , P_y , P_z відповідно.

Для кращого відображення кривих і подальшої їх обробки, використовувались наступні функції згладжування MathCad: medsmooth та ksmooth. Результати тарирування осей OX, OY, OZ проводились за однаковою методикою. Інформація, що виводиться на екран при тарируванні каналу за віссю OY з подальшою обробкою представлено на рис. 4.



a



б

Рис. 4. Інформація, що виводиться на екран при тарируванні каналу за віссю OY до (а) та після (б) обробки в MathCad

Аналогічні дослідження проводилися для кожної осі з визначенням масштабних коефіцієнтів, які використовувались при визначенні реальних значень експериментальних значень складових сил різання.

Експеримент проводився за початковими даними табл. 1. Для ілюстрації обробки експериментальних даних на рис. 5 представлено інформацію, що виводиться на дисплей ПК при фрезеруванні з наступними режимами: ширина фрезерування $B = 1,5$ мм, глибина фрезерування $t = 0,5$ мм, подача $S_z = 0,048$ мм/зуб, швидкість різання $V = 70,34$ м/хв.

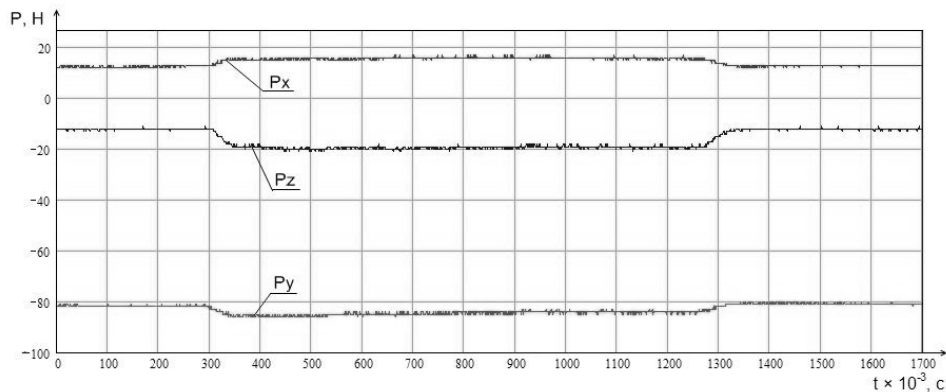
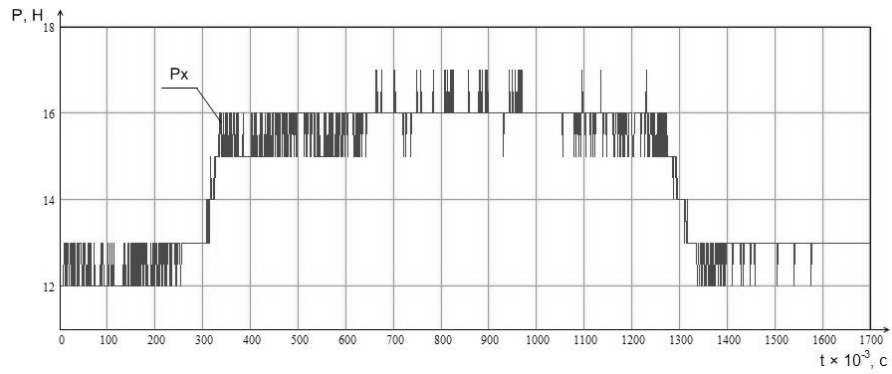
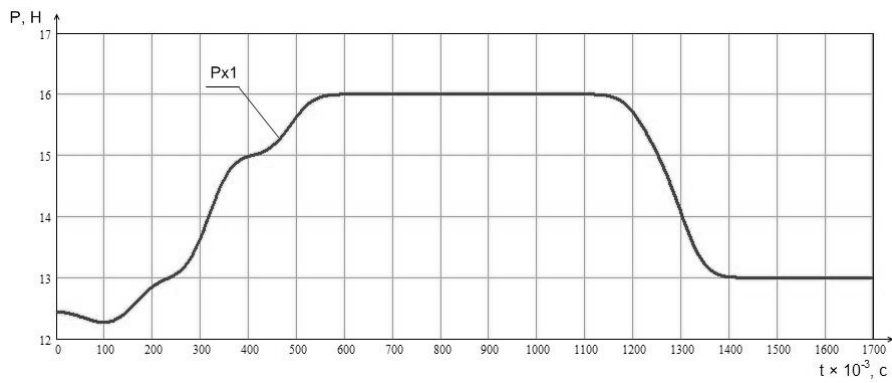


Рис. 5. Інформація, що виводиться на екран при вимірюванні складових сил різання

Обробка складових сил різання проводилась для кожного каналу і показана на рис. 6, 7, 8.

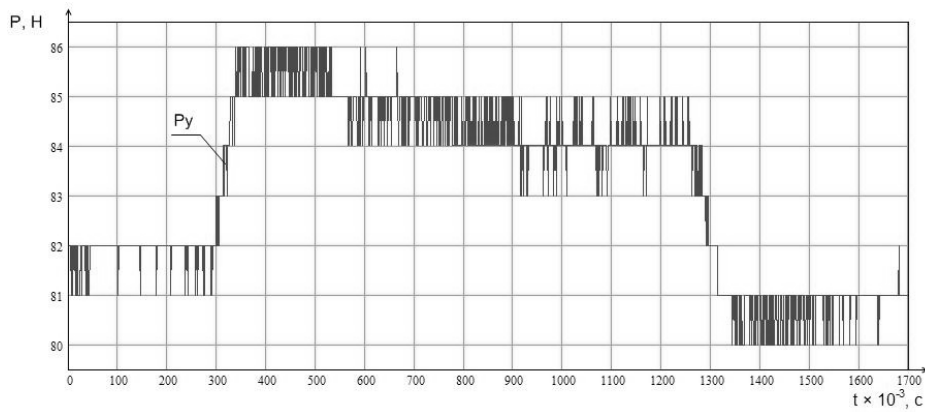


a

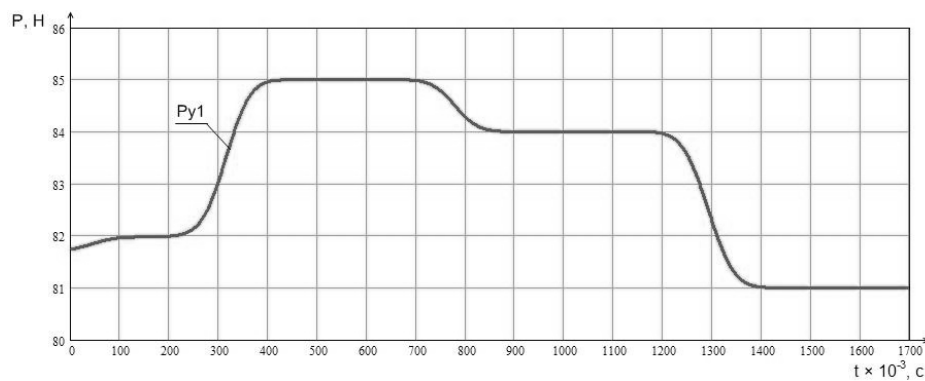


б

Рис. 6. Діаграми експериментального сигналу складової сили різання P_x (а) та згладженої кривої P_{x1} (б)

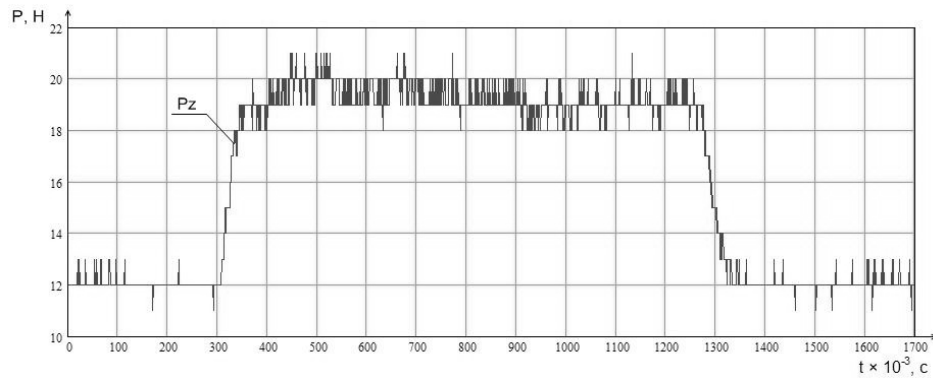


a

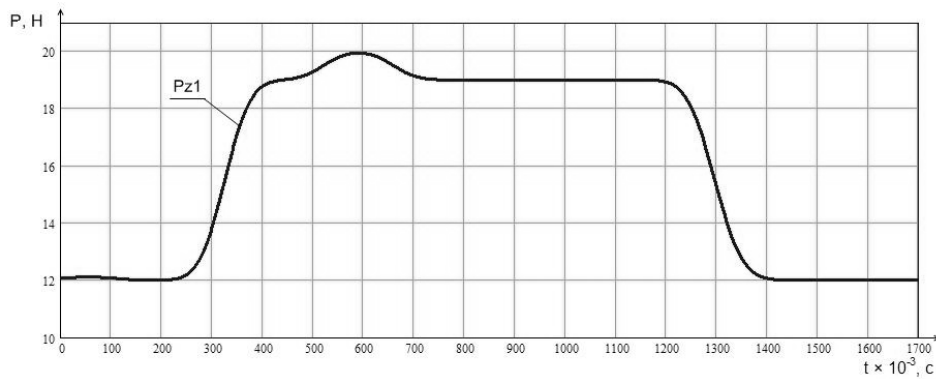


б

Рис. 7. Діаграми експериментального сигналу складової сили різання P_y (а) та згладженої кривої P_{y1} (б)



а



б

Рис. 8. Діаграми експериментального сигналу складової сили різання P_z (а) та згладженої кривої P_{z1} (б)

Для кожного режиму обробки проводилося по п'ять вимірних дослідів, статистично оброблялися і записувалися в матрицю експериментальних даних, яка представлена в табл. 2. Статистична обробка дослідів забезпечувалася програмою комп'ютерного комплексу. У основу цієї програми покладений статистичний метод порівняння результатів паралельних дослідів за критерієм Стьюдента при заданій ймовірності $P = 0,95$.

Таблиця 2

Дані плану досліджень процесу фрезерування та результати

B	t	S_m	S_z	n	V	P_x	P_y	P_z	R
мм	мм	мм/хв	мм/зуб	об	м/хв	Н	Н	Н	Н
1	1	200	0,030	2240	112,54	4	2,38	2,16	5,13
1	1	100	0,019	1800	90,43	1,71	1,298	1,18	2,45
1	1	50	0,015	1120	56,27	1,54	1,63	0,83	2,39
1,5	1	200	0,037	1800	90,43	3,43	3,03	2,84	5,39
1,5	0,75	100	0,024	1400	70,34	2,28	3,54	2,52	4,91
1,5	0,75	200	0,030	2240	112,54	2,86	2,814	2,79	4,89
1,5	0,5	200	0,048	1400	70,34	3,13	3,58	3,07	5,66
3	1	200	0,030	2240	112,54	7,43	6,49	6,22	11,66
3	1	100	0,019	1800	90,43	5,53	6,12	4,37	9,33
3	0,75	100	0,019	1800	90,43	4,24	5,8	2,88	7,74
3	0,5	200	0,048	1400	70,34	5,14	6,06	4,83	9,30
3	0,5	100	0,030	1120	56,27	4,32	4,86	3,2	7,25

При порівнянні експериментальних даних (табл. 2) з теоретичними розрахунками (табл. 1) можна помітити розбіжність, яка є досить значною. Це можна пояснити тим, що розрахункові формули не враховують поєднання циліндричного і торцевого фрезерування при використанні кінцевих фрез, які працюють всіма різальними частинами.

Тому доцільно отримати математичну модель рівнодіючої сили різання, яка б враховувала реальний стан процесу фрезерування. Отримати математичну модель можна використовуючи нечіткий метод групового врахування аргументів [7]. Методика реалізації даного методу представлена в статті [8].

Для отримання математичної моделі процесу фрезерування в якості вхідних параметрів взято експериментальні дані, що наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Початкові дані для проведення моделювання
рівнодіючої сили різання

B	t	Sz	V	R
мм	мм	мм/зуб	м/хв	Н
1	1	0,03	112,54	5,13
1	1	0,019	90,43	2,45
1	1	0,015	56,27	2,39
1,5	1	0,037	90,43	5,39
1,5	0,75	0,024	70,34	4,91
1,5	0,75	0,03	112,54	4,89
1,5	0,5	0,048	70,34	5,66
3	1	0,03	112,54	11,66
3	1	0,019	90,43	9,33
3	0,75	0,019	90,43	7,74
3	0,5	0,048	70,34	9,30
3	0,5	0,03	56,27	7,25

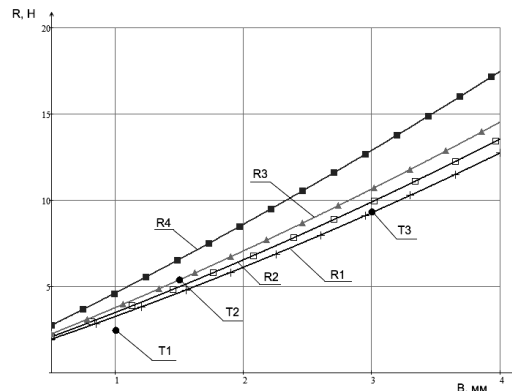
В результаті обробки результатів експериментальних досліджень нечітким методом групового врахування експериментів за допомогою створеної системи моделювання отримано такі залежності рівнодіючої сили різання від режимів різання при фрезеруванні алюмінієвого сплаву АК6, які представлені поліномами для верхньої межі R_v , нижньої межі R_n та середнього значення R_c :

$$R_v = 1.29 + 0.9616 \cdot B + 0.44 \cdot B \cdot t + 0.094365 \cdot V + 7.491 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 + 0.2934 \cdot B \cdot Sz \cdot V + \\ + 2.33 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot V^2 + 0.13445 \cdot B \cdot t \cdot Sz \cdot V + 1.067 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot t \cdot V^2 + 0.06977 \cdot B^2 + \\ + 0.06394 \cdot B^2 \cdot t + 0.0147 \cdot B^2 \cdot t^2 + 5.629 \cdot 10^{-5} \cdot Sz^2 \cdot V^2 + 8.94 \cdot 10^{-9} \cdot Sz \cdot V^3 + 3.54 \cdot 10^{-13} \cdot V^4$$

$$R_c = 0.4765 + 0.9616 \cdot B + 0.44 \cdot B \cdot t + 0.094365 \cdot V + 7.491 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 + 0.2934 \cdot B \cdot Sz \cdot V + \\ + 2.33 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot V^2 + 0.13445 \cdot B \cdot t \cdot Sz \cdot V + 1.067 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot t \cdot V^2 + 0.06977 \cdot B^2 + \\ + 0.064 \cdot B^2 \cdot t + 0.0147 \cdot B^2 \cdot t^2 + 5.629 \cdot 10^{-5} \cdot Sz^2 \cdot V^2 + 8.94 \cdot 10^{-9} \cdot Sz \cdot V^3 + 3.54 \cdot 10^{-13} \cdot V^4$$

$$R_n = -0.337 + 0.96158 \cdot B + 0.4406 \cdot B \cdot t + 0.0944 \cdot Sz \cdot V + 7.491 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 + 0.293 \cdot B \cdot Sz \cdot V + \\ + 2.33 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot V^2 + 0.13445 \cdot B \cdot t \cdot Sz \cdot V + 1.067 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot t \cdot V^2 + 0.06977 \cdot B^2 + \\ + 0.064 \cdot B^2 \cdot t + 0.0147 \cdot B^2 \cdot t^2 + 5.6287 \cdot 10^{-5} \cdot Sz^2 \cdot V^2 + 8.937 \cdot 10^{-9} \cdot Sz \cdot V^3 + 3.55 \cdot 10^{-13} \cdot V^4$$

На основі отриманих залежностей побудуємо графічне представлення рівнодіючої сили різання R від ширини фрезерування B (рис. 9)

Рис. 9. Графік залежності рівнодіючої сили різання R від ширини фрезерування B

Моделювання рівнодіючої сили різання було проведено при постійних значеннях глибини фрезерування $t = 1$ мм і швидкості різання $V = 90,43$ м/хв та наступних змінних:

- R1 – подача $S_z = 0,019$ мм/зуб;
- R2 – подача $S_z = 0,024$ мм/зуб;
- R3 – подача $S_z = 0,03$ мм/зуб;
- R4 – подача $S_z = 0,048$ мм/зуб.

А також експериментальні точки:

- T1 – ширина фрезерування $B = 1$ мм, подача $S_z = 0,019$ мм/зуб;
- T2 – ширина фрезерування $B = 1,5$ мм, подача $S_z = 0,037$ мм/зуб;
- T3 – ширина фрезерування $B = 3$ мм, подача $S_z = 0,019$ мм/зуб.

Для перевірки адекватності моделі було проведено розрахунок за критерієм Фішера. Критичне значення критерію Фішера при ймовірності 0,05 та з степенями свободи по 10 для кожної вибірки буде $F_k = 2,81793$. Розрахункове значення критерію Фішера $F = 1,056372$. Так як $F < F_k$ то математична модель рівнодіючої сили різання є адекватною.

Результати експериментальних досліджень дають можливість констатувати деякі вже відомі висновки. Так із збільшенням ширини фрезерування B , глибини фрезерування t та подачі S_z всі складові сили різання збільшуються, але збільшення ширини фрезерування B найбільше впливає на складову сили різання P_y , а із збільшенням глибини фрезерування t складові сили різання P_x та P_z зростають найбільше.

Висновки.

Отримано аналітичну залежність, яка реально відображає стан процесу оброблення деталей кінцевою фрезою, а також дозволяє визначити значення сил різання в дослідженому інтервалі змінних факторів. Отримана математична модель дає можливість в подальшому визначати оптимальні режими оброблення. А також дана математична модель може бути використана в системі керування, для забезпечення необхідних вихідних параметрів безпосередньо під час оброблення, що забезпечить підвищення продуктивності процесу фрезерування за рахунок покращення режимів роботи, підвищення ефективності використання інструмента та зменшення енерговитрат.

Список літератури

1. Палк К.И., Переломов Н.Г., Свинин В.М. Расчет силы резания при работе концевыми сфероцилиндрическими фрезами // Труды ЛПИ. – 1980. – №368. – С.71–76.
2. Иванов С.Ю. "Исследование технологических остаточных напряжений". канд. дисс., ЛИТМО 1990.
3. Л.И. Ковалева, В.Г. Панчук, Бесарабев Ю.И. Определение конструктивных параметров сверла с прерывистыми режущими кромками. Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту.- Житомир: ЖІТІ вип.№15 – 2000р., с 66-70.
4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2/ Под ред. А.М. Дальського, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сусллова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001 г. 912 с., ил.
5. Косовский В.Л. Справочник молодого фрезеровщика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. 1992. – 400 с.: ил.
6. Панчук В.Г., Плівак О.А. Модуль спряження комп'ютерного комплексу досліджень силових характеристик при різанні. – Вісник ЖДТУ №1(40) 2007 с.46-50.
7. Зайченко Ю.П. Основы проектирования интеллектуальных систем Киев, Вид. дім "Слово", 2004, 352 с.
8. Вислоух С.П., Катрук О.В., Заїка А.І. Дослідження стійкості різального інструмента при токарній обробці титанового сплаву.: Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технологии его изготовления и применения.: Сборник научных трудов. Выпуск 11. Киев 2008. с. 464-467.