

**ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЛЕЗОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ**

Проблема оптимізації процесів формування поверхневого шару лезовим інструментом розглянута з точки зору теорії оптимального керування системами з розподіленими параметрами, обернених задач математичної фізики та сучасних еволюційних стратегій оптимізації. Показано, що з розглянутих напрямків найбільш перспективним є саме еволюційні стратегії оптимізації.

Вступ. Одна з найважливіших проблем сучасного машинобудування – це якість продукції, яка випускається. Критерії, за якими її визначають, впливають з експлуатаційних характеристик продукції. Значний вплив на експлуатаційні властивості мають характеристики поверхневого шару виробів. Відомо, що на сьогоднішній день якість обробленої поверхні є не менш важливим показником, ніж продуктивність для переважної більшості технологічних операцій.

Вибір параметрів обробки поверхневого шару у переважній більшості випадків здійснюється без належного наукового обґрунтування, що, як правило, призводить до необґрунтованого завищення вимог і, як наслідок, до підвищення собівартості. Наукові дослідження в напрямку формування поверхневого шару з заданими експлуатаційними властивостями визначають перед фахівцями в галузі технології машинобудування такі основні задачі [1]:

1. Взаємозв'язок стану поверхневого шару деталей машин (макрівідхилення, хвилястість, шорсткість, фізико-механічні властивості) з їх експлуатаційними властивостями.

2. Розвиток наукових методів визначення необхідних параметрів стану робочих поверхонь деталей машин.

3. Наукове прогнозування стану поверхневого шару деталей машин, який отримуємо при різних умовах обробки.

4. Оптимізація технології виробництва деталей з врахуванням забезпечення потрібної системи параметрів їх поверхневого шару.

За відомих історичних причин в результаті конкурування різних соціальних систем в світовій практиці існують дві групи наукових шкіл. Одна з них репрезентує західних вчених, інша – вчених пострадянського простору. В результаті спільних практичних задач в рамках цих груп досить часто формуються схожі наукові напрямки досліджень. Зокрема, для забезпечення потрібних експлуатаційних властивостей поверхонь в західній науковій школі сформувався поняття «цілісність поверхні» (surface integrity), яке включає висоту мікро-нерівностей, мікроструктуру, мікротвердість та залишкові напруження. Певним його аналогом на пострадянському просторі є поняття «якість поверхневого шару». Це поняття є похідним від поняття «якість поверхні» й одночасно розширює його на фізико-хімічні властивості поверхневого шару.

Розгляд якості поверхневого шару на всіх стадіях життєвого циклу (проектування, виготовлення, контроль, експлуатація, ремонт, відновлення та утилізація) призвів до створення нового вчення – «інженерія поверхні», – що займе одне з провідних місць в ХХІ сторіччі, оскільки його наукова та практична реалізація дозволять значно підвищити конкурентоспроможність промислової продукції [2].

Перспективним напрямком досліджень в технології машинобудування, який стосується оптимізації процесу формування плоских поверхонь лезовим інструментом, є розрахунок параметрів обробки, виходячи з заданих експлуатаційних характеристик поверхневого шару. Це дозволить істотно знизити вартість виготовлення або штучного часу при забезпеченні потрібної якості поверхневого шару. Одночасно, через впровадження відповідних інформаційно-комп'ютерних засобів, повинні бути зменшені витрати на технологічну підготовку.

Плоскі поверхні – це складові виробів з важливими функціями, які навантажені часто на межі їх фізичних границь. Тому геометрична відповідність та якість поверхневого шару є критично важливими для таких виробів, як направляючі верстатів, чавунні блоки автомобільних двигунів тощо. Вони мають бути відповідним чином оброблені на етапі фінішної обробки для отримання бажаних механічних властивостей, точності розмірів та форми. Таке фінішування зазвичай розуміється як шліфування. Однак з появою інструменту, оснащеного надтвердими матеріалами (НТМ), лезова обробка має потенційно замінити процес шліфування, оскільки вона забезпечує нижчу вартість виробництва, коротший часовий цикл, меншу кількість технологічних кроків та високу гнучкість в обробці деталей. Вона також є більш прийнятною з точки зору охорони навколишнього середовища за рахунок невикористання небезпечних

охолоджуючих рідин. В той же час лезова обробка інструментом з НТМ забезпечує прийнятну якість поверхневого шару.

Однак залишається кілька важливих проблем, які необхідно розв'язати. Швидке зношування залишається перешкодою тому, щоб процес став економічно ефективнішим через високу вартість НТМ та час заміни інструменту. Інша проблема стосується якості поверхневого шару. Крихкий та тонкий білий шар, який є шкідливим для експлуатаційних характеристик виробу, буде формуватися на поверхні під час деяких умов. Також розтягуючі залишкові напруження мають тенденцію бути присутніми в поверхневому шарі, що значно знижує втомну міцність. Тому життєво важливо дати змогу процесу фрезерування відбуватися в оптимальних умовах для досягнення потрібної довговічності та задовільної якості поверхневого шару.

Аналіз досліджень і публікацій з даної теми. Результати робіт вчених пострадянського простору підсумовані в монографії [2]. Розглянуті питання оцінки якості поверхневого шару деталей машин. На основі теоретичного й емпіричного описів експлуатаційних властивостей встановлений їх взаємозв'язок з параметрами якості поверхонь. Дані рекомендації з вибору параметрів якості, виходячи з функціонального призначення поверхонь. Але питання про те, як раціонально обрати режими обробки для досягнення потрібних параметрів якості, залишається відкритим.

Щодо західних вчених, то взагалі напрямок їх досліджень зосереджений на розвитку скінченноелементних технік для створення спеціальних програмних пакетів та перевірки їх адекватності експериментальним даним. Серед найбільш характерних наведемо наведені нижче роботи.

Стаття [3] присвячена дослідженню цілісності поверхні при точінні загартованої сталі. Досліди були проведені на токарному верстаті з використанням різних інструментів і глибини різання. Поверхня оцінювалась в термінах залишкових напружень, твердості поверхні і мікро-структурного аналізу. Досліди показали, що точіння загартованої сталі забезпечує добру цілісність поверхні. Досліджувався також вплив параметрів і глибини різання на залишкові напруження. Було з'ясовано, що передній кут і радіус заокруглення ріжучої кромки впливають на формування залишкових напружень. Твердість поверхні обточених зразків відповідає теоретично обчисленим значенням.

Робота [4] вивчає залишкові напруження при точінні сталі. Окрема увага приділена впливу параметрів різання, таких, як швидкість різання, подача, глибина різання. В експериментах залишкові напруження вимірювалися з використанням техніки дифракції рентгенівських променів (на поверхні деталі і в глибині). Ефекти від умов різання на залишкові напруження аналізувалися в зв'язку з експериментально визначеними силами різання.

Мета дослідження [5] перевірити гіпотези про те, що залишкові напруги в оброблених зразках менші, ніж в необроблених, і що розсіювання поверхневих залишкових напружень значно змінюється вздовж оброблених зразків для даних умов різання.

В [6] зазначено, що чітка характеристика підповерхневих властивостей – це найголовніше в розумінні процесу, який продукує цілісну поверхню. Однак мало досліджень, які проведені для вивчення значних впливів цілісності поверхні (твердості та залишкових напружень) на процес втискування (індентування) та результуючі криві «навантаження–глибина». Нановтискування було використане для вимірювання твердості в підповерхневому шарі деталей, оброблених точінням, шліфуванням та хонінгуванням. Обробка, яка індукує залишкові напруження, може бути оцінена зіставленням кривих «навантаження–глибина», змодельованих за допомогою скінченноелементних технік, і цих же кривих, але отриманих експериментально. Аналіз моделювання показує, що криві «навантаження–глибина» значно змінюються під впливом залишкових напружень, в той час як тертя, заокруглення крайки та модуль текучості мають значно менший ефект. Пікові нормальні напруження з'являються на зовнішній поверхні, в той же час пікові дотичні напруження дещо нижче зовнішньої поверхні. Усі піки деформацій під поверхнею. Виникнення текучості матеріалу впродовж навантаження може бути визначене спостереженням еволюції циклів навантаження/розвантаження при різних глибинах втискування.

В роботі [7] пропонується модель формування термічно викликаних залишкових розтягуючих напружень і простий метод обрахунку критичної температури, при якій розвиваються залишкові розтягуючі напруження. Аналіз передбачає розмірний метод, щоб охарактеризувати критичну температуру. Також розроблена формула, яка характеризує залежність границі текучості від температури. Модель була підтверджена методом скінченних елементів і експериментальних даних. Аналіз демонструє, що на основі легкодоступних властивостей матеріалу можливо визначити критичну температуру, при якій розтягуючі залишкові напруги будуть формуватися.

В [8] вивчається одна зі значних проблем при розгляді цілісності поверхні з точки зору скінченноелементного моделювання. Це сильне викривлення елементів в обробленому шарі. Воно викликає значні обчислювальні проблеми при моделюванні та аналізі поверхні. В даному дослідженні адаптивні сіткові техніки управління початковим кутом та управління обмеженнями сітки були використані для покращення якості сітки в обробленому шарі. Проводилось моделювання з використанням різних адаптованих технік й без нього та порівнювались результати для оцінки

ефективності цих технік. Показано, що використання адаптивних сіток в моделюванні різання металів покращує стабільність формування стружки як зубчиків пилки. Адаптивна сітка може значно пом'якшувати викривлення елементів, помилки в напруженнях, деформаціях та температурах в поверхневих шарах і тому – якість моделювання. Зазначені адаптивні сіткові техніки з високою частотою дають схожі результати, які збігаються з експериментальними спостереженнями, в той час як низько адаптовані часто дають хибні результати. Важливість використання адаптивних сіток продемонстрована при розгляді цілісності поверхні.

Робота [9] присвячена вимірюванню залишкових напружень від кінцевих фрез в багатьох точках поверхні для вивчення розміщення залишкових напружень від механічної обробки. В тих самих експериментах вивчається вплив на залишкові напруження від товщини шару, що зрізується, та подачі. Експерименти демонструють, що подача та товщина шару значно впливають на залишкові напруження від кінцевого фрезерування, коли виражені в системі координат деталі. Але вираження залишкових напружень в системі координат інструменту демонструє зручне їх подання, в тому сенсі, що в цій системі координат залишкові напруження практично не змінюються.

Робота [10] присвячена шорсткості поверхні, яка відіграє важливу роль в якості та плануванні процесу виробництва. Дана робота націлена на розробку емпіричної моделі для передбачення шорсткості поверхні при фінішному точінні. Модель розглядає такі робочі параметри: шорсткість деталі, подача, радіус леза, швидкість шпинделя та глибина різання. Дві техніки які змагаються, використані при розробці емпіричних моделей: нелінійний регресійний аналіз та комп'ютерні нейронні мережі. Шорсткість, що передбачена цими моделями, потім порівнюється з відомими літературними джерелами. Модель має задовільні характеристики. Представлена сувора процедура перевірки адекватності моделі.

Розглянуті роботи, список яких можна було б продовжувати, викликають цікавість і становлять наукову цінність. Але для них характерно те, що кожне дослідження концентрується на окремому явищі. Чітко простежується аналітичний підхід, суть якого полягає в декомпозиції складного явища на множини більш простих. Більше того, серед явищ обираються ті, що мають розроблені математичні моделі. Головним чином, це розподіл температур і напружень. Їх теоретичний розрахунок здійснюється за допомогою методу скінчених елементів. Мікроструктурні перетворення в більшості робіт опущені. А в тих роботах, де вони розглядаються, не з'ясовується їх взаємозв'язок з температурами і напруженнями. Насправді тут існує ключова проблема: напруження і температури розраховуються, виходячи з уявлення про матеріал як про континуум. Лише в цьому випадку за рахунок граничного переходу ми отримуємо відповідні диференційні рівняння. А фазові мікроструктурні перетворення вивчаються, виходячи з уявлень про матеріал як про полікристал, тобто принципово дискретну структуру. Виходячи з цього, набувають важливості синтетичні підходи, здатні поєднувати накопичений аналітичний матеріал в єдину модель.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є пропонування синтетичного підходу для проектування раціональних параметрів процесу лезової обробки (геометрія, умови різання, матеріал), з тим, щоб досягти задовільної якості поверхні (твердість, білий шар, залишкові напруження) та інших практичних обмежень: зношування, сили, динамічної стабільності.

Виклад основного матеріалу. Вплив лезового інструменту на стан поверхневого шару характеризується з точки зору мікрогеометрії поверхні та її фізико-механічних властивостей. Серед останніх розрізняють залишкові напруження та мікроструктурні перетворення.

Джерелом появи залишкових напружень при механічній обробці є одночасна дія трьох факторів [11]:

- ✓ Нерівномірна пластична деформація поверхневого шару. В зоні перед ріжучим клином матеріал стискається передньою поверхнею. При терті задньої поверхні інструмента по оброблюваній, поверхневий шар розтягується. Границею цих зон є ріжуча кромка інструмента.
- ✓ Локалізоване нагрівання тонких поверхневих шарів внаслідок деформації й тертя призводить до великих температурних напружень. Після охолодження деталі в її поверхневому шарі можуть з'явитись значні розтягуючі залишкові напруження.
- ✓ Вторинні фазові перетворення в поверхневих шарах призводять до утворення вторинних структур з різними питомими об'ємами. Цей фактор може викликати появу залишкових напружень різного знаку і величини.

Отже, для явищ під час обробки характерний тісний взаємовплив, що значно ускладнює процес їх моделювання.

Змістовна постановка задачі формування поверхневого шару з заданими властивостями за допомогою лезового інструменту зображена на рис. 1.

Геометрія інструменту, матеріал деталі та інструменту, умови різання є цільовими параметрами, які потрібно отримати для того, щоб задовольнити тим чи іншим експлуатаційним вимогам (шорсткості поверхні, мікроструктурним перетворенням, залишковим напруженням).

Керованими параметрами в даній задачі є технологічні чинники, до яких входять швидкість різання, подача, геометрія ріжучого інструменту, товщина шару, що зрізується, тощо.

Розглядаючи зазначені змістовну постановку задачі з точки зору «прямих» математичних моделей, придатних для її опису, легко бачити, що тут ми маємо цілу низку моделей різного рівня абстракції (рис. 2). Зокрема, температурні поля в поверхневому шарі описуються за допомогою крайової задачі для рівняння з частковими похідними параболічного типу; напружений стан описується за допомогою систем диференціальних рівнянь, в результаті розв'язку яких отримуємо опис напруженого стану у вигляді тензорного поля. Що стосується мікроструктурних перетворень, то абстрактних математичних моделей цих процесів не створено. Знання про них формулюються в описовому вигляді.

Більше того, оптимізація процесу лезовим інструментом з НТМ ускладнюється в зв'язку з наведеними нижче чотирма міркуваннями.

1. Моделі утворення поверхні в результаті лезової обробки дуже складні, нелінійні, неточні. Відсутня диференційованість за параметрами проектування, що призводить до труднощів з використанням методів нелінійного програмування. Наприклад, точна аналітична залежність зношування від умов різання та геометрії різання невідома. Довжина фаски зношування обраховується ітераційно чисельним інтегруванням на основі моделі інтенсивності зношування інструменту, яка є функцією від умов різання, геометрії інструменту та інформації про процес стружкоутворення (температура, напруження) в той же час інформація про процес повинна бути поновлювана з розвитком зношування інструмента. Також немає вичерпної аналітичної моделі для формування білого шару та залишкових напружень.

2. Деякі моделі для прогнозування вимагають великих обчислень, наприклад, обрахунку напружень в 3D, які визначаються на основі модифікованої теорії механічної обробки Окслі, де кут зсуву обчислюється ітераційно від 5 до 45° з кроком 0,1 на основі принципу мінімуму сили. Необхідна ефективна і робастна стратегія пошуку для того, щоб віднайти оптимальне рішення в такій чисельно громіздкій задачі.

3. Деякі керовані змінні обираються з дискретних множин (наприклад, передній та задній кути, радіус заокруглення тощо). Взагалі більш економічно обирати стандартні рішення з каталогів виробників інструменту. Тому виникає необхідність використання цілочисельного програмування.

4. Оптимізація процесу фрезерування відбувається за умови забезпечення якості поверхні та можливостей верстата, це робить множину припустимих значень малою й можливо незв'язною. Проблематично навіть знайти припустиме рішення.

Незважаючи на активні пошуки та прогрес в глобальній оптимізації в останні роки, варто зазначити, що ефективної процедури для розв'язування загальної нелінійної задачі не існує. Тому стратегія розв'язання, яка підходить до задачі, що нами розглядається, повинна обиратися або розроблятися. Потрібна загальна оптимізаційна схема, яка включає характеристики процесу фрезерування і загальної механічної обробки.

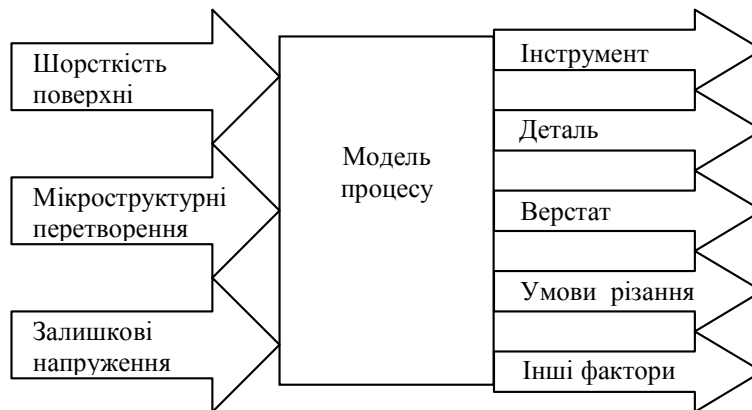


Рис. 1. «Обернена» схема визначення керованих чинників для забезпечення визначених характеристик поверхневого шару

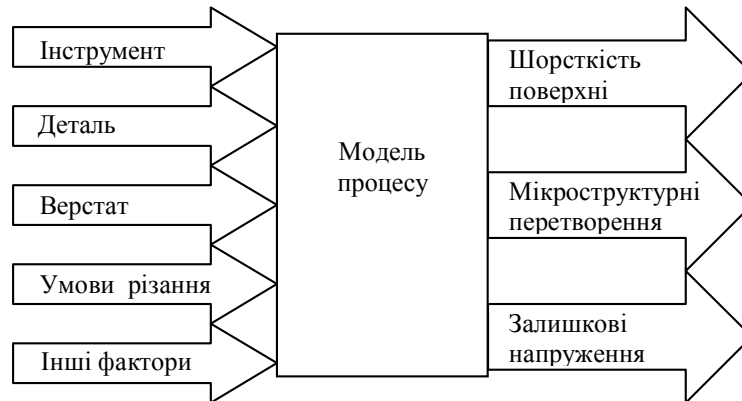


Рис. 2. «Пряма» схема моделювання процесу формування поверхневого шару

Серед існуючих підходів до оптимізації подібних систем виділимо такі:

1. Оптимальне керування системами з розподіленими параметрами [12].

Розглянемо одну з класичних постановок задачі граничного керування для рівняння теплопровідності. Розподіл температури описується рівнянням

$$\frac{\partial u}{\partial t} - k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \tag{1}$$

з граничними та початковими умовами

$$\frac{\partial u}{\partial x}(t, 0) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x}(t, 1) = h(y(t) - u(t, 1)), \quad u(0, x) = 0, \tag{2}$$

де k – коефіцієнт теплопровідності; h – коефіцієнт теплообміну; $y(t)$ – керування.

Керування треба вибрати так, щоб мінімізувати функціонал:

$$I(y) = \int_0^1 (u(T, x) - u_0(x))^2 dx, \tag{3}$$

який виражає середнє квадратичне відхилення температури в момент часу $t = T$ від заданої функції u_0 .

Відомо [17], що рівність нулю нижньої грані функціонала (3) рівносильне точному «потраплянню» розв’язку $u(x, t)$ в момент T в задану функцію $u_0(x)$. В цьому випадку керування визначається неоднозначно. Це пов’язано з тим, що розв’язком такої задачі буде будь-яка функція, що реалізує точне потрапляння. Для того, щоб знову зробити задачу задачею оптимального керування, необхідно задати деякий критерій якості. Наприклад, мінімум часу T .

Дійсно, загальна концепція керування, як переводу системи з одного стану в інший, виявилась дуже перспективною при дослідженнях систем з розподіленими параметрами, тобто систем, поведінка яких описується рівняннями в часткових похідних, інтегральними рівняннями або іншими, більш складними функціональними відношеннями. В класичних постановках задач керування керуючий вплив залежить або від часу, або від координат (або і від того, і іншого разом). Але, в той же, час приділяється значна увага процесам, де головною особливістю є рух джерела тієї чи іншої субстанції. Зокрема в технології машинобудування часто виникає необхідність точно представити особливості температурних полів, які породжуються джерелами, що рухаються (точіння, фрезерування, хонінгування, механічне зміцнення обкаткою, сварка тощо). Ці температурні особливості, як правило, значно впливають на результуючу якість виробів, матеріалів, елементів конструкцій [15, 16]. В рамках керування температурними полями розглядаються задачі підтримки температурного поля в визначених рамках впродовж процесу, а в кінці – досягнення заданих значень. Крім цього, вивчаються процеси, в яких як пряма ціль передбачається формування заданого температурного поля за допомогою саме рухомих джерел тепла [13].

Проведемо невеликий аналіз постановки задачі (1)–(3) у випадку, коли керування є рухомих.

Нехай D – множина припустимих керуючих впливів деякої розподіленої системи. Рухоме керування розподіленого об’єкта, який розглядається, характеризується функцією $v(x, t)$, $x \in D$, $t \geq t_0$, яка представляється у вигляді

$$v(x) = y(x, t)\mu(x, t), \tag{4}$$

де $y(x, t)$ – інтенсивність рухомого керування, а $\mu(x, t)$ – міра, що характеризує просторово-часову локалізацію, причому

$$\mu(x,t) \geq 0, \int_D \mu(x,t) dx = 1, t \geq t_0. \quad (5)$$

Частковим випадком такого рухомого керування є зосереджене в точці рухоме керування, причому координати точки залежать від часу. Цьому частковому випадку відповідає сингулярна міра

$$\mu(x,t) = \delta(x - s(t)), x \in D, s(t) \in D, t \geq t_0. \quad (6)$$

Рухоме керування в цьому випадку має такий вигляд:

$$v(x,t) = y(x,t)\delta(x - s(t)). \quad (7)$$

Природно, що якщо маємо r локалізованих рухомих керувань з відповідною інтенсивністю і програмами руху $s(t)$, то маємо r функцій виду (7).

Звернемо увагу на те, наскільки нетривіальним є узагальнення поняття керування на випадок рухомого керування з точки зору математичного апарату дослідження задач керування. Одразу слід зазначити, що «платою» за перехід від нерухомих керувань до рухомих є втрата лінійності основних математичних залежностей. Так рухоме оптимальне керування в термінах проблеми моментів може бути знайдене вже з розв'язку нелінійної проблеми моментів. Як наслідок, втрачається можливість застосування класичний апарат Маркова – Крейна. В ряді випадків, наприклад, при дуже великих швидкостях джерел, що має місце при швидкісному різанні, керуючий вплив увійде до вихідного рівняння не алгебраїчно, а диференційно. Відповідно з'являється проблема моментів другого роду, яка, до того ж, може виявитись нелінійною. Власне даний список можна було б продовжувати. Отже, перехід до задач рухомого керування призводить до нетривіальних теоретичних узагальнень. Успішний розв'язок відповідних задач знаходиться, очевидно, в залежності від розвитку відповідних математичних методів. З арсеналу розроблених на сьогоднішній день методів керування рухомими джерелами найбільш вивчені задачі керування тепловими джерелами. Однак навіть в цій області кожен клас конкретних практичних задач розрізняється за рахунок домінування того чи іншого фізико-технічного боку, чим не можна нехтувати, що породжує, в свою чергу, самостійні розділи та напрямки. З точки зору формування поверхневого шару, теплові процеси хоч і важливі, але не домінують й постановка задачі формування поверхневого шару як задачі оптимального керування системою з розподіленими параметрами через свою складність вимагає таких методів, які теорія в сучасному стані запропонувати не може.

2. Обернені задачі математичної фізики [14]. Змістова постановка задачі формування поверхневого шару має багато спільних рис з відомими оберненими задачами математичної фізики.

Для прикладу знову повернемося до рівняння теплопровідності.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, x \in [0, l], t \in [0, T] \quad (8)$$

з граничними і початковими умовами

$$u(x, 0) = f(x), u(0, t) = u(l, t) = 0. \quad (9)$$

Фізичний зміст даної задачі полягає в такому: розподіл температури в деякий початковий момент часу відомий, необхідно визначити розподіл температури в наступні моменти часу.

З іншого боку, є цікавою інша постановка задачі. Змістовно вона виглядає так. Відомий, наприклад, в результаті фізичних вимірів, розподіл температури в деякий момент часу. Визначити, який був розподіл температури в попередні моменти часу.

Математично ця зміна постановки відбивається в граничних умовах таким чином:

$$u(x, T) = f(x), u(0, t) = u(l, t) = 0. \quad (10)$$

Поставлена задача не є коректною за Адамаром. Іншими словами, одночасно не виконуються такі умови:

- розв'язок задачі існує;
- розв'язок задачі тільки один;
- розв'язок задачі неперервно залежить від даних задачі.

Цікавість до цих задач обумовлена їх практичним використанням в галузі геофізики, сейсміки та гравіметрії. Для них був розроблений досить складний математичний апарат, який базується на умовній коректності за А.Н. Тихоновим. Але даний апарат не є універсальним для будь-якої оберненої (некоректної) задачі і обслуговує лише той вузький клас, для якого він розроблявся. Характерною особливістю таких класів є те, що відповідні прямі постановки задач є добре вивченими класичними постановками крайових задач для рівнянь математичної фізики. Тому безпосереднє використання отриманих результатів в технологічних задачах утворення поверхневого шару не є можливим, оскільки процес, який там відбувається, не має задовільного опису у вигляді будь-якої крайової задачі.

3. Еволюційні алгоритми (генетичні алгоритми і нейронні мережі).

Еволюційні алгоритми і диференційне числення відносяться до різних гілок в моделюванні. Їх можна охарактеризувати як емпіризм і фундаменталізм [17]. Диференційне рівняння описують так би мовити суть об'єкта, в той час як нейронна мережа може запам'ятати, а потім відтворити динамічну поведінку в ситуаціях, які їй відомі. Аналітична форма представлення знань для неї недоступна, вона здатна запам'ятати та узагальнити лише конкретні емпіричні залежності.

Для класичної парадигми характерно те, що синтезу математичної моделі об'єкта або процесу обов'язково передують фаза аналізу, впродовж якої процес умовно декомпозується на елементарні явища, кожне з яких в свою чергу підлягає детальному розгляду. Спочатку завжди планується «чистий» експеримент, в якому складова, що досліджується, відокремлюється від впливу інших компонент. Потім такий експеримент проводиться. Як результат висувається максимально проста, досить часто лінійна, модель явища. Якщо деяку складову в чистому вигляді вивчити не вдається, то часто її просто не враховують. Нарешті, здійснюється синтез повної моделі з часткових лінійних моделей як із цеглинок. В задачі формування поверхневого шару окремо вивчаються деформаційні, теплові явища, фазові перетворення тощо. Але все одно залишаються невраховані фактори. Щоразу щоб врахувати деякий новий фактор нам доведеться конструювати новий експеримент, пропонувати модель явища, визначати та інтерпретувати його параметри. Якщо ж модель явища взагалі відсутня, то відповідно модель, яка описує процес, буде вже наперед неповною.

Але навіть для таких неповних моделей виконується процес ідентифікації, тобто експериментальної перевірки. Після чого коефіцієнти в рівняннях підбираються так, щоб відхилення від експериментальних даних було б мінімальним. Не важливо, наскільки точно знайдені коефіцієнти співпадуть зі значеннями, які отримані з «чистих» експериментів. Фактично навіть не можна очікувати, що вони співпадуть, тому що враховані члени повинні взяти на себе вклад неврахованих. Як наслідок, значення коефіцієнтів отримують деякі прирости, які залежать від діапазону, в якому проводилась ідентифікація моделі. Природно, що результуюча модель буде дійсною лише для певного діапазону значень і навряд чи параметри моделі залишаться тими самими при інших умовах обробки.

Що стосується нейромережевого підходу, то він з самого початку не передбачає фази аналізу при побудові моделі. Нейронна мережа – це суто синтетичний, а не аналітичний підхід. Звичайно і тут залишається поняття моделі і її синтез зводиться до параметричної оптимізації, яка побудована на основі активаційних функцій нейронів. Але дослідник позбавлений необхідності визначати, якій можливій поведінці об'єкта відповідає активність одного з нейронів і який фізичний сенс набувають синаптичні коефіцієнти. Задача формується для усєї мережі в цілому. Тому об'єкт досліджується одразу в цілому, а не в максимально ідеалізованих умовах. Тепер увага зосереджена саме на тих режимах, які нас цікавлять безпосередньо в практичному відношенні.

Хоч і можна передбачити, що нейронна мережа може виконати найскладніше перетворення «вхід–вихід», але наперед неможливо передбачити, яка архітектура мережі (тобто вид шаблону) виявиться найкращою для розв'язання задачі, що нас цікавить. Який обрати вид активаційних функцій? Скільки шарів в мережі та нейронів в кожному шарі для забезпечення інформаційної ємності мережі? Не очевидне питання і про кількість зворотних зв'язків, бо без них поведінка мережі не може бути динамічною.

Комп'ютерне експериментування є на сьогоднішній день єдиним надійним способом для відповіді на поставлені запитання.

Ще одним важливим аспектом використання нейронної мережі є її навчання. Але впродовж останнього часу в технології машинобудування було проведено й опубліковано значну кількість наукових досліджень. З'ясувались сили різання, розподіл температури, процеси зношування, стружкоутворення, мікроструктурні перетворення тощо. Розглянуті окремо – це фрагментарні та некорельовані шматочки інформації, саме які можна використати для навчання нейронної мережі. В результаті матимемо схему моделювання, яка інтегрує існуючі експериментальні, чисельні та аналітичні знання в процес планування та оптимізації.

Слід зазначити, що нейромережеві моделі все ж таки відрізняються від того, що звичайно розуміють під математичною моделлю. Тому їх часто називають емуляторами або предикторами. Перший варіант назви завдячує імітації динамічних характеристик об'єкта, другий – здатності мереж за поточним і минулим станами об'єкта передбачати наступні стани.

Висновки:

1. Для визначення раціональних параметрів процесу лезової обробки (геометрія, умови різання, матеріал) запропоновано підхід, який ґрунтується на сучасних еволюційних стратегіях оптимізації.
2. Показано, що використання методів теорії керування системами з розподіленими параметрами та теорії обернених задач математичної фізики для визначення раціональних параметрів процесу лезової обробки не є можливим в зв'язку з тим, що в рамках цих теорій не розроблені відповідні методи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Суслов А.Г.* Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
2. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
3. *Jacobson M.* Surface integrity of hard-turned M50 steel // Proc Instn Mech Engrs. – Vol 216. – Part B. – 2002.
4. *Outeiro J. C., Dias A. M., Lebrun J. L., Astakhov V. P.* Machining residual stresses in AISI 316L steel and their correlation with the cutting parameters // Machining science and technology. – Vol. 6. – No. 2. – Pp. 251–270. – 2002.
5. *Liu C. R. and Yang X.* The scatter of surface residual stresses produced by face-turning and grinding // Machining science and technology. – 5(1). – Pp. 1–2. – 2001.
6. *Warren A.W., Guo Y.B.* Machined surface properties determined by nanoindentation: Experimental and FEA studies on the effects of surface integrity and tip geometry // Surface & Coatings Technology. – 2005.
7. *Walsh D. G., Torrance A. A. Tiberg J.* Analytical evaluation of thermally induced residual stresses in ground components // Proc. Instn Mech. Engrs. – Vol. 217. – Part C: J. Mechanical Engineering Science. – 2003.
8. *Wen Q., Guo Y.B., Todd Beth A.* An adaptive FEA method to predict surface quality in hard machining // Journal of Materials Processing Technology #173. – 2006. – Pp. 21–28.
9. *Jacobus K., Kapoor S. G., DeVor R. E.* Experimentation on the Residual Stresses Generated by Endmilling // Transactions of the ASME. – Vol. 123. – 2001.
10. *Chang-Xue Feng, Xian-Feng Wang* Surface roughness predictive modeling: neural networks versus regression // IIE Transactions #35. – 2003. – Pp. 11–27.
11. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов: В 2-х частях. – М.: Машиностроение, 1974.
12. *Лурье К.А.* Оптимальное управление в задачах математической физики. – М.: Наука, 1975. – 480 с.
13. *Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М.* Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
14. *Романов В.Г.* Обратные задачи математической физики. – М.: Наука, 1984. – 365 с.
15. *Рыкалин Н.Н.* Тепловые процессы при сварке. – М.: Машгиз, 1951.
16. *Хренов К.К.* Сварка, резка и пайка металлов. – М.: Машиностроение, 1970.
17. *Вороновский Г.К., Махотило К.В., Петрашев С.Н., Сергеев С.А.* Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. – Харьков: Основа, 1997. – 107 с.

КРИЖАНІВСЬКИЙ Вячеслав Борисович — кандидат фізико-математичних наук, докторант кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

—комп'ютерне моделювання;

—технологія машинобудування.

Подано 11.06.06