

### АНАЛІЗ УМОВ ПІДВИЩЕННЯ ВІБРОСТІЙКОСТІ ПРОЦЕСУ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

*У статті розглянуто причини виникнення автоколивань при торцевому фрезеруванні. Визначено умови протидії виникненню автоколивального процесу залежно від конструкції фрези та ширини фрезерування. Запропоновано рекомендації по застосуванню різальних елементів (ножів) різної жорсткості для цілеспрямованої зміни власної частоти коливань підсистеми інструмента технологічної обробної системи (ТОС).*

**Постановка проблеми.** Застосування надтвердих матеріалів для торцевого фрезерування чавунів та, особливо, загартованих сталей висуває жорсткі вимоги до мінімізації загального рівня вібрацій при різанні. Віброактивність обробки впливає на стійкість інструмента та продуктивність процесу, якість обробленої поверхні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Шляхи протидії коливанням, які виникають у ТОС при різанні, розглядалися в багатьох роботах [1–4]. Також докладно окреслено вплив вібрацій на якість та продуктивність обробки, стійкість інструмента. Обмежимо аналіз питання забезпечення динамічної стабільності процесу різання умовами торцевого фрезерування.

У [3] на підставі аналізу великої кількості робіт узагальнено умови виникнення автоколивань та основні причини, що створюють у ТОС механізм збудження автоколивань. Їх поділено на три групи:

1. Викликані власне процесом різання.
2. Викликані специфічними якостями пружної системи верстата.
3. Викликані сумісною взаємодією факторів, що визначають процес різання та властивості пружної системи верстата.

Серед перерахованих причин автоколивань, викликаних власне процесом різання, суттєве значення, за умови торцевого фрезерування надтвердим матеріалом чавунів та загартованих сталей, мають тільки дві:

- особливості пластичного деформування при різанні, а саме, запізнення сили різання відносно малого переміщення різального елемента та зміна положення площин зсуву при коливаннях;
- особливості тертя робочих поверхонь інструмента по поверхні обробленої деталі.

Інші, розглянуті автором, причини мають незначний вплив (падіння сили різання при зростанні швидкості, утворення наросту та зміцнення оброблюваного матеріалу, залежність сили різання від швидкості коливань в радіальному напрямку) або взагалі відсутні (особливості пластичної деформації при малих швидкостях різання).

У другій групі факторів важливими (з придатністю до змін) можна виділити:

- зазори та тертя в підшипниках;
- особливості процесу тертя при малих швидкостях відносного ковзання вузлів, наприклад, падіння величини сили тертя при зростанні швидкості відносного ковзання.

До третьої групи впливових факторів слід віднести:

- явище координатного зв'язку пружних деформацій системи з кількома степенями свободи і процесом різання;
- взаємодія автоколивань, пов'язаних із зазорами і тертям у підшипниках, з процесом різання.

Як найбільш вагомий у [1, 3] зазначений вплив на збудження автоколивань при точінні координатного зв'язку пружної системи верстата з процесом різання та специфічної залежності сили різання від швидкості.

Для випадку чистового торцевого фрезерування він має значно менше значення [5]. Але за певних умов (збільшення припуску, зміна геометрії або зношення різального леза) цей вплив може призводити до виникнення автоколивань підсистеми інструмента ТОС у горизонтальній площині за рахунок різання "по сліду" [1, 3, 4], які негативно впливають на якість обробки та стійкість фрези.

Полегшення умов роботи різальних елементів фрези та стабілізації процесу різання, покращання якості обробки досягалося, за даними [8, 9], використанням конструкцій фрез з груповою схемою різання та розташуванням різальних елементів по спіралям корпусу фрези з різними кутовими чи лінійними кроками, косокутної геометрії різальних кромок та безвершинної форми різальної частини леза.

У [10] для зменшення ударних впливів на інструмент та заготовку пропонувалося змінити траєкторію врізання торцевої фрези, покращання якості оброблюваної поверхні – обирати геометрію різального леза із забезпеченням мінімуму нормальної до оброблюваної поверхні складової сили різання.

В окремих роботах, присвячених питанням динаміки торцевого фрезерування [6, 7], розглядаються методики зменшення віброактивності процесу торцевого фрезерування шляхом зміни жорсткості окремих різальних елементів фрези. Один із варіантів – використання різальних елементів фрези з різною жорсткістю. Наприклад, у [6] на основі експериментальних досліджень різних схем варіювання жорсткості ножів визначено умови зменшення рівня автоколивальності при торцевому фрезеруванні за рахунок виключення “обробки по сліду”.

Але достатнього теоретичного опрацювання це питання не отримало: не визначено динамічні параметри пружних підсистем ТОС та процесу різання, які визначають мінімум автоколивального процесу, не розглянуто узагальнені схеми (для різних типів торцевих фрез) варіювання пружними параметрами елементів фрези.

**Мета дослідження.** Виконати аналіз умов виникнення автоколивального процесу при обробці “по сліду” та визначити шляхи підвищення вібростійкості процесу торцевого фрезерування за рахунок цілеспрямованої зміни жорсткості підсистеми інструмента ТОС.

**Викладення основного матеріалу.** Важливий вплив на виникнення автоколивальності при різанні з втратою стійкості процесу, погіршенням якості обробленої поверхні та зниженням ресурсу інструментів є обробка “по сліду” [1, 4]. При торцевому фрезеруванні оцінка цього впливу тільки ускладнюється, завдяки змінній кількості різальних лез, що беруть участь у різанні в кожний момент часу, їх різній навантаженості. Найскладніші умови обробки, коли параметри коливального процесу, відтворені на поверхні різання, впливають на інструмент (різець, ніж фрези) на власній частоті домінуючої підсистеми ТОС. Відповідно, це викликає резонансне зростання амплітуди коливань на кожному наступному проході.

Модель процесу коливань підсистеми інструмента (стандартної торцевої фрези) у горизонтальній площині для випадку одномасової системи шпиндель–фреза матиме вигляд:

$$m \ddot{y} + b \dot{y} + Cy = -P \sin \alpha z t, \quad (1)$$

де  $m$ ,  $b$ ,  $C$  – інерційний (наведена маса шпинделя та фрези), дисипативний та деформативний коефіцієнти відповідно;  $P$  – сила різання;  $\omega$  – кутова частота обертання фрези;  $z$  – кількість ножів (різальних елементів на фрезі, розміщених з однаковим кутовим кроком);  $y$  – амплітуда поперечних коливань фрези.

Коефіцієнти  $m$  та  $b$  є характеристиками обраної ТОС, змінюються у певних межах з часом стохастично, але наближено можуть бути прийняті постійними для кожного процесу обробки. Коефіцієнт  $C$  визначає зміну жорсткості підсистеми інструмента (шпиндель–фреза) залежно від її кута повороту.

Жорсткість фрези (без врахування жорсткості різальних елементів) залежно від кута повороту практично не змінюється. Жорсткість шпинделя змінюється в певних межах, взагалі стохастично [11], залежно від кутів повороту підшипників, дійсних розмірів, форми опорних поверхонь шпинделя та інших впливів. Але для випадку, який розглядається, прийmemo її постійною. Тоді основний внесок у зміну жорсткості підсистеми інструмента вноситиме сумарна жорсткість різальних елементів (ножів) фрези, які беруть участь у різанні в кожний момент часу.

Умову мінімізації впливу хвилястості поверхні різання на збудження автоколивальності у ТОС сформулюємо так: забезпечення змінної жорсткості фрези, яка змінюється при “вході” в різання кожного наступного різального елемента (незалежно від кількості різальних елементів, які беруть участь у різанні одночасно). Ця умова може бути виражена зміною власної частоти фрези при різанні (за умови, що наведена маса системи  $m = \text{const}$ ):

$$\omega = \sqrt{\frac{m}{c(t)}}; \quad c(t) = \frac{1}{\frac{1}{\sum_{i=1}^{z_p} c_i} + \frac{1}{c_{\kappa, \phi p}}}, \quad (2)$$

де  $c_i$  – жорсткість окремого різального елемента;  $c_{\kappa, \phi p}$  – жорсткість фрези без різальних елементів;  $z_p$  – кількість різальних елементів, які беруть участь у різанні одночасно.

Згідно зі схемою (рис. 1), залежно від діаметра фрези, кількості різальних елементів (кутового кроку їх розташування, постійного або змінного) та ширини фрезерування ( $b = \text{const}$ ) у кожний момент часу участь у різанні бере різна кількість різальних елементів. Ця кількість ( $z_p$ ) при постійному кутовому кроці розміщення різальних елементів може бути визначена за формулою (рис. 1):

$$\frac{b}{D} = \sin\left(\frac{(z_p - 1) \cdot \pi}{z}\right). \quad (3)$$

Звідки

$$z_p = 1 + \frac{z \cdot \arcsin(b/D)}{\pi}, \quad (4)$$

де  $z$  – загальна кількість різальних елементів фрези.

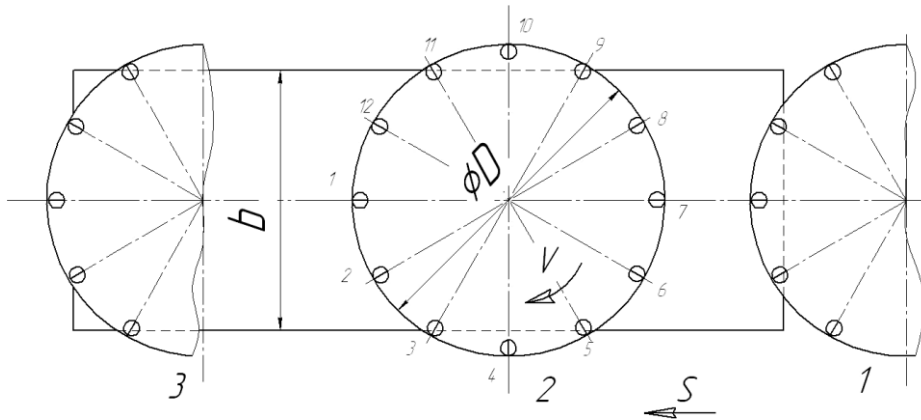


Рис. 1. Схема процесу торцевого фрезерування:  $z = 12$ ,  $b/D = 0,87$

Дробова частина значення  $z_p$  з розрахунку вказує на час різання з меншою кількістю різальних елементів відносно загального часу обробки (без врахування часу на врізання та вихід фрези з різання – положення фрези 1 і 3) (рис. 1).

На схемі (рис. 2) показано залежність часу роботи і кількості різальних елементів, що виконують обробку одночасно, від відношення  $b/D$  для торцевих фрез з постійним окружним кроком та  $z = 12$  (рис. 2, а),  $z = 30$  (рис. 2, б). Штриховкою виділені діапазони переважного використання на практиці (за рекомендаціями [12]).

З графіків (рис. 2) видно, що для будь-яких значень діаметра фрези та ширини фрезерування при постійному кутовому кроці встановлення різальних елементів, обробка періодично виконується двома різними кількостями різальних елементів (за умови, що всі вони беруть участь у різанні по черзі). Для відношення  $b/D = 0,8$  та фрези з  $z = 12$  (рис. 2, а)  $z_p = 4$  або 5, з  $z = 30$  (рис. 2, б)  $z_p = 9$  або 10.

Визначимо основні технологічні обмеження при забезпеченні умови мінімізації впливу хвилястості поверхні різання на збудження автоколивань у ТОС:

- кількість різальних елементів фрези з однаковою, “базовою”, жорсткістю повинна бути максимальною;
- жорсткість кожного окремого різального елемента не повинна значно відрізнятися від “базової”;
- забезпечення зміни жорсткості різальних елементів повинно бути простим і не ускладнювати використання фрези, налагодження та зменшення її термінів експлуатації.

Схема встановлення різальних елементів на торцеву фрезу, з врахуванням наведених обмежень, має вигляд послідовності: основна група різальних елементів з “базовою” жорсткістю  $c_0$  поділена різальними елементами з жорсткістю  $c_{\min} = 0,8 c_0$  та  $c_{\max} = 1,2 c_0$ , розташованими по чергово, таким чином, щоб кожна група різальних елементів, яка виконує обробку, мала іншу жорсткість, ніж попередня і наступна.

Наприклад, для фрези з  $z = 12$  ( $z_p = 3 - 5$ ) схема має вигляд: один різальний елемент з  $c_{\min}$ , три з  $c_0$ , один з  $c_{\max}$ , три з  $c_0$ , один з  $c_{\min}$ , три з  $c_0$ . Для фрези з  $z = 30$  ( $z_p = 6-14$ ) схема має вигляд: 2 різальних елементи з  $c_{\min}$ , чотири з  $c_0$ , два з  $c_{\max}$ , чотири з  $c_0$ , два з  $c_{\min}$ , чотири з  $c_0$ , тощо.

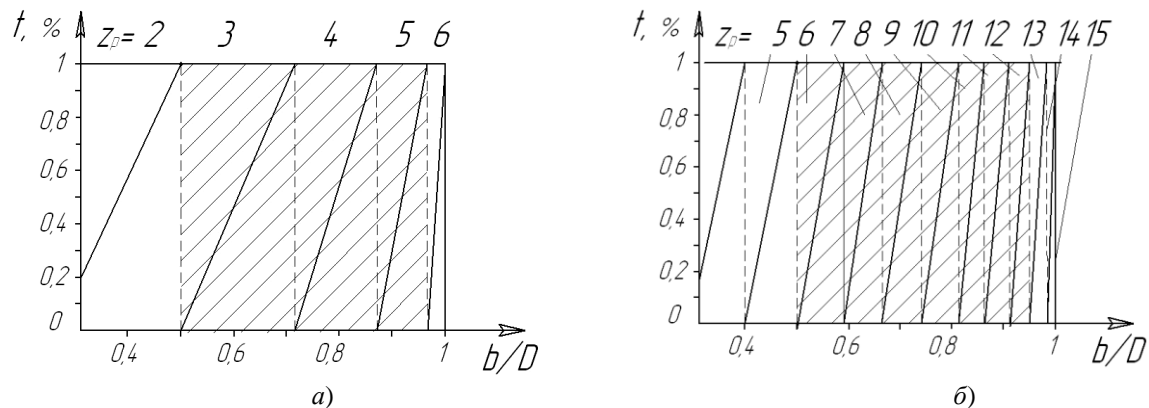


Рис. 2. Залежність відносного часу роботи і кількості різальних елементів, які виконують обробку одночасно, від відношення  $b/D$  для торцевих фрез з  $z = 12$  (а),  $z = 30$  (б)

Значення зміни сумарної жорсткості торцевої фрези та власної частоти коливань  $\omega$  залежно від жорсткості корпусу, кількості різальних елементів загальної та в групах наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Фреза	Характеристика групи різальних елементів			Миттєва жорсткість фрези		$\omega_{\max}/\omega_{\min}$
	$b/D$	$z_p$	варіанти $c_i$	$c_{к.фр} \approx c_0$	$c_{к.фр} \gg c_0$	
$z = 12$	0,6	3	0,8 $c_0$ , 2 з $c_0$	0,74 $c_0$	2,8 $c_0$	1,2
			3 з $c_0$	0,75 $c_0$	3 $c_0$	
			1,2 $c_0$ , 2 з $c_0$	0,762 $c_0$	3,2 $c_0$	
		4	0,8 $c_0$ , 3 з $c_0$	0,792 $c_0$	3,8 $c_0$	
			4 з $c_0$	0,8 $c_0$	4 $c_0$	
			1,2 $c_0$ , 3 з $c_0$	0,808 $c_0$	4,2 $c_0$	
	0,8	5	0,8 $c_0$ , 3 з $c_0$ , 0,8 $c_0$	0,821 $c_0$	4,6 $c_0$	1,07
			0,8 $c_0$ , 4 з $c_0$	0,827 $c_0$	4,8 $c_0$	
			1,2 $c_0$ , 3 з $c_0$ , 0,8 $c_0$	0,833 $c_0$	5 $c_0$	
	0,9	6	1,2 $c_0$ , 4 з $c_0$	0,84 $c_0$	5,2 $c_0$	1,14
			0,8 $c_0$ , 4 з $c_0$ , 0,8 $c_0$	0,849 $c_0$	5,6 $c_0$	
			0,8 $c_0$ , 5 з $c_0$	0,853 $c_0$	5,8 $c_0$	
1,2 $c_0$ , 4 з $c_0$ , 0,8 $c_0$			0,857 $c_0$	6 $c_0$		
$z = 30$	0,6	7	від 3 з 0,8 $c_0$ , 4 з $c_0$ до 2 з 1,2 $c_0$ , 5 з $c_0$	від 0,865 $c_0$ до 0,881 $c_0$	від 6,4 $c_0$ до 7,4 $c_0$	1,146
			8	від 4 з 0,8 $c_0$ , 4 з $c_0$ до 2 з 1,2 $c_0$ , 6 з $c_0$	від 0,878 $c_0$ до 0,894 $c_0$	
	0,8	9	від 4 з 0,8 $c_0$ , 5 з $c_0$ до 2 з 1,2 $c_0$ , 7 з $c_0$	від 0,891 $c_0$ до 0,904 $c_0$	від 8,2 $c_0$ до 9,4 $c_0$	1,126
			10	від 4 з 0,8 $c_0$ , 6 з $c_0$ до 2 з 1,2 $c_0$ , 8 з $c_0$	від 0,902 $c_0$ до 0,912 $c_0$	
	0,9	11	від 4 з 0,8 $c_0$ , 7 з $c_0$ до 2 з 1,2 $c_0$ , 9 з $c_0$	від 0,911 $c_0$ до 0,92 $c_0$	від 10,2 $c_0$ до 11,4 $c_0$	1,103
			12	від 4 з 0,8 $c_0$ , 8 з $c_0$ до 2 з 1,2 $c_0$ , 10 з $c_0$	від 0,918 $c_0$ до 0,925 $c_0$	

Миттєва жорсткість фрези розрахована за умовами двох граничних варіантів жорсткості її корпусу (фрези без різальних елементів):

- жорсткість корпусу близька до “базової” жорсткості різального елемента ( $c_{к.фр} \approx c_0$ );
- жорсткість корпусу значно більша від “базової” – ( $c_{к.фр} \gg c_0$ ).

Дійсна жорсткість торцевої фрези, залежно від її конструкції, знаходиться в заданому діапазоні і може бути наближено оцінена у відносних одиницях ( $c_0$ ).

Максимальна зміна власної частоти коливань фрези (протягом одного оберту) з  $z = 12$ :  $\omega_{\max}/\omega_{\min} = 1,2$ ; з  $z = 30$ :  $\omega_{\max}/\omega_{\min} = 1,15$ . Відповідно період коливань різального леза не відповідає періоду хвилі, утвореної на поверхні різання попереднім різальним елементом, який його виконував. Виникнення автоколивань внаслідок різання по вібраційному сліду від проходження попереднього різального елемента не відбувається.

Застосування розглянутого методу можливе для фрез прогресивних конструкцій [8, 9, 13], але створення узагальної схеми ускладнюється конструктивними особливостями таких фрез та застосованих схем різання: різальні елементи розміщуються не тільки з різним кутівим кроком, але і з різним радіальним положенням, на різних спіралях, з поділенням припуску за глибиною і подачею. Відповідно це питання вимагає подальшого дослідження.

#### Висновки:

1. Розглянуто основні причини виникнення автоколивань у ТОС при торцевому фрезеруванні та визначено можливості їх цілеспрямованої зміни.
2. Визначено параметри ТОС та змінні умови обробки залежні від режиму різання, конструкції фрези та ширини фрезерування.
3. З метою протидії проявам автоколивального процесу в результаті обробки “по сліду” розроблена узагальнена схема розміщення різальних елементів торцевої фрези з різною жорсткістю.

**Список використаної літератури:**

1. *Кудинов В.А.* Динамика станков / *В.А. Кудинов.* – М. : Машиностроение, 1967. – 359 с.
2. *Орликов М.Л.* Динамика станков / *М.Л. Орликов.* – К. : Вища школа, 1989. – 272 с.
3. *Подураев В.Н.* Резание труднообрабатываемых материалов : учеб. пособие / *В.Н. Подураев.* – М. : Высшая школа, 1974. – 587 с.
4. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом / *И.Г. Жарков.* – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
5. *Мельничук П.П.* Динаміка процесу торцевого фрезерування при зношуванні різальних елементів / *П.П. Мельничук, Я.А. Степчин* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2012. — № 2 (61). – С. 33–40.
6. *Фролов А.Н.* Повышение виброустойчивости фрезерования на основе использования торцевых фрез переменной жесткости : автореф. ... канд. техн. наук / *А.Н. Фролов.* – Тула : ТГУ, 2005. – 22 с.
7. *Боровский Г.В.* Высокоскоростное фрезерование серого чугуна / *Г.В. Боровский, О.Б. Якушева, А.А. Жамолетдинов* // Станки и инструмент. – 1993. — № 2.
8. *Виговський Г.М.* Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь : автореф. ... канд. тех. наук / *Г.М. Виговський.* – К. : НТУУ “КПІ”, 2000. – 16 с.
9. *Виговський Г.М.* Безвершинне косокутне фрезерування. Шорсткість поверхні / *Г.М. Виговський, П.П. Мельничук* // Вісник НТУУ “КПІ” / “Машинобудування”. – 1999. – № 37. – С. 262–275.
10. *Мельничук П.П.* Чистове торцеве фрезерування широких плоских поверхонь. Аналіз утворення похибок і попередні рекомендації щодо їх мінімізації / *П.П. Мельничук, В.Ю. Лоев* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2008. – № 4 (47). – С. 29–43.
11. *Струтинський В.Б.* Математичне моделювання металорізальних верстатів : монографія / *В.Б. Струтинський, П.П. Мельничук.* – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 570 с.
12. *Справочник технолога-машиностроителя* : В 2-х т. / под ред. *А.Г. Косиловой и Р.К. Мецержакова.* – 4-ое изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
13. *Мельничук П.П.* Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь : автореф. ... докт. тех. наук / *Петро Петрович Мельничук.* – К. : НТУУ “КПІ”, 2002. – 26 с.

СТЕПЧИН Ярослав Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- динаміка механічних систем;
- математичне моделювання.

E-mail: stepchiny@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 25.10.2012