

РОЗДІЛ 6. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОКАТКИ ПРОФІЛІВ

Сучасні практичні завдання технології сортової прокатки вимагають теоретичного рішення на рівні, що дозволяє прогнозувати тривимірне формо змінення і напружений стан металу в калібрах. При цьому, рішення повинне враховувати складну просторову форму заготовки і валків, реальні властивості реологій матеріалу, тертя на поверхні взаємодії металу з валками, теплові процеси і ряд інших чинників. Таке формулювання завдання дозволяє вирішити методами комп'ютерного моделювання наступні проблеми, що стоять перед сучасним сортопрокатним виробництвом:

- оптимізація форми калібрів виходячи з необхідного перебігу металу;
- прогноз можливості появи дефектів формо змінення металу, таких як переповнювання калібру, вигин штаби на виході з валків і інших;
- прогноз руйнування металу;
- прогноз мікроструктури і механічних властивостей готового продукту.

Рішення цих питань експериментальними методами в даний час достатньо дорого і вимагає великих витрат часу. Ця обставина робить актуальною розробку математичних моделей тривимірних процесів прокатки профілів в калібрах. Зважаючи на складність завдання в приведеному формулюванні, рішення її аналітичними методами не представляється можливим. Цим обумовлена необхідність використання методу кінцевих елементів для отримання шуканого рішення. Це, у свою чергу, визначає специфіку одержуваних нижче рішень, яка пов'язана з наближеним характером МКЭ, необхідністю розробки складних алгоритмів і програмного забезпечення при доведенні теоретичних розробок до рішення практичних задач оптимізації процесу плющення сортових профілів.

6.1 Аналіз існуючих підходів до моделювання тривимірного формо зміння металу при прокатуванні

Перші роботи у області моделювання процесів прокатки є обліком тривимірного перебігу металу на основі МКЭ були виконані в 80-х роках минулого сторіччя. Особливістю цих робіт було застосування об'ємних кінцевих елементів для вирішення завдання визначення розширення при прокатуванні на гладкій бочці. Надалі, ці та інші дослідження послужили основою для розробки моделей процесів сортової прокатки. Так, в роботі Park J.J і Oh S.I. була розроблена тривимірна кінцево-елементна модель процесу сортової прокатки, названа авторами SHPROL. У даному рішенні використовувалася теорія жорстко-пластичної деформації металу (яка до теперішнього часу цілком обґрунтовано застосовується для моделювання процесів гарячої деформації). Програма SHPROL була здатна моделювати прокатку складних профілів, проте, вимагала для цього багато часу. Так, для моделювання прокатки Н-образного профілю потрібно декілька місяців (!) розрахунків на міні комп'ютері VAX-11/750. Слід зробити поправку на рівень розвитку міні комп'ютерів в 1990 р., але і в цьому випадку час рішення однієї задачі надзвичайно великий. Зрозуміло, наступні роботи були присвячені прискоренню розрахунку і була зроблена спроба одержати квазістаціонарне рішення тривимірної задачі прокатки профілів. У роботі K.Mori і K.Osakada це було зроблено, і автори дістали всього лише 1,5 кратне прискорення рішення в порівнянні з нестаціонарним завданням. Окрім цього, стаціонарний підхід був застосовний не до всіх випадків прокатки, а нестаціонарне рішення було застосовне до профілів будь-якої складності. З погляду сучасного стану науки цей факт легко з'ясовний, оскільки отримання стаціонарного рішення вимагає уточнення положення вільних поверхонь. При складній геометрії завдання аналіз взаємодії поверхонь заготовки і інструменту вимагає великої кількості ітерацій.

Таким чином, до початку 90-х років було ясно, що тривимірні звичайно-елементні моделі процесу сортової прокатки можуть вельми достовірно передбачати течію і напружений стан металу при прокатуванні профілів. Проте, такі програми вимагали великого часу рішення і значних об'ємів оперативної пам'яті, що було пов'язано з необхідністю вирішувати великі системи нелінійних рівнянь. Цим обумовлено появу робіт, що спрощують тривимірне рішення для прокатки.

Піонерською роботою в цьому напрямі слід вважати статтю М. Kiuchi і J. Yanagimoto, в якій розглянута комбінація методу кінцевих елементів і так званого slab-методу (можна перевести як "пошарового методу"). На основі такого підходу авторами пізніше була розроблена програма CORMILL. Гідністю даної програми є розгляд багатоваріантного процесу прокатки. На рис. 3.1 15 показаний типовий результат моделювання прокатки профілів в системі CORMILL.

У роботі виконано розвиток даного підходу, що полягає в наступному.

Вся зона деформації поділяється на декілька шарів відповідно до форми металу і контактної поверхні. Кожен шар поділяється на сегменти. Кожен сегмент поділяється на 8-вузлові ізопараметричні елементи. На рис. 6.1 показані етапи цього ділення. Після цього задається швидкість руху поточного (першого) шару. Далі, за допомогою пошарового методу розраховується швидкість деформації у напрямі прокатки для всіх сегментів першого шару. Для цього використовуються рівняння рівноваги шару і умова зв'язку швидкостей деформації з напруженнями. Потім для цього шару (при заданому розподілі швидкості деформації у напрямі прокатки) розв'язується завдання за допомогою МКЕ. Після досягнення збіжності за швидкістю шару, здійснюється перехід до наступного шару. Приклад одержаного рішення показаний на рис. 6.1.

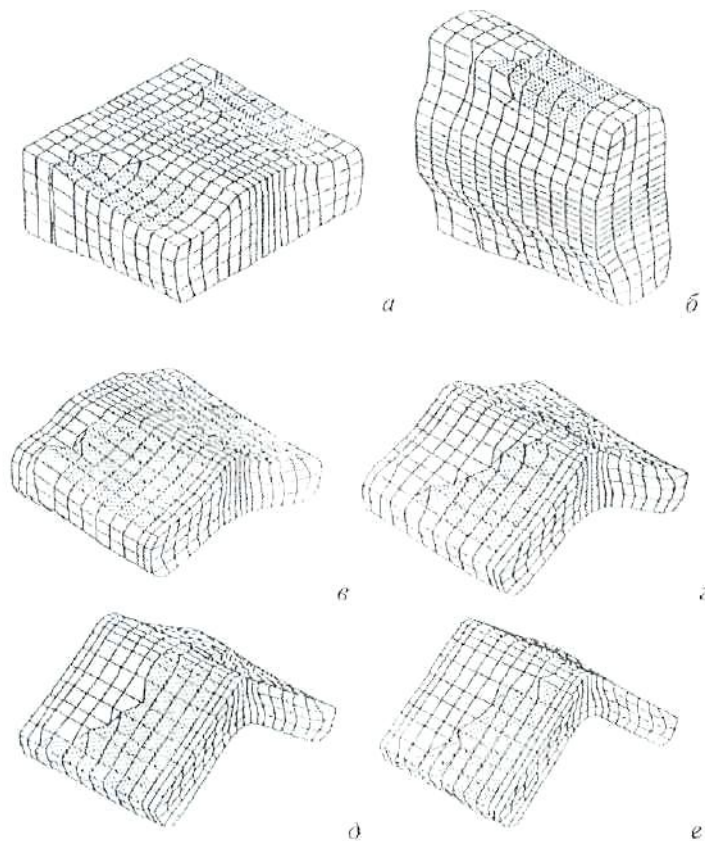


Рисунок 6.1 – Приклад результатів моделювання прокатки кутового профілю за допомогою системи CORMIL

Аналогічний підхід був розвинений в Краківській Гірничо-металургійній Академії, де одержав назву 2grid моделювання. У напрямі зведення тривимірного завдання - до послідовності двомірних безперервно працюють дослідники в даній області теорії ОМТ, наприклад, слід зазначити підходи в цьому напрямі, викладені в роботах [12, 13].

У роботі К.Комогі пропонується інший підхід до прискорення тривимірного рішення задачі прокатки профілів. У цьому методі мінімізується функціонал не для всієї сітки кінцевих елементів - а по зонах з подальшим ітераційним скріпленням зон між собою. Метод дозволяє понизити вимоги до оперативної пам'яті, але час розрахунку залишався великим.

Проте, ряд ефектів, пов'язаних з тією, що обважнює, вигином штаби у валках, в неконтактній деформацією, виникненням подовжніх напруг розтягування та стискання моделі розглянутого класу врахувати не можуть. У

зв'язку з цим, паралельно ведуться дослідження за рішенням тривимірної задачі сортової прокатки без спрощень, пов'язаних з обмеженнями деформації металу. Після згаданих на початку розділу перших робіт у області рішення повної тривимірної задачі прокатки, довгий час основні дослідження йшли у напрямі пошуку спрощених підходів. Проте пізніше, коли були вичерпані можливості таких методів, підвищилася продуктивність комп'ютерів і була розвинена техніка МКЭ, знову повернулися до ідеї рішення повної тривимірної задачі. Так, в роботах виконана розробка теоретичної частини моделі і програмного забезпечення для моделювання тривимірної деформації металу при прокатуванні профілів. На основі цих робіт побудовано виклад подальших розділів даного розділу. Одночасно (і дещо пізніше) з'явилася стаття , в якій розроблена аналогічна модель, приклади використання якої показані на рис. 6.2. Слід підкреслити, що в цих роботах час рішення задачі вже цілком прийнятно для технолога, з цієї причини в допущеннях спрощування, що огрублюють рішення, немає необхідності. Очевидно, що ситуація поліпшуватиметься за рахунок безперервного вдосконалення обчислювальної техніки.

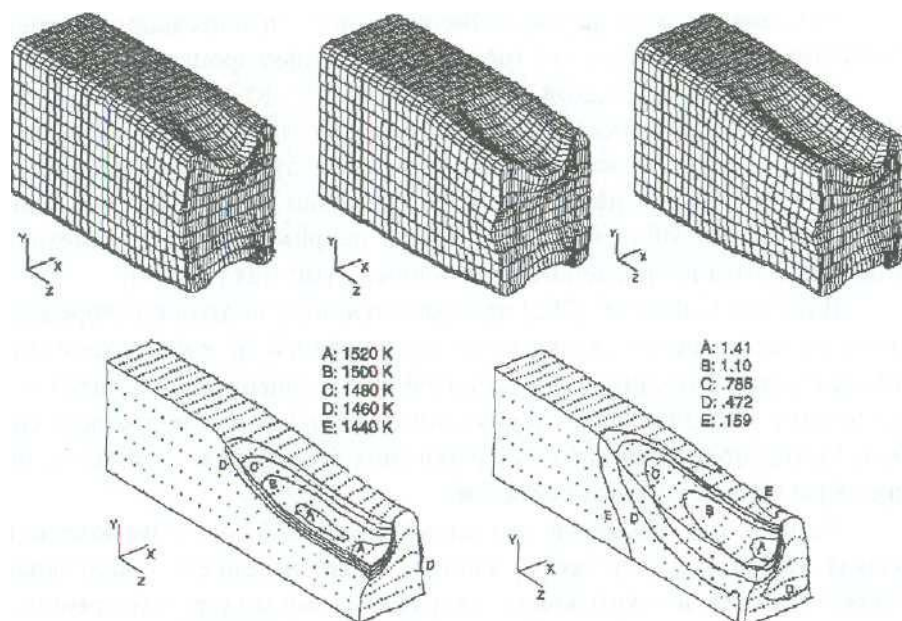


Рисунок 6.2 – Результати моделювання процесу сортової прокатки

Слід також підкреслити, що рішення задачі прокатки в даний час можна з вельми хорошою точністю одержати на основі використання таких програм, як FORGE3, DEFORM3 і ряду інших. Для аналізу об'ємного формо змінення, заповнення калібрів, енергосилових параметрів, температури ці програми цілком придатні і забезпечують хорошу збіжність з практичними даними.

Обмеження комерційних програм починають грати істотну роль при розвитку моделі у напрямі моделювання структури і властивостей металу, багатоваріантної оптимізації процесу, моделювання деформації багатофазних матеріалів і ін. Недоліком цих програм (окрім високої вартості) є також трудомісткість при підготовці даних, що утрудняє виконання практичної оптимізації інженерами - технологами.

Таким чином, перспективними напрямками у області моделювання процесів прокатки профілів слід вважати:

- розробка нових моделей, що описують властивості металу при немонотонному вантаженні і інтеграція цих моделей в кінцево-елементні програми;
- розробка систем, що застосовують методи теорії оптимізації при розробці технологій прокатки профілів на основі тривимірного моделювання;
- розробку моделей прогнозу і оптимізації мікроструктури і властивостей металопрокату.

6.2 Комбінований підхід до моделювання процесів прокатки методом кінцевих елементів

За наслідками виконаного в попередніх розділах аналізу, найбільш перспективним є підхід на основі варіаційного формулювання Маркова. Переваги вказаного підходу в порівнянні із застосуванням методу штрафних функцій (МШФ) для задоволення умови не стискання металу в певних

випадках можуть не виявлятися, але для ряду завдань теорії прокатки мають принципове значення.

Як приклад розглянемо залежність розширення від ширини штаби при прокатуванні в гладких валках. На рис. 6.3 показана ця залежність, розрахована по різних методиках. Як випливає з кривих на рисунку, зменшення розширення із збільшенням ширини штаби не відстежується при побудові моделі на основі МШФ. Причина цього в наступному. Центральні об'єми металу при збільшенні ширини штаби піддаються більшому всебічному стисненню. Якщо метал є не стискуваним, то при збільшенні ширини штаби повинна зменшуватися частка поперечної течії і збільшуватися частка подовжньої течії. При щонайменших погрішностях у виконанні умови не стискуваної ця закономірність втрачається - метал трохи стискається в центрі штаби, і це приводить до істотної втрати точності моделювання залежності розширення від ширини штаби. При цьому варіанти плющення металу з відносно малою шириною штаби моделюються достатньо точно.

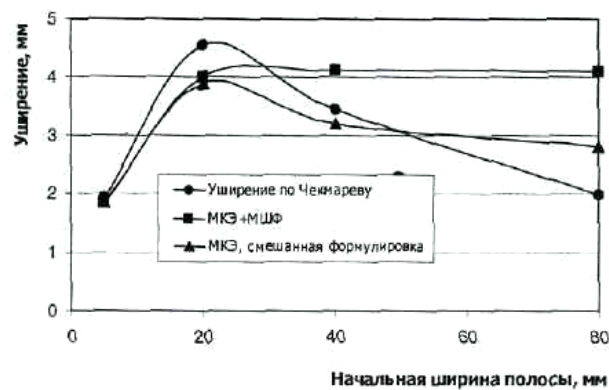


Рисунок 6.3 – Залежність розширення від ширини штаби, умови прокатки: Але – 10 мм; Н; = 6 мм; R = 100мм; т = 0,8

Розглянемо напружений стан штаби в даному прикладі. На рис. 6.6 показані розподіли напруги σ_z і швидкості перебігу V_y по поверхні металу для різної ширини штаби, розраховане за допомогою МКЭ на основі варіаційного принципу Марков. Як випливає з рис. 6.6, збільшення ширини штаби приводить

до збільшення значення напруг σ_z , що є слідством збільшення підпору поперечному перебігу металу з боку сил тертя. При достатньо строгому дотриманні умови не стискуваного металу, яка забезпечує використання варіаційного принципу Марков, зменшується частка поперечного перебігу металу в порівнянні з подовжньою. При нестрогому дотриманні умови не стискуваної (що властиво застосуванню МШФ), центральні об'єми металу при високих стискуючих напругах стискатимуться, а в розширенні братимуть участь тільки периферійні об'єми металу.

Таким чином, для випадку прокатки показано, що математичну модель цього процесу необхідно будувати на основі змішаного варіаційного принципу. Такий підхід, проте, збільшує витрати часу на рішення задачі. Отже, є суперечність, пов'язана з тим, що один метод дає швидке рішення, але істотну похибку в розрахунку деформації металу. Вирішуючи іншим методом, час рішення росте, але рішення виходить точніше.

Розглянемо дозвіл вказаної суперечності шляхом використання комбінованого підходу, заснованого на особливостях процесу прокатки [23].

Відомо, що при прокатуванні деформація металу відбувається у вогнищі деформації і в зонах в неконтактної деформації. Решта частини металу (так звані жорсткі зони, в яких відсутня пластична деформація) здійснює тільки поступальну ходу уздовж напрямку прокатки або згинається унаслідок можливої несиметричної процесу. У будь-якому випадку ясно, що пластичних деформацій в цих зонах немає, і вони рухаються як жорстке тіло. Це дає можливість в жорстких зонах умову не стискуваної задовольнити за допомогою методу штрафних функцій з відносно невеликою величиною штрафу, а в зоні передбачуваної пластичної деформації - з використанням умови стаціонарності функціонала Марков. Даний підхід реалізований на прикладі моделювання тривимірного перебігу металу при прокатуванні.

Умови проведення розрахунків: моделювалася 1/4 частина зразка прямокутного перетину, довжина якого дорівнює 80 мм, ширина 18 мм, висота 6 мм; загальне число елементів склало 475, вузлів - 720; тип елементів - 8-ми

точкові ізопараметричні елементи; чинник тертя прийнятий рівним 0,6; матеріал – свинець. Розглядалися два варіанти розрахунку: на основі пропонованого комбінованого і на основі класичного, підходу з використанням функціонала Марков. У роботі [23] показана повна ідентичність одержуваних результатів. Порівняння часу рішення по етапах вантаження, показує значний вигреш за часом, який забезпечує застосування пропонованого підходу. Залежність цього показника від стадії нагрівання пояснюється різним співвідношенням кількості елементів різного вигляду, яка визначається автоматично, виходячи з поточних розмірів вогнища деформації.

Можна зробити висновок про те, що запропонований підхід до моделювання тривимірного перебігу металу при прокатуванні за допомогою методу кінцевих елементів, заснований на використанні функціонала Марков для елементів у вогнищі деформації і функціонала Лагранжа в поєднанні з методом штрафних функцій для жорстких кінців дозволяє одержувати вигреш в часі від 2 до 4 разів залежно від етапу вантаження, результати моделювання практично не відрізняється від класичного рішення на основі функціонала варіаційного принципу Марков.

Слід зазначити, що застосування даного підходу доцільно при рішенні нестационарних задач ОМТ (не тільки завдань прокатки) і в процесах з достатньо великими жорсткими зонами.

6.3 Моделювання процесів прокатування в гладких валках

Розглянемо застосування розробленої моделі до процесу подовжньої прокатки в гладких циліндрових валках рівного радіусу. При цьому припускатимемо, що форма заготовки може бути достатньо складною. Процес прокатки в даному параграфі розглядатимемо в системі координат, рухомій з окружною швидкістю валків W_{tool} у напрямі прокатки.

Визначимо напрями осей локальної системи координат для даного вузла сітки, що робиться по наступному алгоритму.

Визначимо кут контакту A вузла i з валком радіусу R по формулі:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{x_i - X_R}{z_i - Z_R}\right), \quad (6.1)$$

де x_i, z_i - координати вузла i , що вийшов на контакт з валком; X_R, Z_R координати центру валка.

Далі, визначимо швидкості валка в локальній системі координат і напрямку осей локальної системи координат у вузлі i :

$$\begin{aligned} w_1 &= w_{\text{tool}} \sin(A/2); & w_2 &= 0; & w_n &= w_{\text{tool}} \cos(A/2); \\ a_x &= \sin(A); & a_y &= 0; & a_z &= \cos(A); \\ a_{x1} &= \cos(A); & a_{x2} &= 0; & a_{y1} &= 0; & a_{y2} &= 1. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Як чисельний приклад розглянемо прокатку штаби заввишки 12 мм і шириною 48 мм. Матеріал заготовки – жорстко-пластичне середовище Мізеса. Тертя задавалося по Зібелю з величиною чинника тертя 0,5. У другому варіанті розрахунку розглянемо той же процес, але перетин штаби має опуклу форму з величиною опуклості 1 мм з кожної сторони штаби. Площі перетину в двох варіантах розрахунку між собою рівні. Кінцева висота штаби складала 10 мм.

На рис. 6.4 показані сітки кінцевих елементів - початкові і кінцеві (після деформації). За наявності опуклості на передньому і задньому торці заготовки утворюється характерне подовження. Розглянемо напружено-деформований стан на кромці штаби.

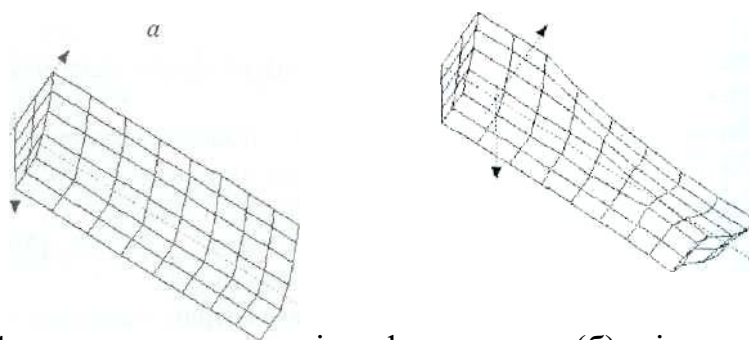


Рисунок 6.4 – початкова (а) і деформована (б) сітки при моделюванні прокатки штаби опуклою формою поперечного перетину (показано 1/4 частину об'єму).

На рис. 6.5 приведені графіки зміни подовжньої напруги x уздовж бічної кромки і центру штаби для штаби прямокутного перетину і опуклої.

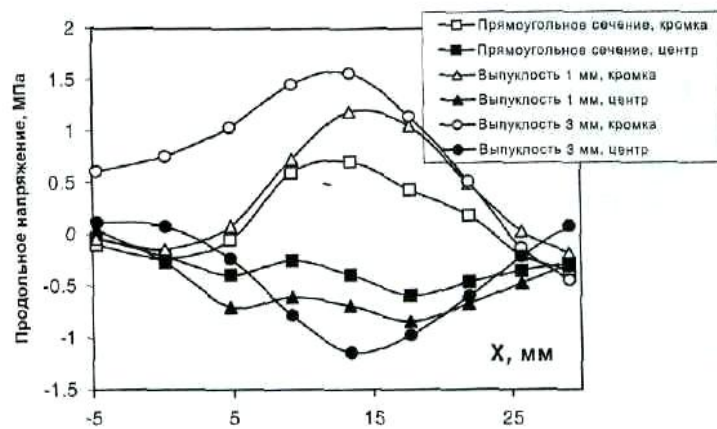


Рисунок 6.5 – Зміна подовжньої напруги x уздовж бічної кромки і осі симетрії штаби для штаби прямокутного перетину і опуклої

Унаслідок більшої витяжки центральної частини штаби в другому варіанті на кромці виникають значно великі подовжні напруги, чим при прокатуванні прямокутної штаби. Зворотна картина спостерігається при аналізі напруженого стану уздовж осі симетрії штаби. При прокатуванні опуклої штаби за рахунок гальмуючої дії кромки в центрі штаби виникають великі стискуючі подовжні напруги, чим при прокатуванні прямокутної штаби.

Представляє інтерес вплив нерівномірності обтискання в розглянутому процесі на співвідношення подовжньої і поперечної течії.

Таким чином, показана можливість застосування розробленої моделі об'ємного перебігу металу для аналізу процесів прокатки смуг нерівномірного по ширині перетину.