

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИНАМІКИ ПРОЦЕСІВ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ФРЕЗАМИ СТАНДАРТНИХ ТА СПЕЦІАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Стаття присвячена вивченню динамічної нестабільності процесу торцевого фрезерування, яке обумовлено рухом до підвищення продуктивності лезової обробки плоских поверхонь. Вибір перспективних способів обробки, розробка та впровадження нових конструкцій інструментів неможливі без аналізу динамічних процесів у технологічній обробній системі (ТОС).

Розглянуто особливості динаміки торцевого фрезерування. На основі розробленої динамічної моделі коливань торцевої фрези виконано дослідження стійкості процесу різання різними типами фрез: стандартної, триступінчастої з 12 різальними елементами та ступінчастої фрези з 21 різальним елементом, що розташовані за трьома спіралями, з різним кутівим кроком та розділенням припуску по глибині.

Порівняльний аналіз процесу різання фрезами різних конструкцій показав більш високий рівень динамічної стійкості ступінчастих фрез, порівняно зі стандартними. Також використання окремих коливальних контурів з віброізоляцією та демпфуванням у конструкції фрези збільшує її протидію виникненню автоколивань у ТОС.

Ключові слова: автоколивання; динаміка; математична модель; різання; торцеве фрезерування.

Постановка проблеми. Динамічні явища при багатолезовій обробці (що характерно для процесів фрезерування) мають свої специфічні особливості. Постійна участь у різанні багатьох лез призводить до одночасного різного за напрямком та величиною динамічного збурення ТОС. Відповіддю на це збурення є пружні переміщення кожного окремого леза та зміна доданків сили різання. Гарантована стійкість процесу обробки значною мірою залежить від конструкції верстата, інструмента (фрези), жорсткості їх окремих елементів, швидкості переміщення вузлів, рівня демпфування у рухомих вузлах, а також конструктивних особливостей фрез – форми і кількості ножів, їх відносного розташування, геометрії різальних лез, відносної жорсткості корпусу фрези та її власних частот коливань [1, 2].

При торцевому фрезеруванні (як і в більшості інших видів багатолезової обробки) допустимий рівень коливань при різанні визначається необхідною кінцевою якістю обробки. Умови (перш за все, параметри режиму різання) ефективної обробки фрезеруванням передбачають досягнення високої продуктивності за рахунок:

- зняття якнайбільшого перерізу зрізу при відповідній швидкості різання на межі стійкості ТОС;
- обмеження площі перерізу зрізу при встановленні максимально можливої швидкості різання (при використанні сучасних інструментальних матеріалів, наприклад, НТМ).

Перший варіант передбачає різання в умовах вимушених коливань та автоколивань, рівень яких дозволяє отримати задовільні параметри якості відповідної чорнової обробки [3]. Другий варіант є більш перспективним для чистового фрезерування, тому що передбачає обробку в умовах гарантованої динамічної стійкості ТОС, що виключає неприйнятні коливання і забезпечує необхідні показники якості обробленої поверхні [4].

Вибір перспективних способів обробки, розробка та впровадження нових конструкцій інструментів з метою підвищення продуктивності обробки неможливі без порівняльного аналізу динамічних процесів, що відбуваються у ТОС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Динамічна нестабільність ТОС під час роботи на інтенсивних режимах різання обумовлена, головним чином, вторинним збудженням (регенерацією) автоколивань під впливом вібраційного сліду на поверхні різання. Очевидно, що для досягнення максимальної ефективності управління вторинними автоколиваннями потрібно впливати безпосередньо на сам механізм їх регенерації. Незважаючи на те, що обробка «по сліду» від попереднього проходу різальної кромки є характерною для більшості процесів різання, це питання на даний час опрацьоване недостатньо [2, 5–7].

У ході регенерації автоколивань їх фаза щодо коливань сліду встановлюється незалежно від початкових умов, що свідчить про самоорганізацію процесу. Руйнування цієї самоорганізації примусовою зміною фази автоколивань відкриває можливість управління динамічною стабільністю ТОС.

Ефективними методами протидії самоорганізації автоколивального процесу при обробці різанням в цілому та у випадку торцевого фрезерування є:

- періодична зміна (модуляція) швидкості різання [2];

- розділення припуску за глибиною (ступінчасте фрезерування) та ножів фрез на групи чорнових і чистових [3];

- розміщення ножів в корпусі фрези спіралями та з різним кутовим кроком [8].

Кожен з розглянутих авторами заходів конструктивного або технологічного характеру має свої переваги та обмеження у використанні. Особливо важливою є оцінка ефективності впровадження нових заходів, порівняно з «класичними» схемами обробки та конструкціями фрез.

Мета дослідження. Виконати порівняльні дослідження основних характеристик підсистем ТОС, що обумовлюють виникнення поперечних коливань при торцевому фрезеруванні з використанням стандартних та «прогресивних» [9] конструкцій фрез. Визначити основні напрямки управління динамічною стабільністю ТОС.

Викладення основного матеріалу. Математичні моделі підсистем фрезерного верстата (і, зокрема, шпинделя з фрезою) розглянуті у [1, 4] у вигляді систем лінійних диференціальних рівнянь.

Розрахунок допустимих автоколивань, для нелінійної системи торцевого фрезерування, що має два степеня свободи, розглянутий у [10]. У розрахунку поперечних коливань фрези враховувалися запізнення у часі при різанні «по сліду» та відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізу, які у першому наближенні прийняті постійними.

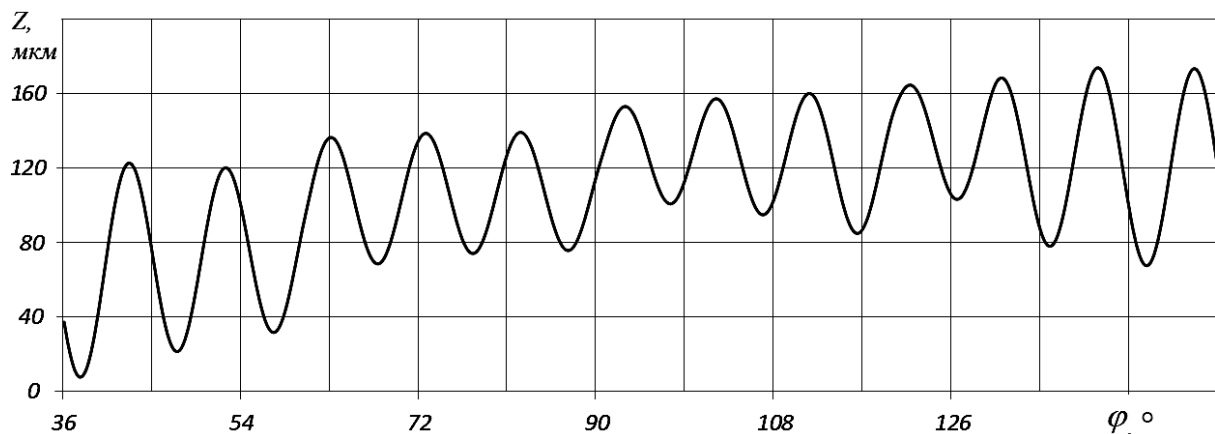
При зменшенні дисипативного коефіцієнта у підсистемі інструмента виникає коливальний процес, амплітуда і частота якого залежить від значення деформативного коефіцієнта (при незмінності інерційного коефіцієнта). При певному співвідношенні коефіцієнтів стабільний коливальний процес (автоколивання) не виникає навіть при меншому значенні деформативного коефіцієнта, що пояснюється невідповідністю частоти збуджуючої сили від врізання чергового ножа з першою частотою власних поперечних коливань фрези, отже, і відсутністю постійного живлення автоколивального процесу.

Проте важливе значення має кількісна оцінка впливу на автоколивальний процес при торцевому фрезеруванні особливостей конструкції фрез зі ступінчастими схемами різання, з нерівномірним кроком розміщення різальних елементів, комбінованої обробки [4, 8, 9] і порівняння його з стандартними торцевими фрезами.

На основі розробленої математичної моделі [10, 11] були виконані теоретичні дослідження поперечних коливань фрези, які виникають при торцевому фрезеруванні фрезами стандартних конструкцій [12] та фрезами зі ступінчастими схемами різання й нерівномірним кроком розміщення різальних елементів. Визначалися параметри режиму різання та коефіцієнти диференціальних рівнянь, які обумовлюють початок тривалого автоколивального процесу у підсистемі інструменту. Основні характеристики пружної системи верстата приймалися незмінними.

На рисунку 1 представлені діаграми зміщення фрези по осі z (за схемою з [10]) для випадку фрезерування стандартною торцевою фрезою з 12 різальними елементами діаметром 200 мм, розташованими з однаковим кутовим кроком. Розглянуто період обробки від врізання першого різального елемента до його виходу з різання на десятому (рис. 1, *a*) та двадцятому оборотах фрези (рис. 1, *б*). Інші умови: глибина різання $t = 5$ мм, подача на зуб фрези $s_z = 0,2$ мм, частота обертання фрези $n = 200$ хв.⁻¹. Крок інтегрування – 0,0001 с.

Принципової різниці у коливаннях фрези залежно від часу немає: на обох діаграмах (рис. 1, *a*, *б*) присутні стійкі автоколивання (биття) на частотах, близьких до власної частоти підсистеми інструмента з амплітудою 50–70 мкм і низькочастотні коливання з амплітудою ≈ 40 мкм на частоті обертання фрези. Вплив входу (виходу) наступного різального елемента в різання на діаграмі не простежується. Амплітуда коливань близька до величини подачі фрези, що обумовлює їх негативний вплив на процес різання та стійкість різальних елементів.



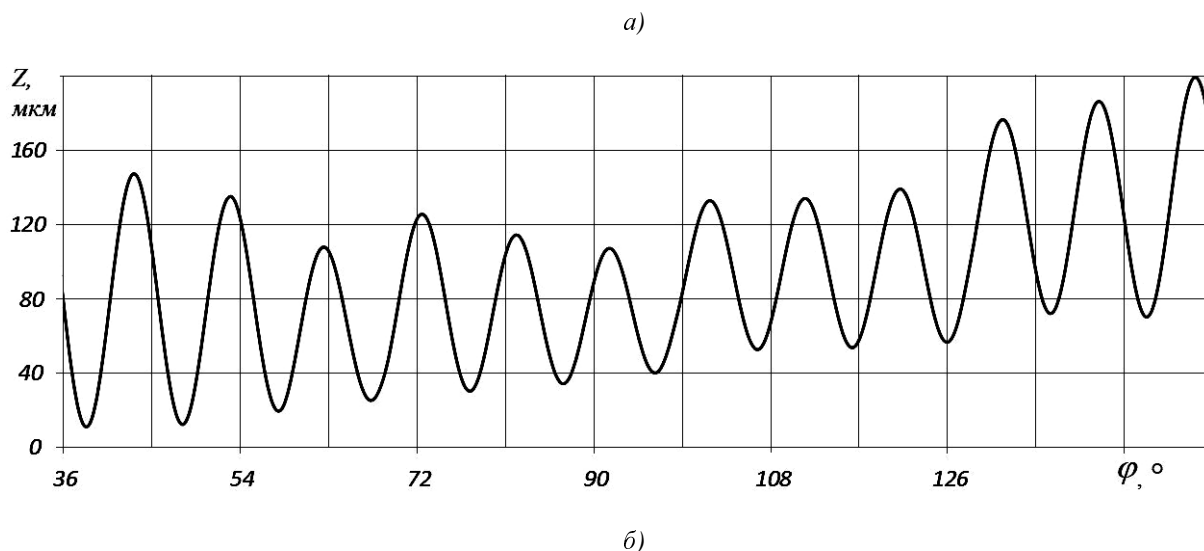


Рис. 1. Діаграми коливань стандартної торцевої фрези по осі z на десятому (а) та двадцятому (б) обертах фрези за математичною моделлю [10]:
 $b = 2 \cdot 10^3$ Нс/м, $C = 10^7$ Н/м

Зміна деформативного коефіцієнта в диференційних рівняннях опису поведінки підсистеми інструменту впливає зворотно пропорційно, в основному, лише на амплітудні відхилення фрези від початкового положення. Значення дисипативного коефіцієнта обумовлює втрату стійкості коливальної системи (з виникненням стійких автоколивань), яка відбувається для наведених вище умов при $b = 3,5 \dots 4,5 \cdot 10^3$ Нс/м.

На рисунку 2 представлено діаграму зміщення фрези по осі z (за схемою з [10]) для випадку фрезерування триступінчастою торцевою фрезою з 12 різальними елементами, розташованими за чотирма спіралями, спрямованими в протилежні боки щодо напрямку обертання фрези (за схемою рис. 3, а [13]). Глибина різання (на ступінь) $t = 2$ мм (рис. 3, в), двадцятий оборот фрези, інші умови – як для стандартної фрези (рис. 1).

За умов, близьких до обробки стандартною фрезою на діаграмі коливань триступінчастої торцевої фрези (рис. 2) також присутні стійкі автоколивання, але з меншою амплітудою – 15–25 мкм і низькочастотні коливання з амплітудою ≈ 30 –35 мкм.

Значення дисипативного коефіцієнта, яке відповідає виникненню стійких автоколивань, як і для стандартної фрези, становить $b = 3,5 \dots 4,5 \cdot 10^3$ Нс/м, але зростання їх амплітуди до рівня 50 мкм досягається лише за $b = 5,5 \dots 6 \cdot 10^3$ Нс/м.

В цілому позитивні результати моделювання динаміки фрезерування триступінчастою торцевою фрезою, порівняно зі стандартною, можна пояснити зменшенням енергосилових параметрів процесу різання (деяким зниженням сумарної сили різання, амплітудних коливань її складових) і, відповідно, зменшенням енергії живлення автоколивального процесу. Отримані результати підтверджуються [9].

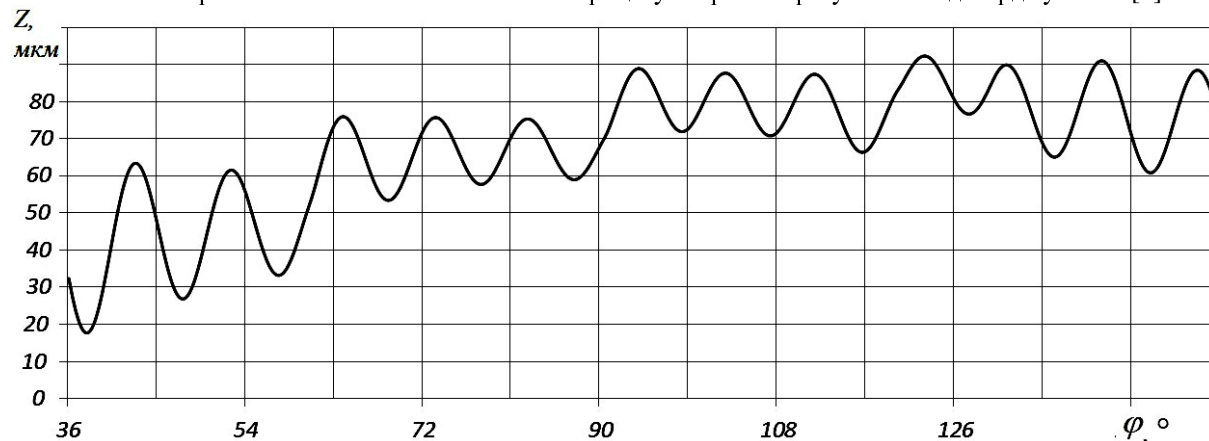


Рис. 2. Діаграми коливань триступінчастої торцевої фрези по осі z за математичною моделлю [10]: $b = 2 \cdot 10^3$ Нс/м, $C = 10^7$ Н/м

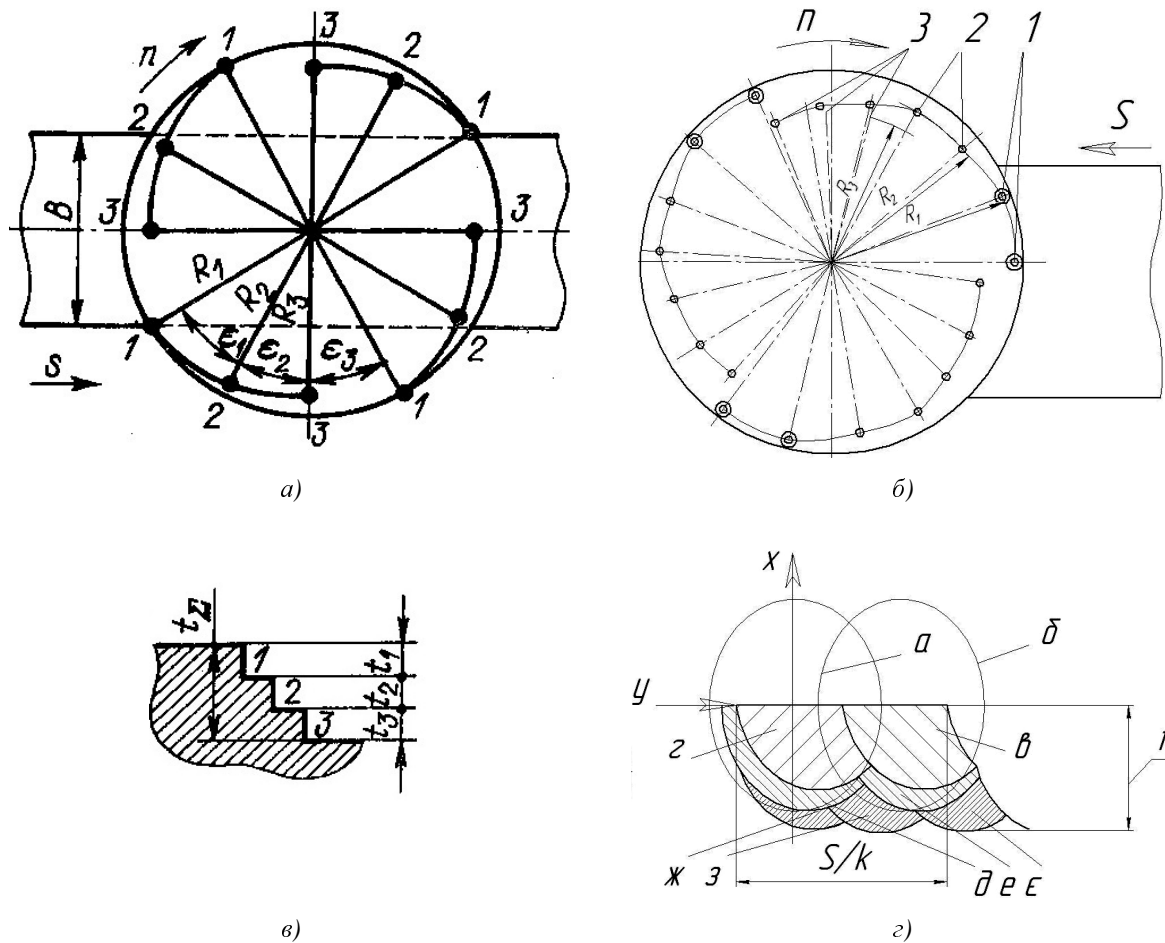


Рис. 3. Схеми розміщення різальних ножів (а, б) та розподілення величини припуску за глибиною (в, г) ступінчастих торцевих фрез [12] (а, в) та [9] (б, г)

На рисунку 4, аналогічно до попередніх, представлено діаграми зміщення фрези по осі z (за схемою з [10]) для випадку фрезерування торцевою ступінчастою фрезою [9] з 21 різальним елементом, розташованими за трьома спіралями, з різним кутовим кроком та розділенням припуску за глибиною на чорновий ($t = 2,5 \dots 3,5$ мм), напівчистовий ($t = 1 \dots 2$ мм) та чистовий ($t = 0,5$ мм) (рис. 4, б, г) [9]. Інші умови – як для раніше розглянутих фрез.

Слід зазначити, що при порівнянні динаміки різання фрезами трьох різних схем різання забезпечити абсолютно однакові вхідні умови неможливо. Параметри режиму різання близькі, проте фреза [9] суміщає чорнову та чистову обробку і теоретично забезпечує більш якісні характеристики обробленої поверхні. Також її конструкція передбачає ізоляцію негативного впливу коливального процесу, який викликають чорнові різальні елементи, від напівчистових та чистових. У цьому випадку фреза може бути представлена лише як багатомасова система [11]. Тому раніше розглянута математична модель поперечних коливань [10] була доповнена врахуванням ізоляції коливального контуру чорнових різальних елементів від корпусу фрези з напівчистовими та чистовими різальними елементами. Для спрощення в модель додано один чорновий коливальний контур, рівень віброізоляції та демпфування в якому варіювався в широких межах.

У математичній моделі для торцевої ступінчастої фрези [9] особливість її конструкції врахована описом двох коливальних контурів – чорнового та чистового (корпусу фрези з напівчистовими та чистовими різальними елементами) та збільшенням коефіцієнта демпфування для чорнового контуру (для рис. 4 на 50 %).

На діаграмі коливань (рис. 4) присутні лише низькочастотні коливання з амплітудою $\approx 15\text{--}20$ мкм, а також згасаючі коливання, що пов'язані з входом в різання наступного чорнового різального елемента з максимальною амплітудою 10–15 мкм. Вплив напівчистових та чистових різальних елементів на коливання фрези мінімальний.

Значення дисипативного коефіцієнта для чистового контуру, яке відповідає виникненню стійких автоколивань, становить $b_{\text{чист}} = 1,2 \dots 1,6 \cdot 10^3$ Нс/м ($b_{\text{чорн}} = 1,5 \cdot b_{\text{чист}}$) і $b_{\text{чист}} = 1 \dots 1,5 \cdot 10^3$ Нс/м ($b_{\text{чорн}} = 2 \cdot$). Навіть за $b_{\text{чорн}} = 1,25 \cdot b_{\text{чист}}$ верхня межа виникнення автоколивань зменшилася до $b_{\text{чист}} = 2,5 \dots 3,0 \cdot 10^3$ Нс/м.

Таким чином, якщо прийняти межею допустимих автоколивань для трьох варіантів фрез величини амплітуд, що відповідають рисунку 1 (для стандартної фрези: значення дисипативного та деформативного коефіцієнтів $b = 2 \cdot 10^3$ Нс/м і $C = 10^7$ Н/м відповідно), заміна торцевого фрезерування ступінчастим дозволяє підвищити продуктивність обробки за рахунок інтенсифікації режимів різання. Для триступінчастої фрези (рис. 3, а) прогнозоване зростання продуктивності становить 30–40 % (за рахунок збільшення допустимої сумарної глибини різання та подачі), для ступінчастої фрези (рис. 3, в) – 30–50 % (за умови однакових параметрів якості обробленої поверхні).

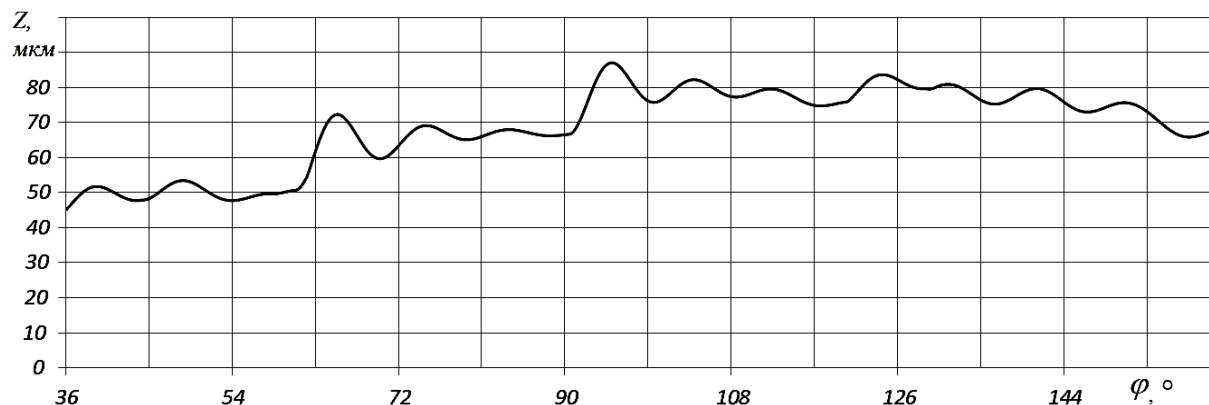


Рис. 4. Діаграми коливань торцевою ступінчастою фрезою [9] по осі z за вдосконаленою математичною моделлю [10]: $b_{\text{чорн}} = 3 \cdot 10^3$ Нс/м (для чорного контуру); $b_{\text{чист}} = 2 \cdot 10^3$ Нс/м (для корпусу фрези з напівчистовим та чистовим контурами); $C = 10^7$ Н/м (загальне значення)

Список використаної літератури:

1. Струтинский В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки : підручник / В.Б. Струтинский. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 612 с.
2. Свишин В.М. Управление регенеративными автоколебаниями при фрезеровании на основе модуляции скорости резания : автореф. дис. ... докт. техн. наук / В.М. Свишин. – Иркутск : ИГТУ, 2008. – 26 с.
3. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов : учеб. пособие / В.Н. Подураев. – М. : Высшая школа, 1974. – 587 с.
4. Мельничук П.П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь : автореф. дис. ... докт. техн. наук / Петро Петрович Мельничук. – К. : НТУУ “КПІ”, 2002. – 26 с.
5. Орликов М.Л. Динамика станков / М.Л. Орликов. – К. : Вища школа, 1989. – 272 с.
6. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
7. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 359 с.
8. Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Георгій Миколайович Виговський. – К. : НТУУ “КПІ”, 2000. – 16 с.
9. Патент України на винахід № 12503 «Торцева ступінчаста фреза» / П.П. Мельничук, Я.А. Степчин. – Публікація 12.01.2015 ; Бюл. № 1. – 4 с.
10. Степчин Я.А. Математична модель поперечних коливань торцевої фрези при чистовому фрезеруванні / Я.А. Степчин // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2013. – № 1 (64). – С. 11–15.
11. Степчин Я.А. Математична модель динаміки торцевого фрезерування різних схем різання / Я.А. Степчин // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2013. – № 3 (66). – С. 37–41.
12. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др. – М. : Машиностроение, 1987. – 846 с.
13. Сенькин Е.Н. Конструкция и эксплуатация фрез, оснащенных композитами / Е.Н. Сенькин, Г.В. Филиппов, А.В. Колядин. – Л. : Машиностроение, 1988. – 63 с.

СТЕПЧИН Ярослав Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металорізальних верстатів і систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- динаміка механічних систем;
- математичне моделювання.

E-mail: stepchiny@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 20.05.2015