

П.П. Москвін, д.ф.-м.н., проф.
П.П. Мельничук, к.т.н., доц.
В.Б. Крижановський, к.т.н., доц.
П.В. Кур'ята, ст. викл.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

ТЕМПЕРАТУРНІ ПОЛЯ ПРИ ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ ФРЕЗАМИ ІЗ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ: ФІЗИЧНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ, ІІ МАТЕМАТИЧНЕ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

З використанням пакета прикладних програм MATLAB отримані розрахункові дані про розподіл температури в зоні різання при обробці металів фрезами із надтвердого матеріалу. Результати відповідають фізичним представленням про поширення тепла в геометрично складних системах і підтверджують застосовуваність запропонованого математичного опису для моделювання температурних полів при чистовій обробці плоских поверхонь.

Підвищення ефективності процесів металообробки передбачає наявність достовірної кількісної інформації про енергії взаємодії різальної поверхні інструмента з оброблюваною деталлю або, що те ж саме, про температурні поля в зоні взаємодії матеріалів. Температура контактуючих пар при різанні відображає не тільки силові параметри процесу, але й відповідає за структурні фазові перетворення у поверхневому шарі оброблюваного матеріалу. Останнє відіграє важливу роль у формуванні механічних властивостей оброблюваної поверхні [1–4]. Актуальність проведення теплового аналізу цих процесів підтверджує і висловлювання у [6] про можливість розгляду температури на поверхні різця як багатовимірного параметра оптимізації для всього процесу лезової обробки виробу. Таке припущення представляється цілком обґрунтованим, оскільки температура процесу є його комплексним параметром, який залежить як від силових характеристик різання, так і геометрії різальної системи, теплофізичних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів тощо.

Аналізу розподілу температури у взаємодіючих середовищах при лезовій обробці матеріалів у літературі приділяється достатньо уваги. Основними роботами у цій області металообробки на даний момент варто вважати роботи [1–5]. У цих монографіях узагальнені основні теоретичні посилання, які дозволяють виконувати теоретичний аналіз як стаціонарного, так і нестаціонарного температурного поля у виробі, стружці і різальному інструменті в залежності від геометричних параметрів технологічної системи, її теплофізичних властивостей і умов проведення процесу різання. Основну увагу автори цих робіт віддають аналітичним способам розв'язку поставленої теплової задачі, коли основні зусилля дослідників направлені на обґрунтування того чи іншого наближення при використанні аналітичних розв'язків диференціального рівняння теплопровідності. При такому підході важко робити остаточний висновок про достовірність отриманої кількісної інформації, оскільки невідповідність теорії експерименту може бути обумовлена не тільки невизначеністю в теплових параметрах технологічних систем, але й пов'язана з правомірністю застосування того чи іншого аналітичного розв'язку для опису конкретного технологічного процесу [7]. Вказані теоретичні труднощі в описі теплових процесів усуваються при використанні числових методів розв'язку диференціальних рівнянь теплопереносу. При такому підході з'являється можливість достовірного опису умов роботи теплових джерел при різанні металів, тоді як математичні труднощі, що виникають у розрахунках розподілу температури в геометрично складних і різноманітних за тепловими властивостями середовищах, долаються за рахунок використання ЕОМ і перенесення акценту у складностях розв'язку на математичне забезпечення задачі. Необхідно відмітити, що саме числовий метод теоретичного аналізу визнається більш перспективним і таким, що дозволяє отримувати найбільш повну і достовірну інформацію про теплові процеси при різанні [7].

Найбільш плідним підходом у рішенні теплових задач в геометрично складних системах, до яких відноситься взаємозв'язана система “деталь – стружка – інструмент”, є числовий метод розв'язку, який використовує розбиття областей теплопереносу на кінцеві елементи [5, 7, 8]. Метод кінцевих елементів дозволяє розв'язувати рівняння в частинних похідних у геометрично складних системах при суттєвій економії машинного розрахункового часу за рахунок використання неявних скінченнорізницевого схем. Саме можливість збільшення часового кроку інтегрування диференціальних рівнянь дозволяє отримувати кількісну інформацію навіть при суттєвому зростанні числа скінченнорізницевого алгебраїчних рівнянь, що розв'язуються.

Якщо оцінки ефективності методів розв'язку диференціальних рівнянь теплопровідності більшості авторів співпадають і перевага віддається числовому способу розв'язку рівнянь, то питання про моделювання роботи теплових джерел все ж залишається відкритим, хоча місця їх дії не викликають особливого сумніву. З фізичних міркувань очевидно, що при різанні металів лезовими інструментами те-

πλο повинно виділятися в області пластичної деформації виробу при стружкоутворенні і на поверхнях контакту передньої та задньої поверхонь інструмента з виробом із-за роботи сил тертя. Тому дискусії в літературі в основному стосуються вибору математичних виразів, які моделюють дії цих джерел, розмірів зони їх дії та розташування, а також числових параметрів, що характеризують їх функціонування [1, 2]. При цьому саме математичні залежності, що моделюють функціонування джерел, у переважній кількості робіт, служили як підганяльні параметри теоретичних моделей теплопереносу експериментальним результатам. В цьому аспекті необхідно відмітити наявність тісного фізичного взаємозв'язку між задачею опису силової та енергетичної взаємодії в системі. Дійсно, саме перевищення механічних напружень границі текучості матеріалу при різанні викликає до дії теплові джерела. Останнє і означає, що форма та інтенсивність роботи джерел теплової енергії у виробі повинні визначатися з розв'язку задачі про розподіл механічних напружень при різанні, а саму задачу про поширення тепла розглядати як тепломеханічну [8].

Метод кінцевих елементів був використаний, наприклад, в роботах [3, 4] для рішення двовимірної задачі теплопровідності в системі "різець – виріб – стружка". Типові результати розрахунків положень ізотерм у взаємодіючих тілах за даними [3] представлені на рис. 1. У виконаному аналізі джерелом теплової енергії вважалась область пластичної деформації і в цілому отримана картина температурного поля несуперечливо описувала шуканий розподіл. Дійсно, ізотерми теплових потоків представляють собою поверхні, які концентрично розходяться та центри яких розташовані в зоні пластичної деформації матеріалу, тобто в районі леза різця. Температура досягає свого максимального значення в області дії джерела і поступово зменшується в міру поширення теплового поля на більший обсяг простору оброблюваного виробу. Форма ізотерм уже при невеликих віддаленнях від зони пластичної деформації нагадує відповідну картину теплових полів при поширенні тепла від сферичного джерела у напівнескінченне середовище. В той же час залишається не зовсім зрозумілою фізична причина, що відповідає за появу нахилу ізотерм до поверхні деталі на віддалі від гострих кутів технологічної системи. В цих областях, де крайові ефекти незначні, ізотерми повинні бути перпендикулярні будь-якій поверхні, якщо теплопередача через неї у навколишнє середовище відсутня взагалі або ж вона надто мала. Це безпосередньо виходить з рівняння

Фур'є для теплопровідності $q = -\lambda \frac{dT}{dz}$ при $q = 0$, де z – координата, направлена по нормалі до поверхні розділу середовищ.

Даним роботи [3] властивий іще один недолік. Як правило, при обробці металів різанням швидкості переміщення джерела тепла (області пластичної деформації) виявляються, по крайній мері, порівняними зі швидкостями поширення тепла у виробі [7]. В такій ситуації вважати джерело тепла нерухомим представляється не виправданим, хоча моделювання руху останнього призводить в числових методах розв'язку до появи суттєвих математичних труднощів при реалізації методу як кінцевих елементів, так і більш простого методу кінцевих різниць. В будь-якому випадку врахування руху джерела тепла повинно відобразитися у трансформації сферичної симетрії ізотерм відносно положення джерела в іншу. Ізотерми теплового поля від джерела, що рухається, повинні бути стиснуті у напрямку руху і розтягнутися у протилежному напрямку. Ці твердження теоретично доведені [1] і знаходять своє експериментальне підтвердження, наприклад, в роботі [9].

В той же час, рис. 1 ілюструє практично сферичну форму поширення тепла у напівнескінченні по відношенню до джерела середовища. Таке рішення може бути прийнятним тільки для випадку малих швидкостей і товщинах різання, коли характеристичне число Пекле ($Pe = \frac{V_x l}{a}$, де V_x – швидкість різання; l – лінійний розмір джерела; a – температуропровідність деталі як середовища поширення тепла) не перевищує $Pe < 10$ [1].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_i \Delta T + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{q_i}{c_i \rho_i}; \tag{1}$$

де $a_i = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i}$ – температуропровідність середовища; c_i , ρ_i і λ_i – відповідно питома теплоємність, щільність та теплопровідність матеріалу середовища; Δ – оператор Лапласа; V_x – швидкість різання; t – час; індекс $i = 1, 2, 3$ відноситься до конструкційного матеріалу різця, надтвердого його лезу та оброблюваного матеріалу.

Рівняння (1) передбачає використання в аналізі системи координат, яка рухається зі швидкістю V_x і яка в наших розрахунках жорстко зв'язана з точкою контакту різця фрези та оброблюваною поверхнею. В об'ємі різця фрези відсутні як джерела, так і стоки теплової енергії. Тому при застосуванні рівняння (1) до областей різця фрези, позначеними індексами $i = 1, 2$, приймалось $q_1 = q_2 = 0$. Область пластичної деформації, утворення якої стимульовано процесом різання, і відповідне їй джерело теплової енергії повинні бути задані функцією потужності теплового потоку q_3 .

В роботах [5, 7] виконано розрахунок температурного поля у тривимірному його представленні для геометричних моделей обробки, які складаються із взаємозв'язаних об'ємів виробу, стружки і різця. Аналіз отриманих рішень, як для нестационарної задачі, так і для стаціонарних умов не виявив специфічних особливостей теплообміну в такому складному випадку. Однак тривалість та вартість розрахунків виявилися значними [5, 7]. Тому в даній роботі прийняте рішення обмежитися двовірним аналізом і переписувати вираз (1) у формі:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{q_i}{c_i \rho_i}; \tag{2}$$

Перш ніж обговорювати постановку граничних умов до системи рівнянь (2), доцільно обговорити можливості програмних пакетів, які є у розпорядженні авторів, і оцінити їх перспективи при розв'язку крайових задач для рівнянь у частинних похідних. Такий підхід дозволить уникнення формулювань складних форм умов теплопереносу, реалізувати які не вдається, і до розрахунків оцінювати реальність досягнення поставлених в роботі обчислювальних цілей. Необхідно врахувати і перспективи можливого технічного застосування розроблюваної методики аналізу в реальних умовах технологічних НДІ або підприємств, які в даний час мають в експлуатації достатньо швидкодіючі ПЕОМ і надалі зможуть використовувати запропоновану методику аналізу.

В даній роботі як можливі представники з математичного та програмного забезпечення розглянуті наступні пакети обчислювальних систем: MATLAB (MathWorks Inc.), Mathematica (Wolfram Research Inc.), Mathcad (MathSoft), Maple (Waterloo Maple Inc.). Обчислювальні можливості та зручності реалізації в їх середовищі даної задачі для цих пакетів суттєво розрізняються. Виконаний аналіз показав, що для розв'язку диференціальних рівнянь у частинних похідних найбільш перспективним і потужним пакетом є система MATLAB (MathWorks Inc.) [11]. Саме йому і було віддано перевагу в роботі. Основним аргументом на користь застосування пакета MATLAB служили наступні його переваги:

- високоефективний спосіб розбиття заданого геометричного простору на кінцеві елементи оптимальних розмірів за методом Делоне [11];
- можливість незалежно задавати параметри теплопереносу в різних областях модельованої системи;
- можливість вибору граничних умов на границі кожної області у відповідності із задачею Діріхле (задані температури на границях областей), Неймана (задані теплові потоки на границях) та їх комбінації;
- використання при розрахунках адаптивних схем і алгоритмів рішення, які суттєво скорочують час розв'язку рівнянь.

Вказані математичні переваги даного пакета програм органічно доповнюються різноманітними сервісними можливостями. Так, для розв'язку поставленої задачі найбільш корисним представляється наявність графічного інтерфейсу для діалогової обробки параметрів рівняння теплопровідності, можливість візуалізації теплових полів, їх фрагментів і параметрів. Важливою перевагою даного пакета також необхідно признати і його оснащеність потужною системою виведення демонстраційної інформації з анімаційними (що протікають в часі) ефектами. Наведені переваги пакета програм MATLAB дозволили орієнтувати формулювання крайової задачі саме на використання цього програмного забезпечення.

Постановка граничних умов починалась з вказання геометричних параметрів системи. Дані по конфігурації взаємодіючих елементів системи вводились у пам'ять ПЕОМ за допомогою спеціально створеного координатного планшета з вказаними координатами характерних точок системи, що моделюється.

В системі MATLAB передбачено введення геометричних розмірів в режимі рисування. Однак наш досвід роботи у такому режимі показав, що надання інформації на екрані безпосереднім рисуванням схем взаємодіючих тіл призводить до складнощів в інтерпретації отриманого зображення обчислювальною

При цьому частота розбиття областей, що аналізуються, збільшується в міру наближення розглядуваної області до районів різких змін геометрії системи (кути, точки контактів матеріалів тощо). Відмітимо, що для оцінки об'ємів обчислювальних робіт, виконуваних в даній задачі, справедливе твердження, що кількість вузлів кінцевих елементів наближено відповідає кількості шуканих змінних і порядку смужкуватої матриці, з якою працює ЕОМ. У нашому випадку на кожному часовому кроці інтегрування диференціальних рівнянь кількість кінцевих елементів досягала 1300, в залежності від геометрії модельованої системи. Останнє означає, що при розв'язку систем алгебраїчних рівнянь на кожному часовому кроці ЕОМ приходилося виконувати операції лінійної алгебри з матрицями, кількість елементів яких знаходиться на рівні 1100.

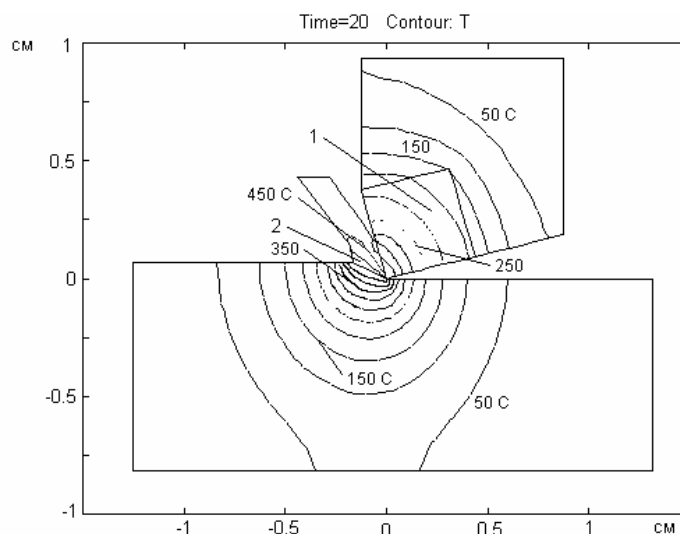
Принциповим фрагментом роботи з пакетом програм є питання про динамічний опис теплових явищ або, що те ж саме, про опис часової еволюції температурного розподілу. В короткій інструкції по роботі з пакетом MATLAB інформація про перехід від чисто математичного формулювання проблеми у безрозмірних одиницях до фізично реальних параметрів системи вкрай обмежена й інколи суперечлива. Згідно з нашим модельним розрахунком теплового поля в геометричних правильних фігурах, коли існують аналітичні рішення задачі теплопереносу, часовий крок інтегрування в пакеті відповідає безрозмірному часу

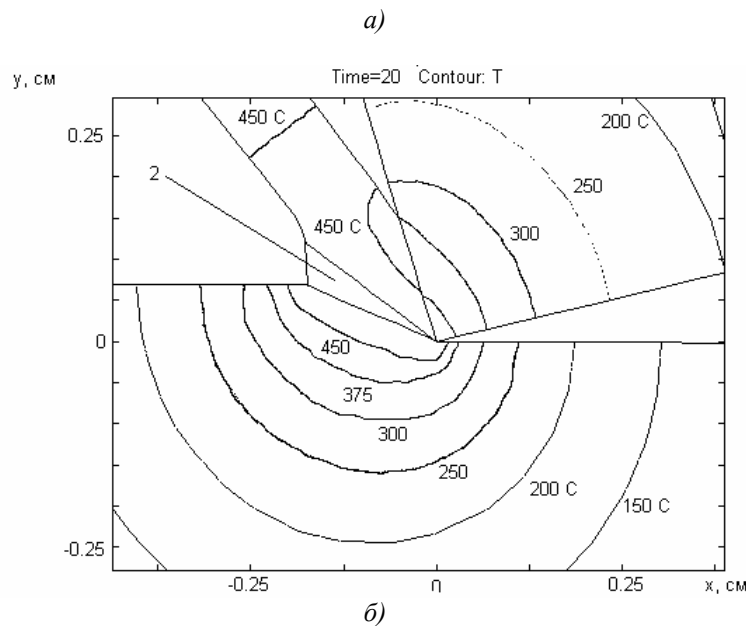
або числу Фур'є [1, 2]: $F_0 = \frac{at}{l_0^2}$, де a , l_0 – відповідно теплопровідність матеріалу і типовий геометричний розмір елемента взаємодіючої системи, вибраний як базовий.

У розглядуваному випадку таким елементом доцільно вибрати різець фрези в його конструкційній частині. Дійсно, спільність аналізу передбачає проведення розрахунків для різних режимів різання, обробки різних матеріалів. Однак у всіх цих випадках розміри різця фрези залишаться незмінними. Тому такий вибір базового елемента представляється обгрунтованим. З врахуванням сказаного і даних по теплових і геометричних параметрах конструкційної частини різця фрези маємо: $F_0 = 0,07t$ [c] ($a = 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $l_0 = 0,01 \text{ м}$). Початковою умовою при розв'язку крайової задачі був сталий розподіл температури у всіх областях системи і рівній кімнатній.

Отриманий розрахунковий розподіл температури в різці фрези, стружці та виробі через 5 хв процесу різання, що відповідає безрозмірному часу Фур'є $F_0 = 20$ (верхня частина рисунка), показано на рис. 3. Необхідно відразу відмітити, що розрахунковий розподіл температури, даний на рис. 3, не суперечить вказаним на початку статті загальним вимогам до форми ізотерм. Так, на відстані від границь взаємодіючих областей, коли крайові ефекти не відіграють суттєвої ролі, лінії ізотерм перпендикулярні границі розділу метал–повітря, що відповідає відсутності теплового потоку у навколишнє середовище. При переході границь контакту матеріалів з різними тепловими характеристиками спостерігається зміна величин нахилу дотичних до відповідних ізотерм. Це є наслідком реалізації граничної умови (3) для рівності теплових потоків, що передаються від одного середовища до іншого. Це положення найбільш чітко ілюструється даними рис. 3, а на контакті між лезом різця фрези та його конструкційною частиною (ізотерма 200 °C і 150 °C) та рис. 4, в (ізотерма 100 °C).

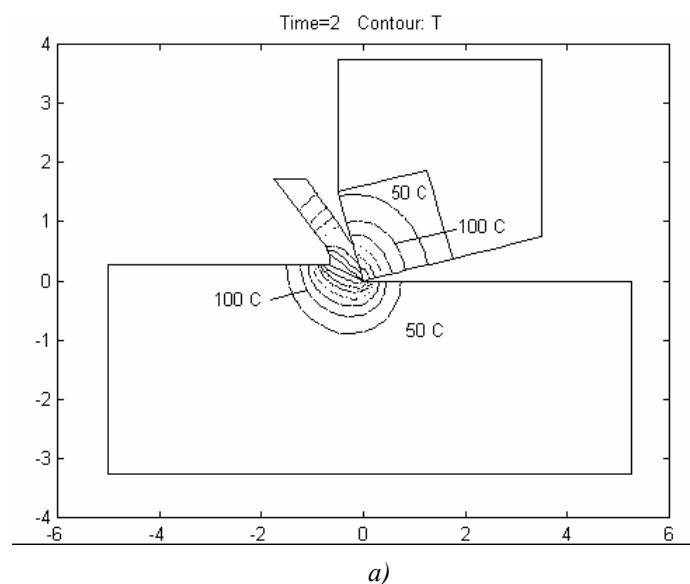
Кількісні дані про положення ізотерм дозволяють оцінити розподіл теплових потоків між різцем фрези, стружкою та об'ємом заготовки. Такі дані виявляються корисними як при оцінці адекватності моделі теплопереносу реальної ситуації, так і для попереднього кількісного співставлення отримуваних результатів експериментальних даних по цих параметрах [4].

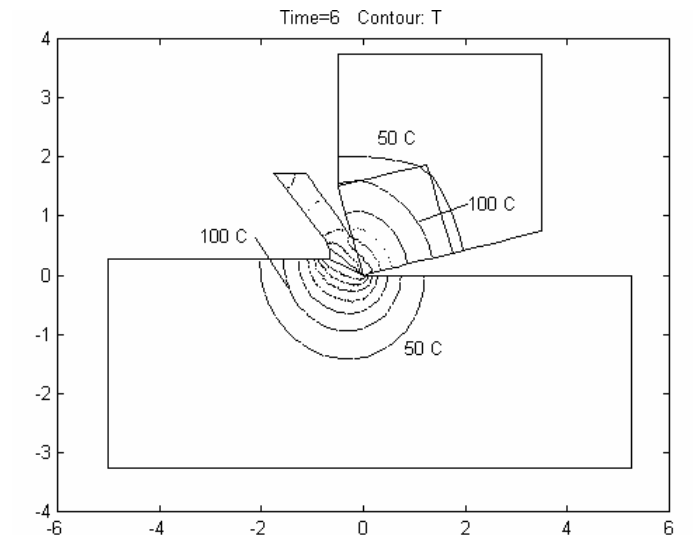




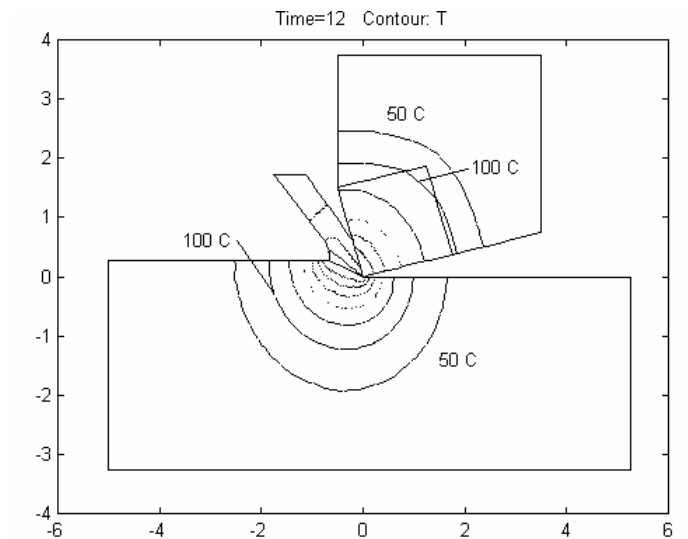
Ρις. 3. Ροζροαυνοβε τεμπερατυρε νε πε ζόνε ριζάννε φρεζοε με άνατβεροδο ματεριάλου.
 Άασ ριζάννε – 5 χε (F₀ = 20): 1 – λεζο ριζά φρεζε; 2 – οβλαςτε πλαςτυοική δεφομαοίε – δεζερελο τεπλε με τεμπερατυροε 500 °C;
 α – ζαγάλνε καρτινα βζαεμοδιόοιχ μερεδοβιυε;
 β – οβλαςτε ριζάννε τα δεζερελο τεπλε

Δεα οοίνοε βελιοινη τεπλοβιχ ποτοοίε υ οίδοβοδίε μερεδοβιυε βικοριςτοβυαβεζα ζαοον Φυρ’ε δεα τεπλοπρωόδινοςτε υ φορμεί $q_i = \lambda_i \frac{\Delta T}{\Delta z}$, δε Δz – βιδςτανη μεζε ιζοτερμα με οοοίε δεζερελο τεπλε. ζ βραουβαννεμ βιδμίννοςτε υ τεπλοπρωόδινοςτα κοταοτυοοιοι μερεδοβιυε ι ποοζε, να οίε ποοιρíoυοτε ποτοοι τεπλε, ρίββιδνοοινη μεζε τεπλομ, οοε υοοδιε βε ροζυοοε, β ριζεοζ φρεζε τα οβροβλοβυαοε δεταλ β ρίββιζο βιδποβιδαε 14 %, 16 % ι 70 %. Οτροβιαοε ενεργετιοινη ρίββιδνοοινη τροοι βιδρίζιυοοε βιδ δεαοι αυτροβ [1, 4, 5] β βίκο ζβίββηοινη τεπλοβιδδαοίε β ριζεοζ φρεζε. Άεο ρεζυλταο ναοιη ροζροαυνοβε ε προοινη ναοίδοκο βιοοοίε τεπλοπρωόδινοςτε ματεριάλου λεζο ριζά φρεζε – κομποζιτο 10. Βιδμίοιμο, οοε τεπλοπρωόδινοςτε κομποζιτο 10 ρίββιζο β 1,8 ραζε βιυοα τεπλοπρωόδινοςτε ματεριάλου δεταλ – οοαυου οο 40. Τομυ μοζοα ρεζυλταο βιυοα, οοε οτροβιαοε ρεζυλταο δεα βκαζοαοίε γεομετροίε προοεζυ ριζάννε νεπογανο κορελοοοε ζ εκπεριμενταλνιμ οοίκομα [1, 4].





б)



в)

Рис. 4. Часова еволюція температурного поля в системі “різець фрези – стружка – деталь:
 а – $F_0 = 2$ ($t = 20$ с); б – $F_0 = 6$ ($t = 60$ с); в) $F_0 = 12$ ($t = 120$ с)

В роботі проводиться обчислювальний експеримент по визначенню впливу форми джерела тепла та його орієнтації у просторі на розподіл температур в контактуючих середовищах. З точки зору теорії різання, це відповідає моделюванню дії джерел тепла, які описують різні напружені стани матеріалу при його різанні. Так, розрахункові дані при використанні моделей різання з однією площиною зсуву по моделі Мірчанта і по моделі Окслі з областю деформації, обмеженою паралельними лініями [15], показали, що форма джерела суттєво відображається на положенні ізотерм тільки у безпосередній близькості до зони різання, тоді як в міру віддалення від джерела лінії постійних температур зливались одна з одною, наближаючись до картини теплового поля, що створюється точковим джерелом [1] (рис. 3). В той же час, в області різання, де існують значні теплові градієнти, форми ізотерм суттєво залежать від прийнятої моделі пластичної деформації.

У зв'язку з виявленням достатньо слабкої залежності конфігурації температурного поля від форми джерела можна висловити наступне міркування відносно вибору температури різання як параметру оптимізації всього процесу лезової обробки. Це питання розглядається докладніше у монографії [6] та його фізичне обґрунтування відмічене на початку даної роботи. В то же час отримані нами розрахункові результати відносно впливу форми джерела свідчать про те, що геометричні параметри процесу різання достатньо слабо впливають на розподіл температури у зоні контакту. Результати розрахунків картини розподілу температур для вказаних випадків практично співпадають уже при віддаленні від джерела на декілька міліметрів. Оскільки параметри області пластичної деформації визначаються умовами прикладення сил різання, то можна припустити, що слаба залежність картини поля від форми джерела є відображенням достатньо слабо вираженого екстремуму в залежності температури процесу від його режимів.

Тоді пошуку оптимальної температури, як екстремального стану від всіх умов процесу різання, на положітій функції може відповідати декілька режимів із суттєво відмінними параметрами. Останнє повинно означати низьку ефективність способу оптимізації процесу різання по його температурі у відповідності з методами, запропонованими в [6].

На рис. 4 представлені дані по часовій еволюції температурного поля в системі “різець фрези – стружка – деталь” на початковій стадії процесу різання (стадія врзання). Із збільшенням часу різання при низьких швидкостях обробки матеріалу, які відповідають числам Пекле $Pe < 10$, товщина шарів, що прогріваються, як деталі, так і різця фрези та стружки зростають. В силу малих об’ємів матеріалу стружки, цей елемент системи прогрівається найшвидше і температура стружки стає рівною температурі джерела через декілька секунд. Прогрівання масивної деталі і достатньо об’ємного, у порівнянні зі стружкою, різця фрези відбувається набагато повільніше. По закінченні часового інтервалу $F_0 > 2$ форма ізотерм в деталі та різці фрези стає подібною ізотермам, які утворюються у необмеженому середовищі нескінченно потужним джерелом [1]. Це і означає, що теплове поле як би “забуло” форму джерела тепла, яке його створило. В той же час, в околі області пластичної деформації, навіть при більшому часі протікання процесу ($F_0 > 6$), форми ізотерм відслідковують форму джерела енергії. Якщо це – високотемпературний стан, який відповідає за кінцеві механічні властивості виробу, то вибір форми джерела, як і моделі пластично деформованого стану, може виявитися принциповим фрагментом старанного теплового аналізу.

Як видно з рис. 4, для початкової стадії процесу ($F_0 = 2$) характерна наявність великих швидкостей підвищення температури. Так, різниця температур між різальною поверхнею леза і його конструкційною частиною досягає $\Delta T = 400^\circ\text{C}$, що достатньо багато. Такі градієнти температур повинні викликати появу в системі механічних напружень. Величину цих напружень можна оцінити за простим виразом: $\sigma = \alpha E \Delta T$, де E і α – модуль Юнга і температурний коефіцієнт лінійного розширення термонапруженого матеріалу. З врахуванням даних по температурному коефіцієнту лінійного розширення та модулю Юнга матеріалу леза різця фрези [14] і результатів рис. 4, величина термічних напружень може досягати 1,1 ГПа. Ця величина близька до границі міцності композиту 10, який, згідно з [14], знаходиться на рівні 2,4 ГПа. Тому при врзанні фрези у заготовку руйнування останньої може виявитися досить вірогідним процесом, особливо якщо прийняти до уваги, що прийнята оціночна формула може використовуватися тільки при лінійному розподілі температури в матеріалі. Розподіл температури у лезі різця фрези, згідно з даними рис. 3, 4, відрізняється від лінійного і відповідає функції інтеграла помилок, тобто є суттєво нелінійним. Врахування нелінійності розподілу температури ускладнить ситуацію і приведе до зростання величини термонапружень. Ці результати кількісно підтверджують дані [4] про великі швидкості наростання температури зони контакту різця з деталлю (до 700°C за 0,05 с) у початковий момент процесу обробки.

Необхідно відмітити, що час роботи використаних в роботі підпрограм бібліотеки MATLAB при пошуку розв’язків рівнянь теплопровідності в об’ємі різця фрези, виробу та стружці із загальною геометрією системи, подібній рис. 2, знаходиться на рівні 30–45 хв. Це досить прийнятний результат при використанні ПЕОМ з відносно невисокою швидкодією. Такий результат підтверджує ефективність методу кінцевих елементів у порівнянні з явною схемою рішення у відповідності з методом кінцевих різниць. У такій ситуації твердження авторів [7] про сумірність обчислювальних затрат при застосуванні явної та неявної схем розв’язку диференціальних рівняння нашими розрахунками не підтверджується.

Таким чином, результати першої частини роботи підтверджують можливість моделювання температурних полів при фрезеруванні матеріалів на базі пакета прикладних програм MATLAB. Отримані розрахункові результати відповідають фізичним уявленням про поширення тепла у геометрично складних системах і доводять застосовуваність запропонованого математичного опису для моделювання температурних полів при чистовій обробці матеріалів фрезами із надтвердих матеріалів.

Представлені результати відносяться до випадку розрахунку теплових полів при $Pe < 10$. У наступних частинах роботи будуть представлені результати роботи модифікованої програми, яка дозволяє розраховувати розподіл температури при різанні матеріалу з високою швидкістю ($Pe > 10$). Більш повний фізичний опис дії теплового джерела спільно з врахуванням високої швидкості його переміщення дозволить створити обчислювальні програми, які моделюють теплові процеси при різанні фрезами із надтвердого матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
3. Вульф А.М. Резание металлов. – М.: Машиностроение, 1973. – 327 с.

4. *Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С.* Диагностика процесса металлообработки. – К.: Техника, 1991. – 152 с.
5. *Tay F.O., Stewenson M.G., de Cahl Davis G.* Using the finite element method to determine temperature distributions in orthogonal machining // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.* – 1974, V.188. – № 55. – P. 627–638.
6. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
7. *Остафьев В.А.* Современные методы расчета температурных полей в зоне резания // *Физика и химия обработки матер.* – 1986. – № 2. – С. 134–136.
8. *Крищук М.Г., Тимчук А.Р., Глибка Е.А., Бондарь П.М.* Математическая модель процессов теплообмена и деформирование сопряженных тел при резании // *Резание и инструмент.* – 1988. – Вып. 40. – С. 99–105.
9. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении / Под ред. Грабченко А.И. и др. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 446 с.
10. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М: Наука, 1977. – 736 с.
11. Matlab, [http:// www.mathworks.com/](http://www.mathworks.com/).
12. *Барашков А.С.* Расчет теплового процесса упрочения стали при нагреве равномерного распределениями источниками // *Физ. и химия обработки матер.* – 2000. – № 4. – С. 82–89.
13. Марочник сталей и сплавов / Под ред. Сорокина В.Г. – М.: Машиностроение, 1989. – 639 с.
14. *Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Полонский Л.Г., Мельничук П.П.* Точение износостойких защитных покрытий. – Киев: Техника, 1997. – 142 с.
15. *Армарего С.Н., Дж. А. Браун Р.Х.* Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
16. *Роземберг А.М., Розенберг О.А.* Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – К.: Наук. думка, 1990. – 320 с.

МОСКВИН Павло Петрович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики і хімії Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– моделювання та керування технологічними процесами отримання матеріалів.

МЕЛЬНИЧУК Петро Петрович – кандидат технічних наук, доцент, ректор Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування;
– міцність конструкцій.

КРИЖАНОВСЬКИЙ В'ячеслав Борисович – кандидат технічних наук, доцент кафедри ПЗОТ Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

–

КУР'ЯТА Петро Володимирович – старший викладач кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– обробка матеріалів різанням.

Подано 10.09.2000

**Москвин П.П., Мельничук П.П., Крижановський В.Б., Кур'ята П.В.
Москвин П.П., Мельничук П.П., Крижановский В.Б., Курьята П.В.**

УДК 621.923:536.3

Температурные поля при обработке металлов фрезами из сверхтвердых материалов: физическая постановка задачи, ее математическое и программное обеспечение / П.П. Москвин, П.П. Мельничук, В.Б. Крижановский, П.В. Курьята

С использованием пакета прикладных программ "MATLAB" получены расчетные данные о распределении температуры в зоне резания при обработке металлов фрезами из сверхтвердого материала. Результаты соответствуют физическим представлениям о распространении тепла в геометрически сложных системах и доказывают применимость предложенного математического описания для моделирования температурных полей при чистовой обработке плоских поверхностей.

