

І.Є. Грицай, к.т.н., доц.
Національний університет "Львівська політехніка"

ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙНО-ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ НА ВИНИКНЕННЯ ТА ПІДТРИМАННЯ АВТОКОЛИВАНЬ ПІД ЧАС РІЗАННЯ

Наведено результати аналітичного дослідження деформаційно-теплової динамічної системи процесу різання. Показано, що зсув фаз між зміною інтенсивності зсуву та теплою і температурою пластично деформованого шару є однією з причин виникнення та підтримання автоколивань під час різання. Отримано аналітичний вираз динамічної характеристики деформаційно-теплого контуру пружної системи процесу різання.

Більшість процесів різання характеризується динамічною невірноваженістю. До найбільш динамічно незбалансованих та таких, що супроводжуються ударними навантаженнями, належать процеси зубонарізання в умовах обкочування. Основною причиною виникнення незагасаючих автоколивань під час зняття з заготовки шару металу є відставання сили різання від товщини зрізів [1–3]. Під час нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами поряд з автоколиваннями присутні вимушені коливання, які відбуваються на частоті, близькій до зубцевої частоти та кратних їй більш високих частотах. Дія сили різання при цьому характеризується, в залежності від умов обробки, або послідовністю окремих імпульсів, максимальні значення яких змінюються за певним законом, або ж неперервним коливанням відносно середнього значення, при цьому середнє значення сили змінюється в часі обробки за законом, близьким до синусоїдального [4]. Вплив вимушуючої дії сили різання на пружну систему процесу різання та величина зсуву фаз між вхідним і вихідним сигналами залежить від передавальної функції розімкненої пружної системи зубофрезерного верстату.

Проте поза увагою дослідників залишився інший фактор, який, поряд з відставанням сили різання від товщини зрізів, є причиною автоколивань. Це – зміна механічних властивостей оброблюваного металу на різальному клині. Безпосередньою причиною цього може служити як зміна параметрів зрізів, так і локальна зміна механічних властивостей, зокрема, межі міцності та межі текучості матеріалу заготовки. Таким чином внаслідок збільшення межі міцності на певній ділянці шляху різання зростають інтенсивність зсувних деформацій, сила різання та кількість теплоти, джерелом якої є енергія пластичного деформування. Чим вища міцність металу, тим більша робота зсуву, тим більше енергії вивільниться в результаті перетворення припуску у стружку. Одночасно зростає інтенсивність нагрівання і температура текучого шару, але, разом з тим, підвищується темп розміщення матеріалу. В результаті зниження механічних властивостей зменшиться робота деформації та вивільниться менше енергії, що призведе до зменшення теплоутворення і зниження температури шару, що зазнав деформування. В результаті інтенсивність розміщення знижується, знову підвищується міцність металу і збільшуються сила і робота різання та кількість утвореної внаслідок пластичного деформування енергії, а цикл повторюється. Таким чином, другим фактором виникнення і стійкого підтримання коливань при різанні, поряд із відставанням сили різання від товщини зрізів, можна вважати фазовий зсув між зміною механічних властивостей пластично деформованого шару на різальному клині і силою різання.

В зв'язку з викладеним вище для аналізу динаміки процесу різання виникає необхідність розгляду додаткового контуру зв'язку пружної системи процесу різання. За аналогією до еквівалентної пружної системи верстату (ЕПС) [1] введемо поняття еквівалентної пружної системи процесу різання (ЕПС-ПР), яку утворимо з двох паралельних контурів. Перший контур визначимо як контур стружкоутворення; його аналітичне описання і дослідження впливу на стійкість пружної системи верстату наведено Кудиновим В.А. [1]. На інших засадах виведено закономірності динамічної системи процесу різання за зв'язком з даним контуром у роботі [5], в якій закономірності формування сили різання в перехідному процесі встановлено в функції від процесів стружкоутворення, контакту по задній поверхні інструмента та умов певільного різання. Другий контур ЕПС-ПР визначимо як деформаційно-тепловий. Взаємозв'язок між даними контурами показано на рис. 1.

Встановимо вплив температури на зміну механічних властивостей шару металу, який підлягає зрізу, і на силу різання. Розглянемо головну складову сили різання, яка є функцією питомої сили p різання і площі поперечного перетину зрізів S :

$$P = p \cdot S = \sigma \cdot \xi \cdot S = \sigma \cdot \xi \cdot a \cdot b = \sigma \cdot a_c \cdot b, \quad (1)$$

де σ – нормальне напруження; a, b – відповідно, товщина і ширина поперечного перетину зрізу; ξ – коефіцієнт осадження стружки; a_c – товщина стружки.

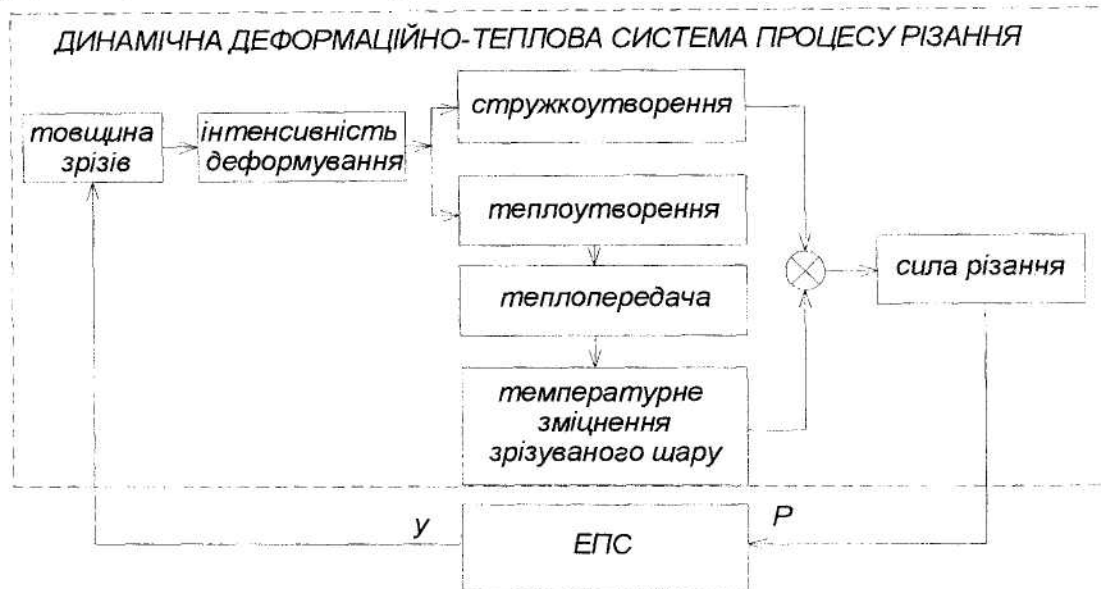


Рис. 1. Структурна схема еквівалентних систем процесу різання та пружної системи верстату

Відношення головної (тангенційної) складової сили різання до ортогональної координати – товщини зрізу є статичною характеристикою процесу різання:

$$\frac{P}{a} = p \cdot b = K_p$$

де K_p – коефіцієнт різання.

Враховуючи зв'язок між нормальним (y напрямку швидкості різання) напруженням і дотичним напруженням τ , що діє в умовній площині зсуву:

$$\sigma = \tau \cdot \cos \Phi,$$

силу P можна виразити залежністю:

$$P = \tau \cdot a_c \cdot b \cdot \cos \Phi, \quad (1)$$

де Φ – кут зсуву.

Дотичне напруження є функцією інтенсивності зсувної деформації, яка характеризується відносним зсувом ε . На основі принципової подібності механізмів пластичного деформування при стиску, розтязі і різанні та єдності кривих зміцнення при різанні і механічних випробуваннях дотичне напруження заміняють умовною межею текучості при стиску, а математичну залежність між напруженням текучості і інтенсивністю деформування для процесів стиску, розтягу і різання апроксимують функцією виду [6]:

$$\tau = C \cdot \varepsilon^a,$$

де сталі C і a залежать від властивостей матеріалу, який підлягає обробці.

Замінімо степеневу залежність напруження від деформації лінійною залежністю при умові, що межі, в яких розглядається зміна напруження, є досить малими. При виконанні цієї умови можна знехтувати різницею між дійсним і прийнятим значеннями напруження зсуву:

$$\tau = k_\theta \cdot \varepsilon,$$

де k_θ – коефіцієнт температурного зміцнення матеріалу. Підставивши значення τ у формулу (1), отримаємо:

$$P = k_\theta \cdot \varepsilon \cdot a_c \cdot b \cdot \cos \Phi \quad (1.1)$$

Залежність (1.1) є неперервною, монотонною, тому може бути лінеаризованою розкладом за ступенями малих прирощень змінних при усталеному процесі різання. Використовуючи

формулу Тейлора, представимо прирощення сили різання (1.1) як результат температурного зміцнення при умовно незмінній товщині зрізів:

$$\Delta P = \varepsilon_0 \cdot a_{c0} \cdot b_0 \cdot \cos \Phi_0 \cdot \Delta k_\theta + k_{\theta 0} \cdot a_{c0} \cdot b_0 \cdot \cos \Phi_0 \cdot \Delta \varepsilon - k_{\theta 0} \cdot a_{c0} \cdot b_0 \cdot \cos \Phi_0 \sin \Phi_0 \cdot \Delta \Phi + k_{\theta 0} \cdot \varepsilon_0 \cdot b_0 \cdot \cos \Phi_0 \cdot \Delta a_c, \quad (2)$$

де $\varepsilon_0, a_0, b_0, \Phi_0, k_{\theta 0}$ – середні значення відповідних параметрів, відносно яких розглядається їх зміна.

Геометрична інтерпретація коефіцієнта температурного зміцнення – тангенс дотичної до діаграми течії матеріалу при заданій температурі, тобто:

$$k_\theta = \frac{d\tau}{d\varepsilon} = \frac{dP}{dS} = \frac{l_0}{S_0} \cdot \frac{dP}{dl} = \frac{l_0}{a_0 \cdot b_0} \cdot \frac{dP}{dl}.$$

Візьмемо припущення, що передній кут інструмента не перевищує 5° , що існує, зокрема, в більшості стандартних зубонарізних модульних черв'ячних фрез. Оскільки для малих передніх кутів $\frac{l}{a} = \operatorname{ctg} \Phi = \xi$, а $dl = V \cdot dt$, то у прирощеннях отримуємо:

$$\Delta k_\theta = \frac{\xi_0}{V_0 \cdot b_0} \cdot \Delta \left(\frac{dP}{dt} \right). \quad (3)$$

З експериментальних кривих зміцнення матеріалу при механічних випробуваннях, які будують у координатах “деформація–напруження” [7] для певних температурно-швидкісних режимів можна визначити кутовий коефіцієнт дотичної до діаграми зміцнення при зміні параметрів ε і τ у невеликих межах. На основі принципової подібності деформаційних процесів під час основних видів деформування матеріалів (різанні, стиску і розтягуванні) з даних діаграм можна знайти прирощення відносного зсуву для різання:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \tau}{k_{\theta 0}},$$

де $k_{\theta 0}$ – значення кутового коефіцієнта, при якому розглядають зміну параметрів ε і τ . За аналогією до приведеного вище перетворення при визначенні коефіцієнта температурного зміцнення знайдемо прирощення напруження зсуву при умовно постійному значенні зміцнення матеріалу заготовки:

$$\Delta \tau = \Delta \left(\frac{dP}{dS} \right) \cdot \cos \Phi_0 = \frac{l_0}{S_0} \cdot \Delta \left(\frac{dP}{dl} \right) \cdot \cos \Phi_0 = \frac{\xi_0}{V_0 \cdot b_0} \cdot \Delta \left(\frac{dP}{dt} \right) \cdot \cos \Phi_0,$$

звідки

$$\Delta \varepsilon = \frac{\xi_0 \cdot \cos \Phi_0}{V_0 \cdot b_0 \cdot k_{\theta 0}} \cdot \Delta \left(\frac{dP}{dt} \right). \quad (4)$$

Третя складова правої частини рівності (2) містить прирощення кута зсуву. Пояснення даного прирощення полягає у зміні довжини елементарної ділянки, на якій відбувається зсув за той же час, внаслідок зміни механічних властивостей матеріалу у зоні різання, при незмінній товщині зрізу. Для передніх кутів, що незначно відрізняються від нуля і малих прирощень кута Φ маємо: $\Phi \approx \operatorname{tg} \Phi = \frac{a}{l}$, на підставі чого

$$\Delta \Phi = -\frac{a_0}{l_0^2} \cdot dl = -\frac{1}{\xi_0 \cdot l} \cdot dl = -\frac{1}{\xi_0 \cdot V_0} \cdot \frac{dl}{dt} = -\frac{1}{\xi_0} \cdot \partial V, \quad (5)$$

де $\partial V = \frac{\Delta V}{V_0}$ – відносне прирощення швидкості різання. Для знаходження цієї величини

використаємо іншу форму запису кута зсуву: $\Phi \approx \operatorname{tg} \Phi = \frac{1}{\xi}$,

а у прирощеннях малих величин

$$\Delta \Phi = -\frac{d\xi}{\xi_0^2}. \quad (5.1)$$

Прирівнявши праві частини рівностей (5) і (5.1), отримуємо: $\partial V = \frac{d\xi}{\xi_0}$, тобто відносне прирощення швидкості різання внаслідок теплової зміни механічних властивостей матеріалу дорівнює відносному прирощенню коефіцієнта осадження стружки.

З залежності між відносним зсувом і коефіцієнтом ξ (формула Тіме) для випадку, коли передній кут близький до нуля, знайдемо співвідношення між їх диференціалами:

$$\varepsilon = \xi + \frac{1}{\xi}; \quad d\xi = d\varepsilon \cdot \left(1 - \frac{1}{\xi^2}\right)^{-1},$$

звідки:

$$\Delta\Phi = -\frac{d\varepsilon}{\xi^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\xi^2}\right)^{-1} = -\frac{d\varepsilon}{(\xi^2 - 1)} = -\frac{1}{V_0 \cdot b_0 \cdot k_{\theta 0}} \cdot \frac{\xi_0 \cdot \cos \Phi_0}{(\xi_0^2 - 1)} \cdot \Delta\left(\frac{dP}{dt}\right). \quad (5)$$

Запишемо формулу сили різання (2), використовуючи отримані значення відхилення її змінних (3)–(5), опустивши для спрощення запису знаки природень. Перейдемо від виразу товщини стружки до товщини зрізів, тоді, після підстановки значень (3)–(5) і тотожних перетворень отримуємо:

$$P = a_0 \cdot \cos \Phi_0 \cdot \frac{\xi_0^2 + 1}{V_0} \cdot \frac{dP}{dt} + a_0 \cdot \cos \Phi_0 \cdot \frac{\xi_0^2 \cdot \cos \Phi_0}{V_0} \cdot \frac{dP}{dt} + \\ + \frac{a_0 \cdot \cos \Phi_0 \cdot \sin 2\Phi_0}{2V_0} \cdot \frac{\xi_0^2}{(\xi_0^2 - 1)} \cdot \frac{dP}{dt} + k_{\theta 0} \cdot (\xi_0^2 + 1) \cdot b_0 \cdot \cos \Phi_0 \cdot a,$$

або в операторній формі:

$$P = \frac{K_p}{1 - T_{p\theta} p} \cdot a.$$

Передавальна функція деформаційно-теплого контуру еквівалентної пружної системи процесу різання буде мати вигляд:

$$W = \frac{P}{a} = \frac{K_p}{1 - T_{p\theta} p},$$

де $T_{p\theta}$ – температурна стала часу сили різання.

При ступенях деформації та значеннях коефіцієнта осадження, які є при різанні ($\xi > 2,5$) справедлива приблизна рівність: $\frac{\xi_0^2}{(\xi_0^2 - 1)} \approx 1$. З врахуванням цього вираз температурної постійної часу динамічної характеристики деформаційно-теплого контуру маємо:

$$T_{p\theta} = \frac{a_0 \cdot \cos \Phi_0}{V_0} \cdot \left[\xi_0^2 (1 + \cos \Phi_0) + 1 + \frac{\sin 2\Phi_0}{2} \right].$$

Оскільки при можливих значеннях кута зсуву величина $\frac{\sin 2\Phi_0}{2}$ є на порядок меншою, ніж перша складова виразу у квадратних дужках, а при обробці конструкційних сталей $\frac{1}{\xi_0^2} \approx 0$, то остаточно отримуємо:

$$T_{p\theta} = \frac{a_0 \cdot \cos \Phi_0 \cdot \xi_0^2}{V_0} \cdot (1 + \cos \Phi_0).$$

Постійна часу $T_{p\theta}$ характеризує відставання сили різання від зміни механічних властивостей матеріалу, який підлягає обробці, внаслідок дії теплоти різання. Наприклад, при $a_0 = 0,35$ мм; $V_0 = 60$ м/хв.; $\Phi_0 = 20^\circ$, що відповідає значенню $\xi = 2,75$, час, необхідний для формування нового значення сили різання, становить 0,0048 с.

Включення додаткової паралельної ланки у контур процесу різання призводить до зміни передавальних функцій розімкненої пружної системи процесу різання і розімкненої пружної системи зубофрезерного верстату в цілому, зміщуючи їх в область нестійкого стану. На рис. 2 показано АПФЧ пружної системи процесу різання, до складу якої входить коливна ланка (сталі часу $T_1 = 0,0011$ с і $T_2 = 0,0074$ с), яка характеризує контур стружкоутворення та аперіодична ланка зі сталою часу $T = 0,0024$ с, яка характеризує деформаційно-тепловий контур при середній максимальній товщині зрізу 0,2 мм і статичній передавальній функції 2500 мм/Н. Сумарна характеристика цієї системи свідчить, що система стає потенційно нестійкою при частоті, вищій від 420 хв.⁻¹, і втрачає стійкість на частотах понад 5200 хв.⁻¹.

Знак аперіодичної ланки, яка міститься в знаменнику передавальної функції, визначається процесами деформування. При зміщенні оброблюваного матеріалу коефіцієнт температурного зміщення, інтенсивність деформування і зміна швидкості різання додатні, що рівнозначно зменшенню часу, необхідного для формування нового значення сили різання. Знак виразу у знаменнику аперіодичної ланки буде від'ємним, що свідчить про її потенційну нестійкість. У цьому випадку зміщення деформованого об'єму металу, який переходить у стружку, може призвести до зростання сили різання, підвищення інтенсивності коливань та втрати стійкості у пружній системі верстата.

Якщо нагрівання оброблюваного матеріалу внаслідок пластичного деформування супроводиться його розміщенням, то знаки прирощення коефіцієнта температурного зміщення, інтенсивності деформування і швидкості різання змінюються на протилежній, а перехідний процес буде стійким.

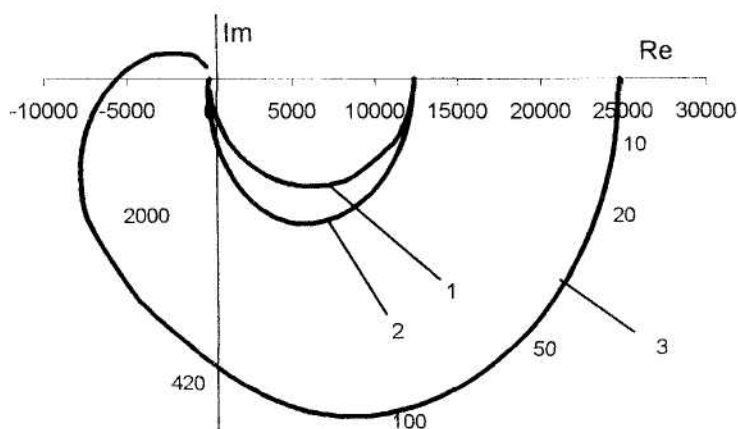


Рис. 2. АФЧХ ЕПС ПР: 1 – аперіодична ланка; 2 – коливна ланка; 3 – сумарна характеристика

Таким чином, отримане динамічне рівняння сили різання і рівняння передавальної функції можна використовувати для аналізу за допомогою частотних методів пружної системи процесу різання та розімкненої еквівалентної пружної системи верстата в цілому, зокрема, для визначення запасу стійкості та умов її втрати пружною системою верстата, якщо відома динамічна характеристика його ЕПС.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кудишов В.А. Динамика станков. – М.:Машиностроение, 1967. – 359 с.
2. Ташлицкий П.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов // Вестник машиностроения. – 1960. № 2. С. 45–50.
3. Эльзберг М.Э. К теории и расчету устойчивости процесса резания металла на станках // Станки и инструмент. – 1971. – № 11. – С. 6–11. – № 12. – С. 1–6. – 1972. № 1. – С. 1–7.
4. Грицай І.Є. Моделювання спектру гармонічних складових сили різання у процесах зубофрезерування в умовах обкочування // “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні й приладобудуванні”. – 2000. – № 412. – С.18–32.
5. Грицай І.Є. Динамічна модель пружної системи процесу різання // Динаміка, міцність та проектування машин і приладів // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2001 (у друці).
6. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машигиз, 1956. – 367 с.
7. Теория пластических деформаций металлов / Под ред. Е.П. Унксова, А.Т. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.

ГРИЦАЙ Ігор Євгенович – кандидат технічних наук, доцент Національного університету “Львівська політехніка”.

Наукові інтереси:

– процеси механічної обробки.