УДК 621.914

Я.А. Степчин, к.т.н., доц.
Житомирський державний технологічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ НЕСТАЦИОНАРНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ЗОНИ РІЗАННЯ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ЗА МАТЕМАТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ

Розглянуто взаємовплив зміни температурного поля зони різання, термічних напружень різального леза та його стійкості. Виконано моделювання нестаціонарних температурних полів зони різання методом кінцевих різниць. Представлено результати дослідження розробленої моделі нестаціонарних температурних полів.

Ключові слова: *температура різання, термічні напруження, торцеве фрезерування, продуктивність, цикл.*

Постановка проблеми. Теплові процеси, що виникають при різанні металів, характеризуються великою складністю та неоднозначністю зв'язку температурного поля і параметрів обробки, перш за все, продуктивності та якості обробленої поверхні. Підвищення стійкості різального інструмента залежно від обраної пари матеріалів інструмент–деталь та параметрів режиму різання досягається шляхом нагріву оброблюваної заготовки або різального інструменту або, навпаки, застосуванням змащувально-охолоджуваних рідин, що знижують температуру в зоні різання.

Важливість підтримки оптимальної температури різання, яка відповідає максимальній продуктивності процесу обробки при заданих умовах і інструментальному матеріалі вперше було виділено Н.Н. Зоревим [1]. Залежність продуктивності обробки від температури різання характерна для більшості інструментальних матеріалів і має екстремальний характер: навіть при незначному відхиленні температури (особливо у область більш високих значень) продуктивність процесу різко знижується. Тому можливість максимально точного визначення температур у зоні різання, прогнозування їх змін залежно від умов обробки дозволить підвищити продуктивність процесів обробки різанням.

Також на стійкість інструментів суттєво впливає не лише абсолютні значення температури різання, але й швидка зміна у часі температурного поля різального клину, яка характерна для переривчастих процесів обробки. При цьому в інструментальному матеріалі виникають значні термічні напруження, що за певних умов можуть призводити до суттєвого зростання його зношування [2, 3]. Особливо важливим фактором впливу термічні напруження є [2, 4]:

- при використанні крихких інструментальних матеріалів (твердих сплавів, НТМ), коли відносно невеликі напруження розтягу у поверхневих шарах робочих поверхонь інструментів можуть привести до значного зниження їх стійкості;
- у випадках, коли переривчастість різання обумовлена самим процесом обробки і є можливість регулювати тільки загальний час циклу або співвідношення періодів робочих та холостих ходів.

Тому саме фрезерування, особливо торцеве, чистове (з використанням НТМ) та чорнове (різальними елементами з твердого сплаву) вимагає докладного дослідження динаміки температурних полів зони різання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні дослідження теплофізики різання виконувалися А.Н. Резніковим, Л.А. Резніковим, С.Г. Редько, С.С. Силіним, П.І. Бобриком [2, 4, 5]. Зв'язок стійкості та продуктивності обробки з рівнем температур зони різання розглядали у своїх роботах Н.Н. Зорев та В.А. Остаф'єв [1, 2]. Останній на основі узагальнення експериментальних даних визначив зв'язок зміни термічних напружень у різальному клині інструмента з коливаннями температури різання (і при переривчастому різанні). У цьому напрямку також слід відмітити роботи [6, 7, 8], які розглядали використання інструментальних матеріалів (перш за все, НТМ та твердих сплавів), особливості теплоутворення та тепловідвід при обробці матеріалів високої твердості, сталей та чавунів. Так у [6] встановлено, що низький коефіцієнт тертя та висока теплопровідність НТМ забезпечують швидкий відвід тепла від різальної окрайки в тіло інструмента. Теплопровідні властивості основних інструментальних матеріалів, що використовуються для високопродуктивної обробки близькі. Так температурний градієнт в інструментальних матеріалах при точінні сталей у НТМ становить 473 К/мм, твердому сплаві – 503 К/мм, мінералокераміці – 523 К/мм. Залежності впливу швидкості різання на температуру при обробці НТМ та твердим сплавом тотожні.

У [9] міцність та стійкість інструментів розглядалися залежно від розподілення розрахованих температурних полів в різальному лезі та теплових напружень, які ці поля викликають. У роботі [10] розроблено теоретичні засади комплексного моделювання контактних напружень, температур та інтенсивності теплових потоків на робочих поверхнях різального леза зуба кінцевих фрез. Але застосування різних інструментальних матеріалів при торцевому і кінцевому фрезеруванні та відмінності у умовах обробки вимагають додаткових досліджень.

© Я.А. Степчин, 2013

Для випадку переривчастого різання, яке характерне для багатьох процесів обробки, завдання визначення швидкозмінних поточних температур ускладнюється додатковими факторами впливу. Крім параметрів режиму різання, пари матеріалів інструмент–деталь, умов деформування та тертя на значення температур у зоні обробки впливають часові співвідношення періодів робочого (з різанням) та допоміжного (без різання) рухів різального леза.

Проте при торцевому фрезеруванні співвідношення періодів робочого та допоміжного рухів може регулюватися, як співвідношеннями розмірів інструмента та оброблюваної деталі, швидкістю різання так і конструкцією фрези, що надає додаткові можливості для цілеспрямованого управління тепловими полями зони різання.

Мета дослідження. Моделювання нестаціонарних температурних полів зони різання при торцевому фрезеруванні з відтворенням їх динаміки при переривчастому різанні.

Викладення основного матеріалу. Існуючі методи аналітичного розрахунку температури зони різання мають достатню точність, що є особливо важливим для випадків ускладнення її експериментального визначення. Схема утворення температурного поля базується на розв'язку диференціального рівняння теплопровідності (1) для кожної точки зони різання (перш за все, різального елемента) в будь-який момент часу за умов, що теплота деформації утворюється у площині зсуву, а теплота тертя – на площинах контакту різального інструмента зі стружкою та виробом:

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[a(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[a(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[a(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right]-V_x\frac{\partial T}{\partial x}-V_y\frac{\partial T}{\partial y}-V_z\frac{\partial T}{\partial z}+\frac{W(x,y,z,t)}{C(T)\rho(T)}; \quad (1)$$

$$a(T)=\frac{k(T)}{C(T)\rho(T)},$$

де $k(T)$ – теплопровідність; $C(T)$ – теплоємність, $\rho(T)$ – густина матеріалу, V_x, V_y, V_z – проекції вектора швидкості рухомого джерела тепла по відповідних осях, $W(x,y,z,t)$ – інтенсивність джерела тепла.

Метод кінцевих різниць, застосований з метою вирішення квазістаціонарного рівняння (1) дозволяє після розбивання усієї зони визначення температурного поля на елементи розмірами h (рис. 1) визначати температуру в кожному окремому елементі з обраною дискретністю часу.

Значення температури кожної точки поля (елемента) в будь-який момент часу процесу різання та її зміни, згідно з рівнянням (1), може бути визначено за формулою:

$$T_{m,n}^{p+1}=T_{m,n}^{p}\left[1-\frac{m_1\Delta t}{(\Delta x)^2}\frac{(k_{j-1}+k_{j+1})}{(\rho C+\rho_p C_p)}-\frac{2m_1\Delta t(k_{j-1}+k_{j+1})}{(\rho C+\rho_p C_p)(\Delta y_n)^2}\right]+$$

$$+\frac{m_1\Delta t}{(\rho C+\rho_p C_p)(\Delta x)^2}(T_{m+1,n}^{p}k_{m+1}+T_{m-1,n}^{p}k_{m-1})+ \quad (2)$$

$$+\frac{2m_1\Delta t}{(\rho C+\rho_p C_p)(\Delta y_n)^2}(T_{m,n+1}^{p}k_{n+1}+T_{m,n-1}^{p}k_{n-1})$$

де $T_{m,n}^{p}, T_{m,n}^{p+1}$ – температури точки, яка розглядається перед початком та після закінчення процесу теплопровідності відповідно (в межах проміжку часу Δt); $k_{j-1}, k_{j+1}, k_{i-1}, k_{i+1}$ – коефіцієнти теплопровідності на границях елементів з повітрям, які враховують випромінювання та конвекцію.

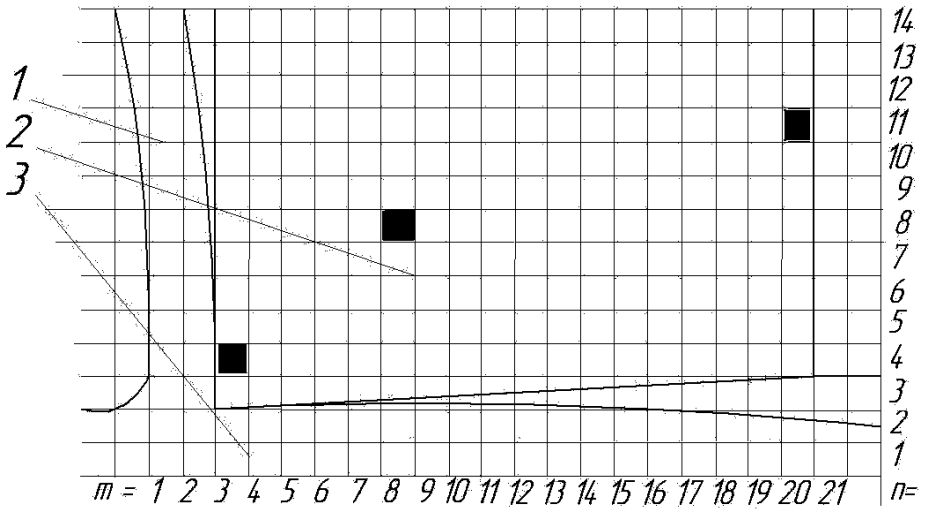


Рис. 1. Схема розбивки зони обробки різальною пластиною з гексаніту на елементи: 1 – стружка, 2 – різальний клин, 3 – заготівка

Рівняння (1) є квазілінійним, оскільки теплоємність, теплопровідність і щільність середовищ залежать від температури. Проте при виборі проміжку часу Δt достатньо малим ($\Delta t < 10^{-3}$ с) ці величини можна приймати постійними протягом часу Δt. Відповідно, рівняння (2) приводиться до лінійного з достатньою для розрахунків точністю.

Граничні умови визначаються залежно від ділянок, що розглядаються.

З контактних поверхонь різального клину (елементи 2.7–2.14 та 6.3–20.3) відбувається тепловідвід у зовнішнє середовище (рис. 1). Для даних поверхонь використовується гранична умова III роду:

$$\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\alpha}{k}\left[T - T_{зс}\right] = 0, \tag{3}$$

де T – температура граничної точки (елемента), $T_{зс}$ – температура зовнішнього середовища, α – коефіцієнт тепловіддачі.

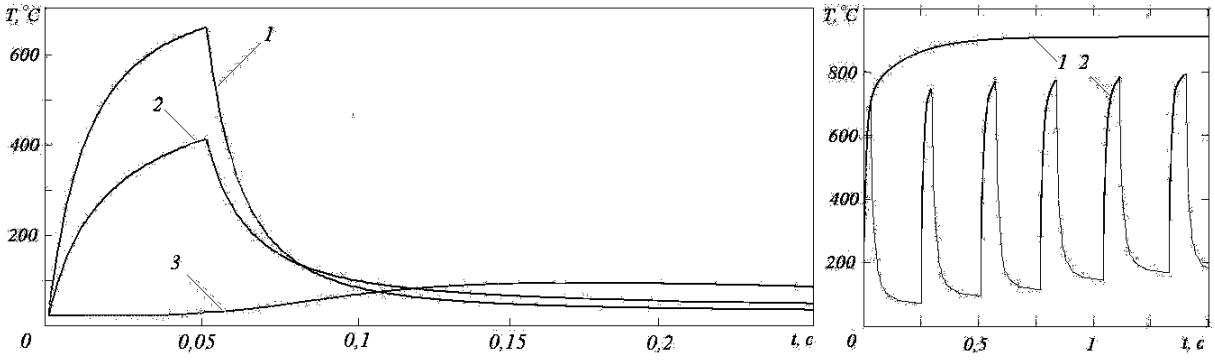
По поверхнях контакту (елементи 3.14–21.14 та 21.4–21.14), де межа зони проходить в суцільному матеріалі, приймаються граничні умови II роду:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = q, \tag{4}$$

де n – нормаль до поверхні, що розглядається.

Використовуючи наведені формули, було виконано моделювання теплових процесів у різальних елементах з гексаніту для чистового торцевого фрезерування сталевої заготовки (рис. 2) та твердого сплаву для чорнового фрезерування чавуну з метою визначення динаміки зміни температурних полів залежно від умов різання та часу циклу робочого та допоміжного рухів різального елемента. Розглянуті варіанти застосування змащувально-охолоджувальних рідин (ЗОР) протягом усього циклу роботи окремого різального елементу або частини його. Вплив ЗОР враховувався підвищеною інтенсивністю теплообміну відкритих поверхонь різального елементу з повітрям за рахунок тепловіддачі та конвекції. Також моделювалися зони підігріву різної інтенсивності різальних елементів фрези з метою забезпечення мінімальних значень зміни їх температури (охолодження) протягом циклу обробки. За даними [2], саме швидка зміна температурного поля різального елемента є основним фактором інтенсивного руйнування останнього за рахунок виникнення пікових термонапружень.

Розрахунки виконувалися у програмному середовищі *MATCAD* з застосуванням методу Писмана–Ракфорда, який знімає обмеження явного методу розв'язку рівняння (2) та зменшує кількість обчислень. Дискретність послідовних ітераційних обчислень Δt становила 0,001 та 0,0001 с.



а) *б)*

Рис. 2. Залежність розрахункової температури в зоні різання: а – протягом першого циклу (оберту фрези) переривчастого різання; б – при безперервному (1) та переривчастому різанні (2). Інструментальний матеріал – гексаніт. V = 180 м/хв. (n = 240 хв.$^{-1}$)

На рисунку 2, *а* представлено зміну розрахункової температури в окремих точках різального елемента з гексаніту під час першого циклу переривчастого різання торцевого фрезерування заготовки з загартованої конструкційної сталі: *1* – максимальна температура на передній поверхні різального елемента, *2* – температура в різальному клині на глибині 2 мм під зоною, що відповідає графіку *1*, *3* – температура на опорній поверхні різального елемента товщиною 6 мм (елементи розбивки з визначеними температурами позначені на рис. 1 затемненими прямокутниками). Проміжок зростання температур (графіки *1* та *2*) відповідає процесу різання, який відбувається протягом 0,05 с, зниження

температури – періоду руху різального леза без різання (0,02 с). В кінці циклу температури розглянутих зон близькі і входять в діапазон 40…80 °С.

Рисунок 2, *б* показує відмінність середньої розрахункової температури на передній поверхні різального елемента при безперервному (1) та переривчастому (2) різанні і однакових параметрах режиму обробки (V = 180 м/хв., S_z = 0,05 мм/зуб., t = 0,5 мм).

Середня температура зони різання зростає повільно і після $5 \cdot 10^2$ циклів – обертів фрези (що відповідає для обраних умов довжині заготовки 500 мм) не досягає значень температури, які відповідають безперервному різанню.

При торцевому фрезеруванні переривчастість різання є складовою процесу обробки і управління температурою шляхом вибору співвідношення часу різання і холостого ходу дозволяє підвищувати продуктивність процесу. Підвищення продуктивності обробки може досягатися за рахунок збільшення швидкості різання з підтримкою середньої оптимальної температури для вибраної пари матеріалів інструменту та деталі.

Для випадку чистового торцевого фрезерування загартованої сталевої заготовки шириною 100 мм фрезою діаметром 250 мм за рахунок призначення більш високої швидкості різання, яка відповідає оптимальній температурі різання, розрахованій за наведеною моделлю, досягається збільшення продуктивності обробки на 28 % відносно нормативів. При чорновому торцевому фрезеруванні твердосплавними різальними елементами залежно від співвідношення ширини фрезерування і діаметра фрези розрахункове збільшення продуктивності обробки становить 20…46 %.

Запропонована методика базується на аналітичному визначенні температурного поля різання і без застосування тривалих вартісних експериментальних досліджень дозволяє підвищувати продуктивність торцевого фрезерування залежно від співвідношення періодів робочого та холостого ходів різальних елементів фрез.

Висновки

1. Розроблена уточнена математична модель температурних полів різального елемента торцевої фрези на основі методу кінцевих різниць.
2. Для чисельного розв’язку рівнянь моделі застосовано абсолютно стійкий метод Писмана–Рокфорда, який знімає обмеження явного методу та зменшує кількість розрахунків.
3. На основі аналізу розробленої моделі визначено умови підвищення стійкості різального елемента та продуктивності процесу торцевого фрезерування за рахунок вибору умов, які забезпечують підтримку оптимальної температури різання.

У подальших дослідженнях необхідно дослідити зв’язок стійкості різальних елементів (продуктивності обробки) торцевих фрез з впливом застосування ЗОР і підігріву різального елемента.

Список використаної літератури:

1. *Зорев Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов / *Н.Н. Зорев*. – М. : Машгиз, 1956. – 367 с.
2. *Остафьев В. А.* Расчет динамической прочности режущего инструмента / *В.А. Остафьев*. – М. : Машиностроение, 1979. – 168 с.
3. *Остафьев В.А.* Расчет нестационарных температурных полей при резании металлов / *В.А. Остафьев, А.А. Чернявская*. – М. : ЦНИИТЭ Стройдормаш, 1970. – 16 с.
4. *Резников А.Н.* Тепловые процессы в технологических системах : учебник / *А.Н. Резников, Л.А. Резников*. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
5. *Редько С.Г.* Процессы теплообразования при шлифовании металлов / *С.Г. Редько*. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1962. – 231 с.
6. *Thomason P.F.* Stady-State thermal stresses in wedge-shape cutting tools / *P.F. Thomason* // Trans ASME. – 1975. – B 97, № 3. – Pp. 1060–1066.
7. *Лещинер Я.А* Лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов / *Я.А. Лещинер, Р.М. Свиринский, В.В. Ильин*. – К. : Техніка, 1981. – 120 с.
8. *Нощенко О.М.* Підвищення ефективності використання твердосплавних різців на основі об’ємного моделювання їх термоміцності : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *О.М. Нощенко* // Нац. техн. ун-т України "КПІ". – К., 2003. – 20 с.
9. *Захарченко П.В.* Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристалических сверхтвердых материалов / *П.В. Захарченко, В.М. Волкогон, А.В. Бочко*. – К. : Наук. думка, 1992. – 188 с.
10. *Крижановський С.А.* Прогнозування параметрів процесу контурної обробки кінцевими фрезами на основі моделювання процесу різання та точності обробки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *С.А. Крижановський* // Нац. техн. ун-т України "КПІ". – К., 2005. – 20 с.

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

Наукові інтереси:

- динаміка механічних систем;
- математичне моделювання.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2013