

УДК 621.914

В.Б. Крижанівський, к.ф.-м.н., доц.*Житомирський державний технологічний університет***ПРОГРАМНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ
ФОРМУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ТОРЦЕВОМУ
ФРЕЗЕРУВАННІ**

Розглянуто особливості формування температурних полів при обробці металорізальним інструментом зі складним рухом різальних елементів. Наведено принципову схему проблемно-орієнтованого програмного комплексу, який дає можливість розв'язання задачі розподілу температур при складному русі джерела тепла.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У процесі торцевого фрезерування теплові явища відіграють важливу роль. Саме вони визначають температуру в поверхневому шарі обробленої деталі, яка має прямий вплив на характер пластичної деформації при обробці, силу різання та мікроструктуру поверхневого шару. Також температура істотно впливає на інтенсивність зношування різальних елементів фрези.

Розподіл теплоти в поверхневому шарі відбувається в основному шляхом явища теплопровідності. В результаті формується розподіл температури, який описується крайовою задачею для диференціального рівняння теплопровідності. Аналітичний розв'язок цієї задачі можна отримати лише для певного досить вузького класу випадків. Тому на практиці для вивчення теплових явищ користуються експериментальними методами або методами чисельного моделювання процесів розповсюдження тепла.

Основним недоліком усіх експериментальних методів є складність, а іноді й неможливість з їх допомогою отримати достовірні температурні поля в системі «деталь–стружка–інструмент».

Температурне поле дає уявлення не тільки про нагрівання різальних елементів фрези, але й про теплові потоки, які спрямовані в поверхневий шар оброблюваної деталі. Інформація про напрямки теплових потоків дозволяє обґрунтовано розв'язувати задачу про формування потрібних властивостей поверхневого шару виробу, оскільки якість обробленої поверхні тісно пов'язана з розподілом температури в поверхневому шарі деталі. Тому розробка спеціалізованих засобів розрахунку температурного поля в поверхневому шарі деталі є необхідною складовою частиною для

розв'язання важливої практичної задачі формування поверхні з заданими властивостями.

Аналіз досліджень і публікацій. Аналізу розподілу температури у взаємодіючих середовищах при лезовій обробці матеріалів у літературі приділяється достатньо уваги. Основними роботами в цій області металообробки до теперішнього часу варто вважати роботи [1–5], де узагальнені основні теоретичні посилання, що дозволяють виконувати теоретичний аналіз як стаціонарного, так і нестаціонарного температурного поля у виробі, стружці й різальному інструменті, залежно від геометричних параметрів технологічної системи, її теплофізичних властивостей і умов проведення процесу різання. Основну увагу автори цих робіт приділяють аналітичним способам рішення поставленої теплової задачі, коли основні зусилля дослідників спрямовані на обґрунтування того або іншого наближення при використанні аналітичних розв'язків диференціального рівняння теплопровідності. При такому підході важко робити остаточний висновок про вірогідність одержуваної кількісної інформації, тому що невідповідність теорії експерименту може бути обумовлена не тільки невизначеністю в теплових параметрах технологічних систем, але і пов'язана з правомірністю застосування того або іншого аналітичного розв'язку для опису конкретного технологічного процесу [5]. Зазначені теоретичні труднощі в описі теплових процесів усуваються при використанні чисельних методів рішення диференціальних рівнянь теплопереносу. При такому підході з'являється можливість достовірного опису умов роботи теплових джерел при різанні металів, тоді як виникаючі математичні труднощі в розрахунках розподілу температури в геометрично складних і різнорідних за тепловими властивостями середовищах переборюються за рахунок використання ЕОМ і перенесення акценту в складності розв'язання на математичне та програмне забезпечення задачі. Необхідно зазначити, що саме чисельний метод теоретичного аналізу визнається більш перспективним і таким, що дозволяє отримувати найбільш повну і вірогідну інформацію про теплові процеси при різанні [7].

Найбільш плідним підходом у розв'язання теплових задач у геометрично складних системах є чисельний метод, що використовує розбивку областей теплопереносу на скінченні елементи.

Метод скінченних елементів був використаний, наприклад, у роботах [3, 4] для розв'язання двовимірної задачі теплопровідності в системі різець-виріб-стружка. У роботах [5, 7] виконано розрахунок температурного поля в тривимірному його представленні для геометричних моделей обробки, що складаються з взаємопов'язаних

об'ємів виробу, стружки і різця. Аналіз отриманих розв'язків, як для нестационарної задачі, так і для стаціонарних умов, не виявив специфічних особливостей теплообміну в такому складному випадку. Однак тривалість і вартість розрахунків виявилася значною [5, 7]. Тому в даній роботі прийнято рішення обмежитися двовимірним аналізом.

Наведемо можливості програмних пакетів і оцінімо їхні перспективи при розв'язанні крайових задач для рівнянь у частинних похідних. У даній роботі як можливих кандидатів з математичного і програмного забезпечення розглянуто наступні пакети обчислювальних систем: MATLAB (MathWorks Inc.), Mathematica (Wolfram Research Inc.), Mathcad (MathSoft), Maple (Waterloo Maple Inc.). Обчислювальні можливості й зручності реалізації в їхньому середовищі для даної задачі істотно відрізняються. Виконаний аналіз показав, що для розв'язання диференціальних рівнянь у частинних похідних найбільш перспективним і потужним пакетом є система MATLAB (MathWorks Inc.). Саме йому і була віддана перевага в роботі. Основним аргументом на користь застосування пакета MATLAB послужила наявність потужної вбудованої мови програмування та можливість організації „спілкування” MATLABа із зовнішніми додатками через ActiveX канал.

Наведені переваги пакета програм MATLAB дозволили створити проблемно-орієнтоване програмне забезпечення для моделювання теплових явищ при торцевому фрезеруванні, що забезпечує розрахунок температурного поля від рухомих джерел, які рухаються по складних траєкторіях. Це пов'язано з тим, що удосконалення процесу обробки плоских поверхонь торцевим фрезеруванням можливе в напрямку зміни кінематики руху формоутворюючих елементів. Зокрема у [8], запропонований інструмент для обробки плоских поверхонь з обертовими різальними елементами. Рух будь-якої точки різального елемента являє собою криву, яка утворена в результаті трьох рухів: обертального руху фрези відносно власної осі і, разом з корпусом інструмента, поступального (подача) та обертального (головний рух) рухів корпусу. Розрахунок температурного поля від джерел, які рухаються за такою складною траєкторією, є досить складною проблемою.

Відомо, що переміщення джерела враховується в рівнянні теплопровідності за допомогою наявності членів, що включають першу похідну за просторовими координатами (1).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{q_i}{c_i \rho_i} \quad (1)$$

Але стандартні засоби бібліотеки MATLABa дають змогу розв'язувати лише крайові задачі для рівняння виду (2).

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

Спроби [9] привести рівняння (1) до (2) за допомогою підстановок призводять до того, що в доданку, який описує інтенсивність джерел, з'являється експонента в знаменнику. Під час обчислювальних експериментів це призводить до оперування величинами на межі розрядної сітки ЕОМ і як наслідок – до втрати стійкості обчислювальним процесом. У даній роботі пропонується інший підхід.

Рух джерела моделюється шляхом заміни неперервного переміщення дискретним. Траєкторія руху розбивається на ділянки і розв'язується набір крайових задач, в яких джерело тепла локалізується в межах однієї ділянки. Результуюче поле утворюється як суперпозиція температурних полів, отриманих у результаті розв'язання усіх крайових задач. Правомірність такого підходу забезпечується лінійністю рівняння (2).

Формулювання цілі статті. Метою даної роботи є опис створеної проблемно-орієнтованої системи для розрахунку температурних полів при чистовій обробці чавуну фрезами з надтвердих матеріалів. Створення цієї системи стимульовано не тільки актуальністю даної теплової задачі для проектування нового комбінованого інструмента, але й істотними успіхами інформаційних технологій, що відкривають перспективу розв'язання задачі з невеликими часовими і математичними витратами.

Структура системи. Програма, що реалізує моделювання теплових процесів складається з трьох наступних частин:

- HeatEmulation – головний проект нашої програми, що виконує завдання параметрів задачі, розрахунки, та результат розрахунків перетворює до формату даних для відображення.

- EngMATLib – є допоміжним, реалізує інтерфейс взаємозв'язку між нашою програмою та MATLABом. Тобто виконує функцію зв'язку з серверною частиною MATLABa для виконання деяких розрахунків.

- DirectXPresenter – проект, створений для реалізації компонента відображення графіки. Використовує бібліотеки DirectX.

Взаємодію між цими проектами можна зобразити у вигляді наступної схеми (рис. 1).

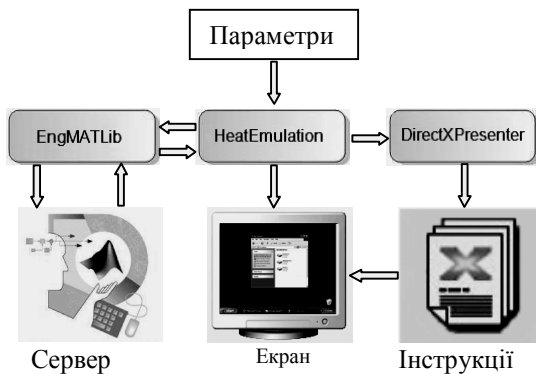


Рис. 1. Схема взаємодії складових системи

Структури даних і сервісні функції. Процес розв’язку задачі відшукування розподілу температурного поля в заданій області можна зобразити у вигляді наступного алгоритму (рис. 2).

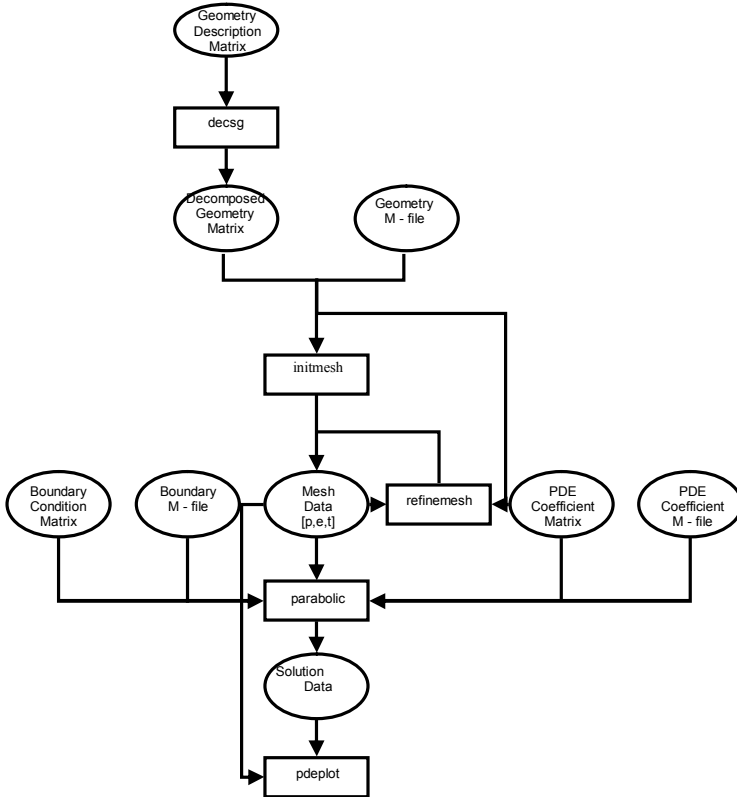


Рис. 2. Схема розв'язання крайової задачі

На рис.: прямокутники – функції, еліпси – дані, представлені матрицями або М-файлами. Стрілки вказують дані, необхідні для функцій. Опишемо більш детально призначення кожного елемента схеми.

Geometry Description Matrix (матриця описання геометрії) gd. Кожному стовпцю матриці gd відповідає геометричний об'єкт.

DECSG – функція, що розбиває всю геометрію розрахункової області на регіони.

Синтаксис: dl = decsg(gd, sf, ns).

Вхідні параметри: gd – матриця описання геометрії; sf – рядок символів, що містить формулу геометрії розрахункової області; ns –

числова матриця, кожному стовпцю якої відповідає геометричний об'єкт. Елементами стовпця є ASCII-коди символів.

Вихідні параметри: dl – матриця граничних сегментів зон.

Decomposed Geometry Matrix (матриця граничних сегментів зон) dl.

Перший рядок матриці dl містить коди типів граничних сегментів. Другий і третій рядки – початкові й кінцеві «x» координати сегментів. Четвертий і п'ятий рядки – початкові й кінцеві «y» координати сегментів. Шостий і сьомий рядки містять номери зон, що прилягають ліворуч і праворуч до граничного сегмента.

INITMESH – Створення (ініціалізація) трикутної скінченно елементної сітки.

Синтаксис: [p,e,t] = initmesh(dl).

Описання: повертає трикутну скінченно елементну сітку, побудовану в розрахунковій області, геометрія якої описана матрицею граничних сегментів dl.

Вихідні параметри: p – масив вузлів скінченно елементної сітки (стовпцям відповідають вузли, першому рядку – горизонтальні координати вузлів, другому рядку – вертикальні координати вузлів); e – матриця граничних елементів на границях поділу зон (стовпцям відповідають сторони скінченних елементів, що належать границям розділу зон або границі розрахункової області); t – матриця трикутних скінченних елементів (стовпцям відповідають трикутники).

REFINEMESH – перевизначення (згущення) трикутної сітки.

Синтаксис: [p1,e1,t1] = refinemesh(dl, p, e, t).

Описання: повертає перевизначену (згущену) версію трикутної скінченно елементної сітки, представленої матрицею граничних сегментів dl, матрицею вузлів p, матрицею граничних елементів e і матрицею трикутників t.

Boundary Condition Matrix (матриця граничних умов).

Описує коефіцієнти як для всієї границі розрахункової області, так і для окремих її сегментів.

PDE Coefficient Matrix (матриця коефіцієнтів PDE).

Рівняння в частинних похідних (PDE) визначено або матрицею коефіцієнтів або “коефіцієнтним” M-файлом для кожного з PDE коефіцієнтів: c, a, f, d. Зазначені коефіцієнти стосуються рівняння теплопровідності, яке у внутрішньому представленні MATLABa має вигляд (3):

$$d \frac{\partial u}{\partial t} - \text{div}(c * \text{grad } u) + au = f . \quad (3)$$

Якщо крайова задача розв'язується в області, яка поділяється на зони з різними теплофізичними властивостями, то відповідна змінна являє собою рядок символів, що складається з послідовності виразів для кожної зони, розділених знаком оклику, наприклад $a = 1 + \sqrt{x^2 + y^2} \sin(x+y) \cdot 2 \cdot x$.

У даному прикладі в зоні № 1 $a = 1 + \sqrt{x^2 + y^2}$, в зоні № 2 $a = \sin(x+y)$, а у зоні № 3 $a = 2 \cdot x$.

Аналогічна ситуація для інших коефіцієнтів рівняння (3).

PARABOLIC – розв'язок крайової задачі для рівняння параболічного типу.

Синтаксис: $u1 = \text{parabolic}(u0, tlist, b, p, e, t, c, a, f, d)$.

Можливі також наступні варіанти виклику даної функції:

$u1 = \text{parabolic}(u0, tlist, b, p, e, t, c, a, f, d, rtol)$,

$u1 = \text{parabolic}(u0, tlist, b, p, e, t, c, a, f, d, rtol, atol)$.

Тут $rtol$, $atol$ – відносна й абсолютна похибки розв'язку.

Описання: Розв'язує крайову задачу для рівняння (3). Вхідні параметри функції були описані вище.

Solution Data (вихідний параметр функції “parabolic”).

Кожний стовпець матриці $u1$ являє собою вузловий розподіл шуканої величини u у відповідний момент часу. У випадку системи PDE з N рівнянь $u1$ – матриця розміру $(N \times N, \text{length}(tlist))$. Кожний стовпець матриці $u1$ складається з N підстовпців, кожний з яких являє собою вузловий розподіл відповідної шуканої змінної u у відповідний момент часу.

Коли були сформовані вхідні дані та була розв'язана задача, результат рішення відображається за допомогою функції:

PDEPLOT – функція візуалізації.

Синтаксис: $h = \text{pdeplot}(p, e, t, \text{parameter1}, \text{value1}, \dots)$.

Описання: Засобами елементарної графіки можлива візуалізація скінченно елементної сітки, описаної змінними p , e , t , або вузлового розподілу розв'язку PDE. Для зручності відображення список дескрипторів об'єктів графічного вікна записується в спеціальну змінну.

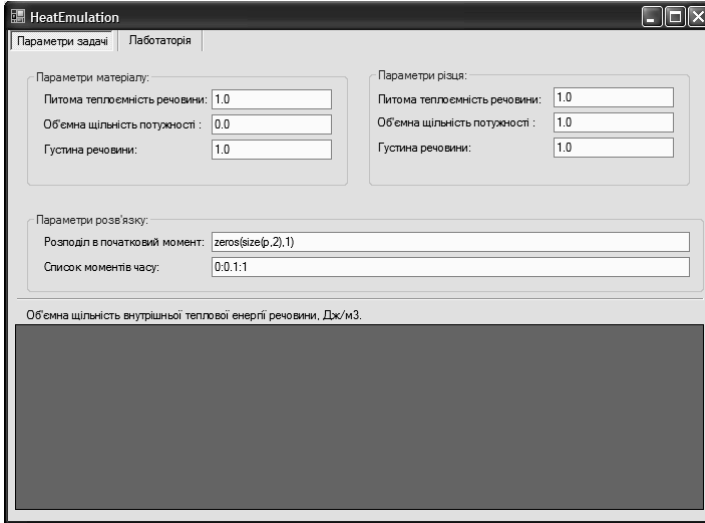


Рис. 3. Головне вікно програми

При запуску системи з'являється головне вікно програми (рис. 3). У ньому користувач встановлює параметри різця та матеріалу, що оброблюється, а саме:

- питома теплоємність речовини, з якої зроблено заготовку та різець;
- об'ємна щільність потужності джерел тепла;
- густина матеріалу заготовки та різця.

Також у цьому вікні задаються наступні параметри необхідні для розв'язування (рис. 4).

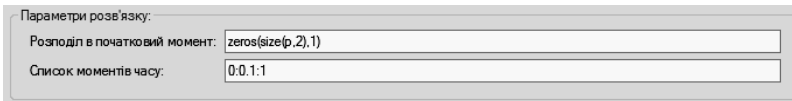


Рис. 4. Параметри розв'язку задачі

У поле “розподіл у початковий момент часу” записується інструкція на мові MATLABa, що формує початкові значення температурного розподілу в початковий момент часу. За замовчуванням формується масив з нульовими значеннями. Наступне поле вводу призначене для масиву, що визначає, в які моменти часу

потрібно розрахувати температурний розподіл. У це поле записується також інструкція на мові MATLABa, що створює цей масив.

У головному вікні наявна також закладка, яка називається “Лабораторія”. Це вікно (рис. 5) умовно розділено на дві частини. Перша (ліва) призначена для задання наступних параметрів:

- положення джерела відповідно до осі абсцис;
- положення джерела відповідно до осі ординат;
- довжина джерела;
- ширина джерела.

Інша частина відображає результати розрахунків.

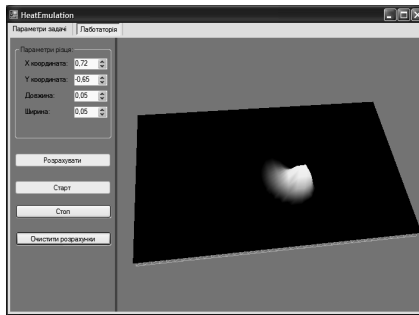


Рис. 5. Вікно для відображення розрахунків

При натисканні кнопки “Старт” ми робимо розрахунки для джерела, що рухається за заданою кривою. На рис. 5 наведено тестовий розрахунок температурного поля від джерела, яке рухається по трохохіді.

Висновок. Запропонована методика використання скінченно елементної бібліотеки MATLAB із середовища програмування C# показала свою життєздатність при створенні програмного забезпечення для розрахунку теплових полів при обробці металів різанням. У представленій роботі було розроблено концепцію розрахунку температурного поля на поверхні деталі, яка обробляється, та створене проблемно-орієнтоване програмне забезпечення для розрахунку температурного поля на поверхні деталі.

Результати роботи використовуються у діяльності лабораторії комп’ютерного моделювання в машинобудуванні для проектування різального інструменту зі складним рухом різальних елементів.

Створене програмне забезпечення припускає удосконалення за наступними напрямками:

1. Врахування складної геометрії ножа, що вимагає розгляду косокутного різання;
2. Розрахунок поля залишкових напруг у поверхневому шарі обробленої поверхні;
3. Розрахунок мікрогеометрії поверхневого шару;
4. Врахування об'ємного типу джерела. При цьому буде можливість спостерігати за поширенням тепла у внутрішніх шарах, а не тільки на поверхні.

Програмний комплекс має гнучку структуру та зручний інтерфейс, тому за необхідності може бути розширений і доповнений.

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. *Остафьев В.А.* Современные методы расчета температурных полей в зоне резания // Физ. и химия обработки матер. – 1986. – № 2. – С. 134–136.
6. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении // Под ред. Грабченко А.И. и др. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 446 с.
7. *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. – Vol. 188. – № 55. – Pp. 627–638.
8. *Мельничук П.П., Лосв В.Ю., Крижанівський В.Б., Головатенко О.В.* Особливості обробки плоских переривчастих поверхонь методом торцевого фрезерування // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 71. – С. 94–98.
9. *Крижанівський В.Б., Кур'ята П.В., Мельничук П.П., Москвін П.П.* Температурні поля при обробці металів фрезами з надтвердих матеріалів: модернізація програмного забезпечення MATLAB для опису теплопереносу від рухомого

джерела тепла та моделювання роботи теплових джерел // Вісник ЖІТІ / Технічні науки. – 2001. – № 18. – С. 33–42.

КРИЖАНІВСЬКИЙ В'ячеслав Борисович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, докторант кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- технологія машинобудування;
- математичне моделювання та обчислювальні методи в наукових дослідженнях.

Подано 20.08.2007