

ЗАПОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

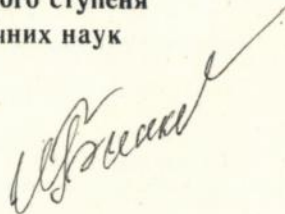
БІНКЕВИЧ Ірина Володимирівна

**РОЗВ'ЯЗУВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ
І НЕОДНОРІДНИХ ЗАДАЧ ПЛАСТИЧНОЇ ТЕЧІЇ
МЕТОДОМ ЛІНІЙ КОВЗАННЯ
З ЗАСТОСУВАННЯМ МАТРИЧНИХ ОПЕРАТОРІВ
ТА НЕЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ**

01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук



Запоріжжя
1996

АВ 34.857

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі будівельної механіки
Державної металургійної академії України (м. Дніпропетровськ).

Науковий керівник: доктор технічних наук,
професор І. А. КОЛЕСНИК

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор В. І. КУЗЬМЕНКО,

доктор фізико-математичних наук,
професор А. К. ПРИВАРНИКОВ.

Провідна організація: Інститут технічної механіки
НАН України (м. Дніпропетровськ).

Захист відбудеться "30" травня 1996 р. о
15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 08.04.02 у
Запорізькому Державному університеті за адресою: 330600,
ГСП - 41, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 66, ауд. 55.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Запорізького
Державного Університету.

Автореферат розісланий "29" квітня 1996 р.

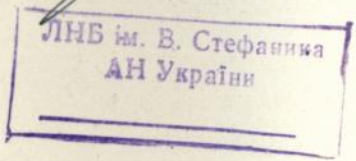
Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К. Т. Н., доцент

Ю. А. СИСОЄВ

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00740559 (U)



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтереси практики в усіх галузях застосування методів сучасної теорії пластичності примушують приймати до уваги не тільки аспекти, пов'язані з реалістичністю і достовірністю математичних моделей, які використовуються для характеристики процесів пластичного деформування, але і питання, обумовлені необхідністю високої ефективності чисельної реалізації методів розрахунку, побудованих на основі цих методів. Сказане, зокрема, відноситься до методів, що базуються на моделі жорстко-пластичного тіла і досить широко розповсюджені при розв'язуванні задач механіки деформівного твердого тіла, пов'язаних з важливими практичними застосуваннями. Зростання вимог до надійності елементів конструкції та точності визначення параметрів процесів (при розгляді задач обробки металів тисненням) спричинює необхідність розрахунку реальних об'єктів та процесів при складній конфігурації розглядуваних областей, неоднорідності матеріалу і довільним характері навантаження (асиметрії процесів). Розв'язування таких нерегулярних задач потребує використання ефективних обчислювальних алгоритмів, орієнтованих на застосування ЕОМ (ПЕОМ). Метод скінчених елементів, який знайшов широке розповсюдження при розрахунках механічних систем і процесів, у багатьох відношеннях відповідає цим вимогам, але в деяких конкретних випадках більш ефективними і кращими, з цієї точки зору, виявляються спеціалізовані методи, орієнтовані на розв'язування порівняно вузького класу задач. Розробка чисельних алгоритмів для таких методів становить актуальну у научному і практичному відношеннях задачу. Таким чином здійснюється не тільки

B34857

"притосування" методу до можливостей сучасних обчислювальних засобів, але і істотно розширюються межі його вживання. Зокрема, добре відомий метод ліній ковзання, який ефективно використовується при розв'язуванні задач плоскої пластичної течії в класичній постановці (однорідність матеріалу, симетрія тіла та навантаження і. т. і.), стає "нерентабельним" при розгляді нерегулярних задач. Це пов'язане із збільшенням обсягу обчислювань, обумовленим необхідністю багатократного повторювання процедури послідовних наближень, складаючи невід'ємну рису методу у класичному варіанті. Розвинутий у останній час підхід, заснований на уявленні ліній ковзання як елементів абстрактного векторного простору дозволяє виключити процедуру послідовних наближень і подати задачу побудовання поля ліній ковзання як операцію обернення нелінійного матричного рівняння (матрично-операторний спосіб).

Мета дисертації полягає у розробці ефективних чисельних алгоритмів побудови полів ліній ковзання при плоскій пластичній течії металу, які розширили б межі застосування методу ліній ковзання при розгляді актуальних задач механіки деформованого тіла, що мають безпосереднє застосування у машинобудуванні і сучасних технологічних процесах (небуча спроможність неоднорідних основ, механіка руйнування, обробка металів тисненням), а також розв'язування нових актуальних задач такого типу.

Наукова новизна роботи полягає

- у підході до побудови алгоритму (використання матричних операторів і методів нелінійного програмування), який забезпечує пряме і оптимізаційне рішення задач плоскої пластичної течії;

- одержанні рішень актуальних задач, в яких приймається до уваги пластична неоднорідність матеріалу, нестационарний характер навантаження, асиметрія процесів пластичного деформування, особливо у випадках, коли її наявність суттєво ускладнює математичний опис процесу;

- результатах аналізу одержаних рішень і зроблених на цій основі висновках відносно характеру та ступіню впливу пластичної неоднорідності на поведінку об'єкту, впливу змінювання геометрії вільної поверхні при деформуванні пластини з вирізами на параметри пластичної течії, впливу параметрів, характеризуючих асиметрію процесу прокатки, на вихідні величини;

- розв'язуванні задачі керування процесом асиметричної (скісної у валки) прокатки, аналізі та поясненні особливостей впливу керуючих параметрів, відшуку діапазонів змінювання цих параметрів, в межах яких забезпечується їх ефективний вплив на процес.

Практична цінність роботи полягає:

- у розробці прикладних програм, які реалізують представлені у дисертації алгоритми рішення статично и кінематично невизначених задач плоскої пластичної течії металу, які виникають при розрахунку конструкції і визначенні параметрів процесів пластичної обробки металів;

- розв'язанні задачі про пластичну течію пластини з вирізом довільної форми, яка розтягується з заданою (постійною) швидкістю, що дозволило уточнити характер деформування деталі у процесі навантаження (форму контура вирізу) і її геометрію в момент руйнування;

- прямому і оптимізаційному розв'язанні задачі про скісний

вихід штаби у валки, що дало можливість виявити залежність між кутами нахилу штаби до горизонту і її викривленням на виході із валків при асиметричній прокатці, одержати чисельні дані, які характеризують реальні можливості керування процесом (зменшенні величини викривлення) за рахунок непогодження кутових швидкостей та (або) різниці радіусів валков;

- розв'язанні задачі про навантаження пластично-неоднорідної штаби жорсткими штампамі, що дозволило уточнити вплив неоднорідності на розташування і розвиток пластичних зон, а також величину граничного навантаження.

Результати, одержані в дисертації, можуть бути використані:

- при розрахунку параметрів передавлювання штаби при безперервному разливу сталі;

- при побудові моделей руйнування конструкцій, які містять елементи з ушкодженнями, а також при аналізі результатів випробувань зразків з криволінійними вирізами довільного радіусу;

- при розрахунку параметрів і керуванні процесом асиметричної прокатки.

Достовірність отриманих результатів забезпечується адекватністю розглядуваних схем навантаження, або процесів і прийнятих для їх опису механічних моделей, використанням належним чином обгрунтованих математичних моделей і методів, контролем практичної збіжності алгоритмів і точності обчислювань, хорошим співпадінням результатів розв'язання відомих задач за допомогою розроблених у дисертації методів і алгоритмів, з результатами, одержаними іншими авторами і, нарешті, відповідністю цих результатів загальним якісним закономірностям, характерним для розглядуваних видів навантаження, або процесів. Фізична

допустимість одержаних рішень забезпечувалась і перевірялась відомими, прийнятими в теорії ідеально-пластичного середовища, способами.

На захист вносяться:

- методика і алгоритми розв'язування прямих і зворотніх (оптимізаційних) задач плоскої пластичної течії металів, побудованій на операторному способі складання матричних рівнянь для відшукування ліній ковзання і методів нелінійного програмування для розв'язування цих рівнянь

- алгоритм і результати розв'язання задачі про дію жорсткого штабу на пластично неоднорідну штабу;

- метод, алгоритм і результати розв'язання задачі про нестационарну течію пластини з криволінійними вирізами довільного радіусу;

- постановка, алгоритм і результати розв'язання задачі про вплив кута нахилення полоси при вході у валки на викривлення вихідного кінця;

- постановка і розв'язок задачі керування процесом прокатки штаб з асиметрією, обумовленою похилим входом полоси у валки - мінімізація викривлення вихідного кінця за рахунок нелогодження кутових швидкостей і (або) зміни радіусів верхнього і нижнього валків.

Публікації. Основний зміст дисертації опублікований у статтях [1-6; 108].

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідались на III Міжнародній конференції "Матеріали для строительных конструкций". - Дніпропетровськ, 1994; Першому з'їзді Хорватської Спілки Механіків (1st. Congress of

Croatian Society of Mechanics). - Пула, Хорватія, 14-17 вересня 1994 р.; Міжнародній конференції по формозмінюванню (International Conference on Formability' 94). - Острава, Чеська Республіка, 24-27 жовтня 1994), на наукових семінарах кафедри "Будівельної механіки" Металургійної академії України.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох глав і висновків. Дисертація містить 142 сторінки друкованого тексту, 4 таблиці і 30 малюнків. Список використаних джерел містить 109 найменувань. Характеристика стану справ по кожному із розглянутих у дисертації питань або розв'язуваних задач міститься у першому параграфі відповідної глави.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми, формулюється мета роботи, подаються аргументи, які характеризують новизну розглядуваних задач, практичну цінність одержаних результатів, обґрунтовується їх достовірність. Подається коротка характеристика змісту окремих глав роботи.

Перша глава має загальнотеоретичний характер. Основне місце в ній відведено викладенню мало висвітлених питань формування операторів для перетворення ліній ковзання в комірках різного типу (центроване віяло, угнутий або опуклий чотирикутник), формулюванню граничних умов і іншим аспектам операторного способу, який дозволяє звести задачу відшукування поля ліній ковзання і годографа (діаграми швидкостей) для статично і кінематично невизначених задач плоскої пластичної течії до розв'язування нелінійного матричного рівняння [1, 4]. Приведені

узагальнюючі таблиці, які характеризують вигляд і результати дії матричних операторів різного призначення. У цій же главі наведено коротке зведення основних співвідношень теорії ліній ковзання, що зробило можливим більш компактно висвітлення матеріалу. В наступних главах за рахунок упорядкування посилюючого матеріалу.

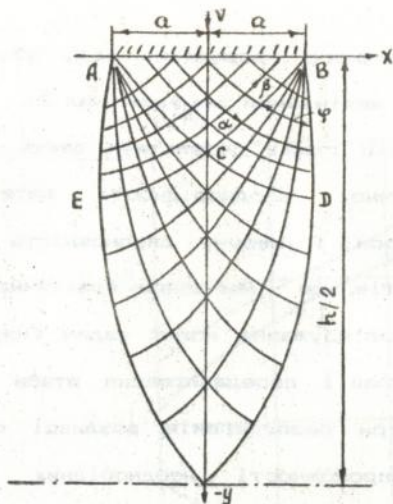
У другій главі розглянуто задачу про здавлювання штаби з товщиною $2h$ двома плоскими жорсткими штампами (що, як відомо, є еквівалентом задачі про стискання жорстким штампом штаби з товщиною h , яка покоїться на абсолютно гладкій основі). На відміну від класичної постановки, вважається, що граничне напруження опору зсуву K матеріалу штаби змінюється довільним чином $K = K(x, y)$ (для другої половини штаби закон змінювання величини K вважається симетричним). В інших відношеннях постановка задачі не відрізняється від класичної: на ділянці дії штаму (лінії контакту) рівномірно розподілені нормальні зусилля з інтенсивністю p , після переходу смуги під штампом до пластичного стану останній опускається із швидкістю $v = v_0$, контактна поверхня штаму являється цілком гладкою, в наслідок чого тангенціальні напруження по лінії контакту відсутні.

Оскільки розглядувана задача відноситься до числа статично визначених, при її розв'язуванні операторний метод не використовується. Одержані аналоги рівнянь Генкі на лініях ковзання [5], які мають вид:

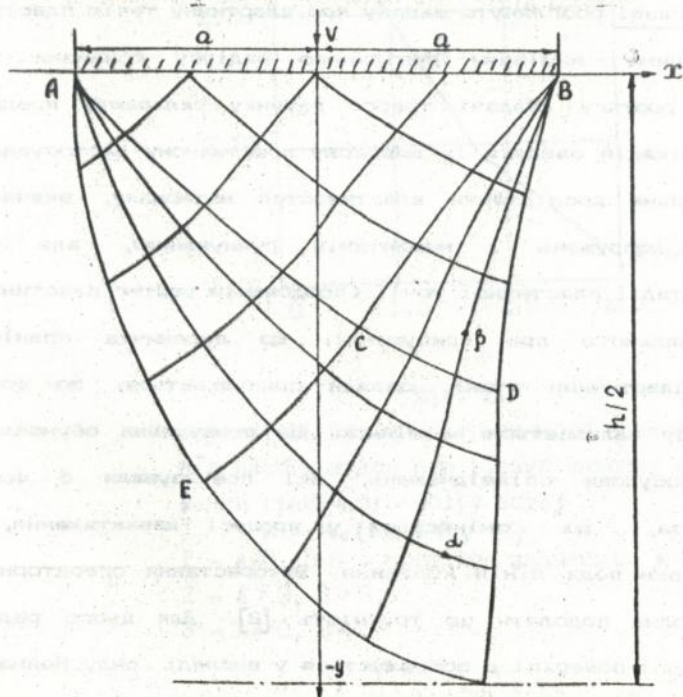
$$\left. \begin{aligned}
 &\text{на } \alpha \text{ лініях:} \\
 &d\sigma + \frac{\partial k}{\partial y} dx - \frac{\partial k}{\partial x} dy - 2kd\theta = 0, \\
 &dy = dx \operatorname{tg} \theta, \\
 &\text{на } \beta \text{ лініях:} \\
 &d\sigma - \frac{\partial k}{\partial y} dx + \frac{\partial k}{\partial x} dy + 2kd\theta = 0, \\
 &dy = -dx \operatorname{ctg} \theta,
 \end{aligned} \right\} (1)$$

де $\sigma = \sigma_x + \sigma_y$ - середнє напруження, σ_x , σ_y - нормальні напруження на координатних площадках декартової ортогональної системи координат (x, y) , $k = k(x, y)$ - граничне напруження опору осузу, θ - кут між напрямком α - лінії ковзання і віссю x .

При розв'язуванні задачі використовувалась загальна схема Прандтля з переходом до скінчено-різностних формулювань граничних задач звичайних у цьому виладку типів і розв'язуванні виникаючих систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Чисельні результати наведено для конкретного (лінійного) закону залежності граничного напруження $k(x, y)$ від координат $k = k_0(Ax + By + 1)$. В результаті розв'язання задачі знайдено, що поле ліній ковзання під штампом при змінному граничному опорі зберігає, взагалі, той же характер, що і при $k = \text{const}$, але відрізняється в деталях: відсутня ділянка із сталими напруженнями безпосередньо під штампом, границі усіх областей являють собою криві лінії, при зменшенні граничного напруження опору осузу в тому, чи іншому напрямі, в тому ж напрямі деформується загальна картина поля ліній ковзання (мал. 1а, б). При убаванні $k(x, y)$ у напрямку до центра штаби, граничне навантаження на штамп стає меншим, ніж його значення при $k = k_0$, що відповідає фізичним уявленням. До цього слід додати, що при лінійним, наприклад,



Мал. 1а. Розв'язок Соколовського задачі про здавлювання штаби жорсткими штапами: поле ліній ковзання

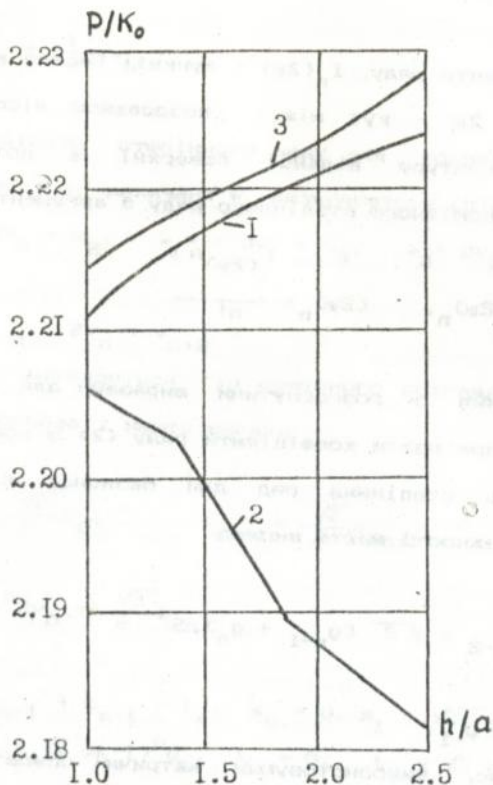


Мал. 1б. Поле ліній ковзання у штабі, матеріал якої має змінний опір зсуву, при здавлюванні жорсткими штапами.

характері змінювання граничного напруження $k(x, y)$, граничне навантаження змінюється за нелінійним законом (мал 2).

Взагалі, одержані в цій главі результати дають можливість визначити вплив пластичної неоднорідності матеріалу на розташування пластичних зон і несучу спроможність елементів конструкцій та інших об'єктів, що має певне практичне значення, оскільки робе можливим розв'язування нових задач (наприклад, про визначення параметрів операції передавлювання штаби на стадії часткової кристалізації при безперервній розливці сталі, про визначення несучої спроможності неоднорідних стрічкових фундаментів і таке інше).

У третій главі розглянуто задачу про пластичну течію пластини з криволінійними вирізами довільного радіусу кривизни при поздовжньому розтягу. Задачі такого гатунку складають предмет багатьох публікацій завдяки їх широкому практичному застосуванню (експериментальне дослідження властивостей матеріалу, вивчення концентрації напружень і механізмів руйнування), але при дослідженні стадії пластичної течії (поздовжній розтяг пластини з постійною швидкістю при припущенні, що перемичка повністю перейшла у пластичний стан), завжди припускається, що форма контуру вирізу залишається незмінною. Це припущення обумовлене складністю побудови співвідношень, які пов'язували б форму контура виріза, що змінюється у процесі навантаження, з характеристиками поля ліній ковзання. Використання операторного способу дозволяє подолати цю трудність [2]. Для цього радіус кривизни вільної поверхні ρ зображується у вигляді ряду Неймана



Мал. 2.

Залежність величини граничного навантаження від висоти штаби при різних законах змінування граничного опору зсуву

$$K = K_0(Ax + By + 1)$$

1 - $A=0, B=0$ - постійне значення $K = K_0$

2 - $A > 0, B > 0,$

3 - $A = 0, B < 0.$

$$\rho = \sum_{n=0}^{\infty} g_n I_n(2\psi), \quad (2)$$

де g_n - коефіцієнти ряду, $I_n(2\psi)$ - функції Беселя першого роду з аргументом 2ψ , 2ψ - кут між поздовжньою віссю пластини і дотичною до контуру вільної поверхні в поточній точці. Використання допоміжного степінного ряду з аргументом 2ψ

$$\rho = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (2\psi)^n, \quad (2\psi)^n = \frac{(2\psi)^n}{n!} \quad (2')$$

і його зрівняння з розгорнутими виразами для функцій Беселя (2), дозволяє пов'язати коефіцієнти ряду (2) з коефіцієнтами a_n , які визначають степінний ряд для базисної лінії ковзання. Відповідні залежності мають вигляд:

$$a_n + a_{n-2} = \sqrt{2} (g_{n-1} + g_n), \quad (3)$$

при чому $a_{-2} = g_{-1}$.

Це дозволяє, використовуючи матричні оператори, побудувати поле ліній ковзання у всій області, яка прилягає до вільної поверхні (контура виріза). Задача, таким чином, зводиться до визначення коефіцієнтів g_n у довільний момент навантаження (який задається параметром часом t). Для знаходження залежності коефіцієнтів g_n від часу, розглядаються співвідношення, які пов'язують швидкість змінювання радіуса кривизни ρ при фіксованому значенні $\theta = 2\psi$, з локальними компонентами швидкості (з урахуванням того, що вільна поверхня є траєкторією головних швидкостей деформації і зсуви на ній відсутні). Похідні g_n коефіцієнтів g_n по часу пов'язані з кінематичними величинами

співвідношенням

$$g_n = v_n + \frac{1}{4} w_n, \quad (4)$$

де v_n - коефіцієнти степінного ряду для нормалної компоненти локальної швидкості, величини w_n визначаються співвідношеннями

$$w_0 = -2v_0 + v_2, \quad w_1 = -3v_1 + v_3, \quad w_2 = 2v_0 - 2v_2 + v_4,$$

$$w_n = v_{n-2} - 2v_n + v_{n+2}.$$

Коефіцієнти v_n знаходяться із сумісного розгляду полів ліній ковзання і годографа і мають вигляд:

$$v_0 = v_0 + \frac{\sqrt{2}}{2} k_0, \quad v_{2n+1} = \frac{\sqrt{2}}{2} k_{2n+1}, \quad (5)$$

$$v_{2n} = (-1)^n 2v_0 + \frac{\sqrt{2}}{2} k_{2n},$$

$$\text{де } k_n = s_n + s_{n-1} + t_{n-1} - t_n, \quad s_0 = 0, \quad s_1 = \sqrt{2} w d_0,$$

$$t_{n+1} + t_{n-1} = \sqrt{2} w (-1)^n d_n, \quad t_0 = 0, \quad t_1 = \sqrt{2} w d_0, \quad (6)$$

$$d_n = I_n(2\psi) + I_{n+1}(2\psi), \quad w - \text{швидкість навантаження пластини.}$$

Таким чином, для інтервалу часу δt нові коефіцієнти ряду Неймана для радіуса кривизни вільної поверхні визначаються співвідношенням

$$g_n(t + \delta t) = g_n(t) + g_n(t) \delta t. \quad (7)$$

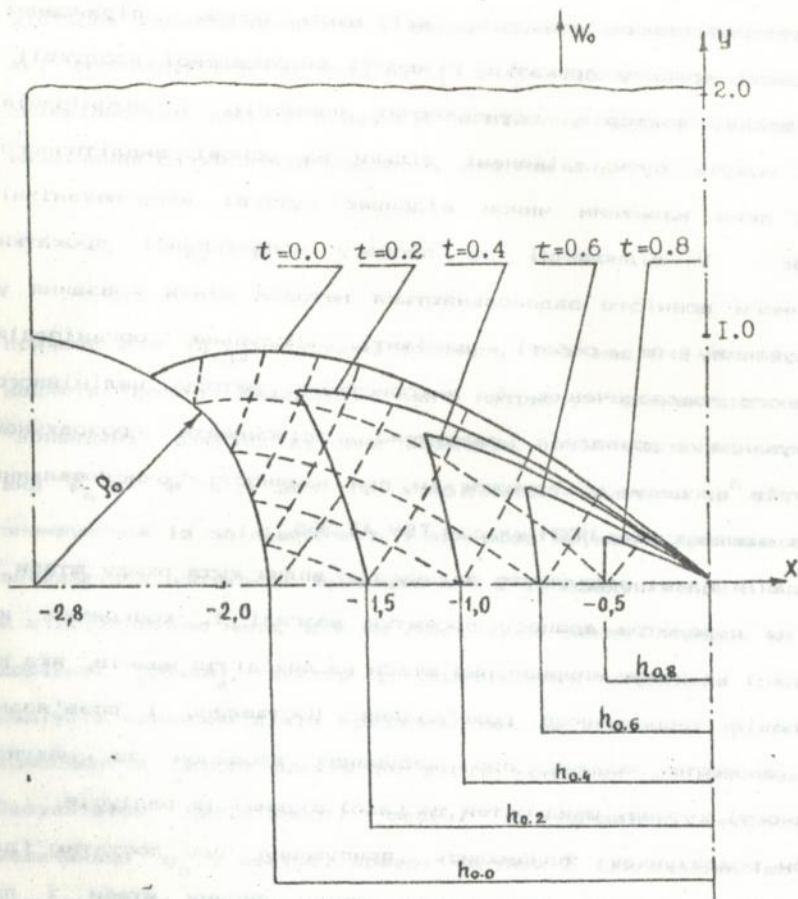
Нова півширина перемички ϵ

$$h(t + \delta t) = h(t) - v_0 \delta t), \quad (8)$$

а нове значення кута 2ψ знаходиться шляхом чисельної інтерполяції (метод січних).

Результати розрахунків (мал. 3) показують що вживане раніш припущення про збереження первісної форми вільної поверхні не справджується: значення радіуса кривизни контуру вільної поверхні (принятого при розрахунках за коло, радіус якого дорівнює одиниці) росте від початкового значення $\rho_0 = 1$ до величини $1,5\rho_0$ за час дії навантаження $t = 0,5\rho_0/w$ (зруйнування мало місце при $t = 1,1\rho_0/w$). Як здається, цим можна пояснити меншу, ніж при розрахунках, не враховуючих зміни форми вільної поверхні вирізу, різницю часу потрібного для зруйнування пластин з еліптичним і круговим вирізами. Так, наприклад, при розтягуванні пластини з еліптичним вирізом (ексцентриситет 1,2, більша вісь еліпса паралельна вісі пластини) час зруйнування, відповідно розрахунку, в якому враховується зміна форми вирізу, дорівнює $1,3\rho_0/w$, тоді як при розрахунку, в якому цей ефект не враховується, час зруйнування дорівнює $1,45\rho_0/w$. Врахування зміни кривизни вирізу дозволяє також скорегувати значення коефіцієнта зміцнення матеріалу в області вирізу: в початковий момент ($t = 0$) середнє приведені напруження $\sigma_y/k = 3,2$, а при збільшенні радіуса кривизни при навантаженні значення цього коефіцієнту зменшується і в момент зруйнування ($\rho \rightarrow \infty, 1 - \rho_0/\rho \rightarrow 1$) дорівнює двом.

В четвертій главі розглянуто задачу розрахунку і керування параметрами процесу асиметричної прокатки. Асиметрія процесу прокатки виникає, з одного боку, як природний результат наявності багаточисельних збуржючих факторів, несприятливого сполучення технологічних і конструктивних допусків, а з другої - як



Мал. 3.

Змінювання ширини перемички h , радіуса кривизни вільної поверхні ρ і вигляду пластичної зони при розтягу пластини з круговими вирізами

$$(\rho_0 = 1, h/\rho_0 = 1,8, w_0 = 1).$$

ЛІВ ім. В. Стефанишина
АН України

результат спеціальних заходів, які мають метою підвищення ефективності процесу прокатки і якості виготовленої продукції.

Оцінка впливу факторів, обумовлюючих асиметрію, і оптимізація процесу можуть бути здійснені тільки на основі аналітичного підходу, який належним чином відбиває суттєві його механічні аспекти. У відношенні до процесу асиметричної прокатки такі вимоги повністю задовольняються методом лінії ковзання у розглядуваному в роботі варіанті. Модульна організація програмного забезпечення і використання методу нелінійного програмування дозволяє ефективно здійснювати розрахунок параметрів процесу і керувати їм при наявності обчислювальних машин з можливостями ПЕОМ класу IBM AT 386.

В даній главі розглянуто задачу про вплив кута входу штаби у валки на параметри процесу прокатки взагалі і, конкретно, на напрямок і величину викривлення штаби на виході із валків, яка не мала раніш теоретичного розв'язання. Поставлено і розв'язано також зворотню задачу про керування процесом за рахунок розбіжності кутових швидкостей та (або) різниці їх радіусів.

При розрахунках приймалися припущення: про достатню (для реалізації плоского деформівного стану) ширину штаби і про наявність повного прилипання по осі поверхні контакту штаби і валків. Попередня картина поля лінії ковзання і годографа визначалась загально-принятим способом [3], а специфіка задачі (похилий вхід) відбивається у тому, що до матричних рівнянь, описуючих поле лінії ковзання і годографа, додаються співвідношення, які пов'язують кут нахилу штаби до горизонту на вході у валки з параметрами поля лінії ковзання.

При асиметричному процесі поле лінії ковзання визначається

шістьома характеристиками і двома лініями годографа швидкостей, які розглядаються як базові [3]. Використання операторних співвідношень дає, у підсумку, нелінійне матричне рівняння для визначення сітки ліній ковзання, яке має вид

$$a\dot{\chi} = \dot{b}, \quad (9)$$

причому $a = [a_{ij}]$ - блочна матриця, яка має 8×8 блоків. Блоки являють собою квадратні $n \times n$ матриці, елементами яких є "приведені" степені куткових розмірів ліній ковзання, які мають вид $\varphi_n = \varphi^n/n!$, або їх комбінації. Величини $\varphi^n/n!$ швидко зменшуються із збільшенням n і при розв'язуванні прикладних задач виявляється достатнім прийняти $n = 6$ (розрахунки при $n = 6$ і $n = 8$ відрізняються менш, ніж на 2%). Таким чином, порядок матриці a дорівнює $[48 \times 48]$, вектор $\dot{\chi}$ (коефіцієнти степінних рядів для радіусів кривизни ліній ковзання) має 48 компонентів, стільки ж компонентів (вісім блоків по шість компонентів) має вектор \dot{b} . Результатом нелінійності задачі є наявність елементів з величинами φ_n у векторі правої частини \dot{b} (нагадаємо, що куткові розміри ліній ковзання заздалегідь невідомі і мають бути знайдені у результаті послідовних наближень). З цієї причини для розв'язування системи (9) доцільно використовувати методи нелінійного програмування. В роботі прийнятий метод ковзано допуску. Оскільки він дозволяє враховувати обмеження як типу рівностей, так і типу нерівностей, його використання रहे можливим розв'язування прямих і зворотніх задач. Рівняння (9) може бути розв'язане відносно $\dot{\chi}$ при відомих (на кожній ітерації) восьми куткових розмірах ліній ковзання, куткових швидкостях обертання ω_1 ,

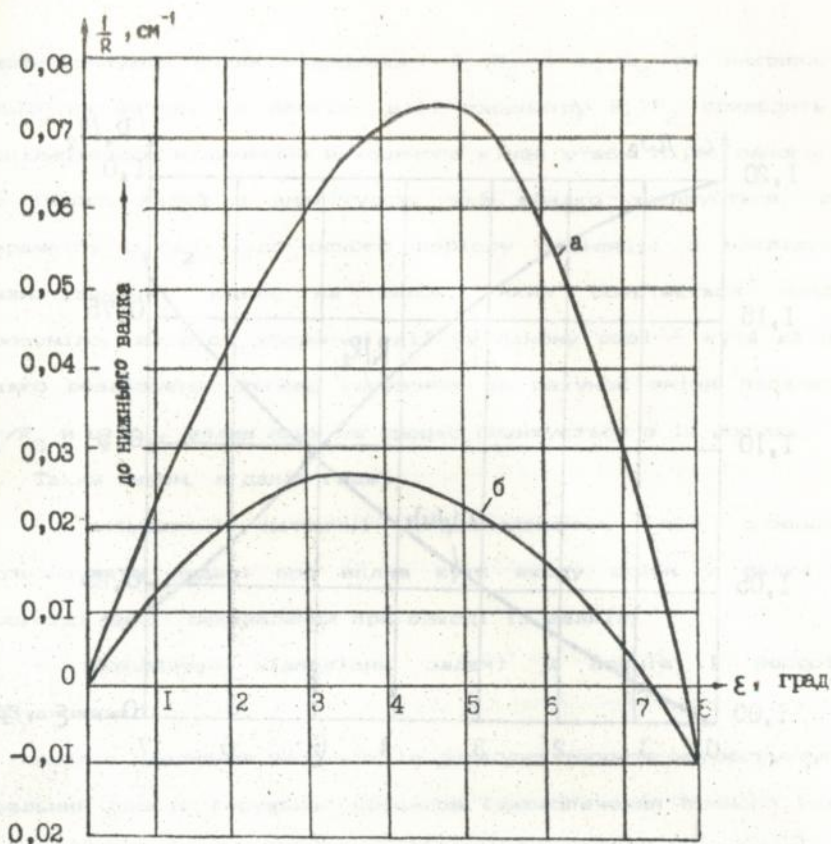
ω_2 і радіусах R_1, R_2 верхнього та нижнього валків, розривах ρ_1, ρ_2 швидкостей на лініях ковзання, які відокремлюють осередок деформації і жорсткі частини штаби і, нарешті, кутові швидкості Ω штаби на виході із валків. Крім того, для визначення поля напружень із рівнянь Генкі потрібно знати тиснення P_0 в якій-небудь точці осередка деформації. В цілому, розв'язок визначається 14 константами. При прямому розрахунку, в роботі, як і звичайно на практиці, задаються кутові швидкості ω_1, ω_2 валків, величина розриву швидкості ρ_1 , радіуси верхнього і нижнього валків (у виді відношень $R_1/h_0, R_2/h_0$, де h_0 - товщина штаби на вході у валки), номінальне обтіснення $r_n = 1-h/h_0$, (h - товщина штаби на виході із валків) і, нарешті, значення p_0 . Завдання цих величин знімає 7 ступеней вільності. Невистачаючи обмеження визначаються умовами фізичної реалізуємості процесу та особливостями технології (при цьому сумарна кількість умов може перевищувати необхідну і вони фігурують у ролі обмежень, які звужують припустимий діапазон зміни параметрів). У нашому випадку задавались: значення вертикальної складової зусилля і момент, які діють на штабу на виході (2 умови), кут ϵ нахилу штаби до горизонту на вході у валки, що еквівалентне фіксації двох параметрів (x, y координат точки зустрічі штаби з одним із валків) і горизонтальна складова сили (3 умови). Вертикальна складова і пов'язаний з нею момент (реакція на рольганг) визначаються розв'язком. Ще дві умови витікають із вимоги відсутності поступового зміщення центрів валків відносно один одного, яке фігурує в загальному розв'язку, але відсутнє в дійсності. Ці умови вичерпують необхідну (для зменшення ступеней вільності) їх кількість.

Включення кута нахилу штаби (або координат точки зустрічі її з валком) у розрахункову схему здійснюється шляхом знаходження його зв'язку з параметрами поля ліній ковзання на основі аналізу геометрично (або технологічно) можливих варіантів входу полоси у валки і виникаючих у зв'язку з цим особливостей осередка деформації. В даній роботі прийнято, що нижній край штаби направлений по дотичній до валка у точці входу, виходячи з чого одержано два рівняння, які пов'язують кут нахилу α з характерними параметрами поля ліній ковзання. Для виділення класу фізично допустимих розв'язань використовуються умови жорсткого виходу штаби, які пов'язують кутові швидкості обертання і радіуси валків з кутовою швидкістю штаби на виході і розривами швидкостей, а також обумовлене прийнятою схемою входу полоси у валки співвідношення, яке пов'язує кути захвату штаби на верхньому і нижньому валках з міжцентровою відстанню валкової пари (кути захвату, крім того, не повинні перевищувати значень, які допускаються технологічними особливостями процесу). Перелічені умови трактується як обмеження на незалежні змінні задачі нелінійного програмування.

Чисельні результати одержано за допомогою пакету програм для розв'язування задач плоскої пластичної течії методом ліній ковзання з використанням матричних операторів. Пакет складається із керуючої програми і підпрограм, призначених для виконання закінчених циклів операцій. До їх числа відносяться: підпрограма побудови поля ліній ковзання за заданими координатами характерних точок і кутовим координатам ліній ковзання, побудови матричного рівняння, яке описує поле ліній ковзання і підпрограма розв'язування нелінійної системи алгебраїчних рівнянь при

наявності обмежень. Підпрограми мають модульну структуру, що робе можливою їх модифікацію в широких межах. Керуюча програма служить для введення вхідних даних із відповідних файлів, організації обчислювань і виведення результатів.

На мал. 4 показано залежність між кутом ϵ входу штаби у валки і викривленням її переднього кінця. Матеріал полоси сталь 16ГС з граничним опором зсуву $k = 210 \text{ Н/мм}^2$, радіуси валків $R_1 = R_2 = 400 \text{ мм}$, кутові швидкості $\omega_1 = \omega_2 = 60 \text{ об/хв}$. Товщина штаби на вході $h_0 = 10 \text{ мм}$, номінальний відносний обтиск $r_n = 0,407$. Нахил ϵ штаби на вході припускається до нижнього валка. Крива 1 відповідає розрахунку при відсутності заднього натягу, крива 2 - при задньому натязі, який дорівнює $0,1k$. Із мал. 4 видно, що в діапазоні зміни кута нахилу $0^\circ \leq \epsilon \leq 5^\circ$ штаба вигибається до нижнього валка, як при відсутності, так і при наявності заднього натягу, причому при збільшенні кута нахилу викривлення зростає. При значеннях ϵ , близьких до 5° , збільшення викривлення передньої частини уповільнюється, а при $\epsilon = 7^\circ$ напрямок викривлення змінюється на протилежний. На мал. 5 показані залежності між співвідношеннями кутових швидкостей (ω_1/ω_2) і радіусів (R_1/R_2) валків, які забезпечують прямий вихід штаби при похилому вході. Видно, що при малих кутах входу прямий вихід штаби досягається за рахунок незначної розбіжності кутових швидкостей, або невеликої різниці радіусів верхнього та нижнього валків (так, наприклад, при $\epsilon = 1^\circ$ прямий вихід переднього краю штаби забезпечується при $\omega_1/\omega_2 = 1,03$ и $R_1/R_2 = 0,94$). При значеннях кута нахилу полоси, які перевищують 3° , керування процесом вимагає використання валків із значно відрізняючимися радіусами. Цей результат може бути повністю пояснений, якщо прийняти до уваги данні, які



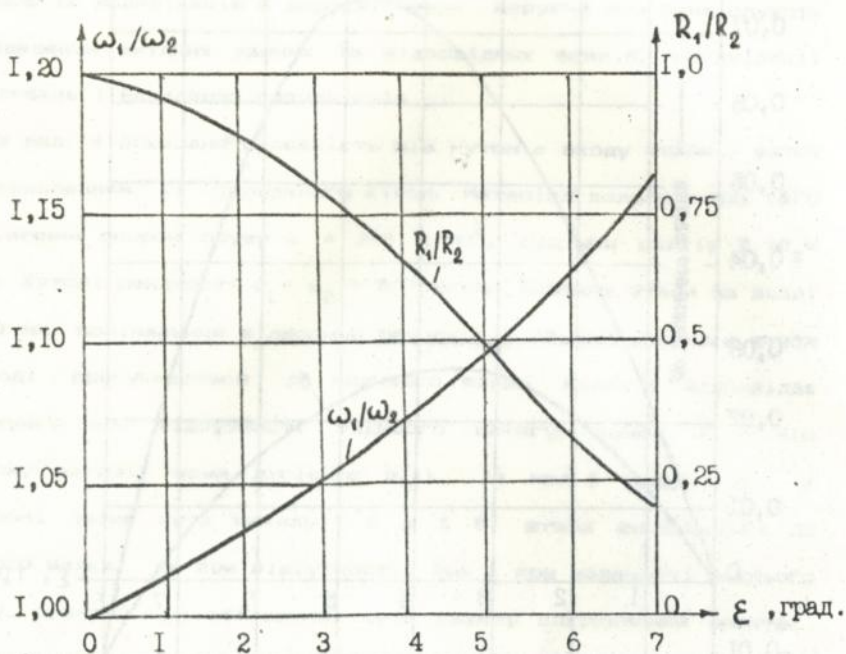
Мал. 4.

Залежність кривизни ($1/R$, см^{-1}) переднього кінця штаби від величини кута нахилу (ξ , град., нахил до нижнього валка) при вході.

а - задній натяг відсутній,

б - задній натяг дорівнює $0,1 \text{ к}$,

$\omega/\omega_{\lambda} = 1$; відносний обтиск $\Gamma_n = 0,407$.



Мал. 5.

Залежність відношень кутових швидкостей (ω_1/ω_2) і радіусів (R_1/R_2) валків, що забезпечують прямий вихід штаби при похилому (ϵ , град.) вході.

характеризують вплив відношень R_1/R_2 і ω_1/ω_2 на викривлення штаби на виході із валків: ріст параметру R_1/R_2 приводить до осциляційного відхилення виходячого кінця штаби то до одного, то до іншого валка з амплітудою, яка швидко зменшується; ріст параметру ω_1/ω_2 - до одного періоду осциляції з наслідуючими "намотуваннями" штаби на валок, який обертається швидше. Зрозуміло, що ріст збурюючої дії (у даному разі - кута ϵ) रहे важко реалізуєним процес керування за рахунок зміни параметрів R_1/R_2 і ω_1/ω_2 , вплив яких на процес зменшується з їх ростом.

Таким чином, в даній главі

- побудовані матричні співвідношення, які дозволяють розв'язувати задачі про вплив кута входу штаби у валки при прокатці на її викривлення при виході із валків;

- розглянуто відповідні задачі у прямій і зворотній постановках.

Аналіз одержаних результатів дозволив теоретично обґрунтувати реальний спосіб керування процесом (забезпечення прямого виходу штаби) за рахунок використання валків з різними радіусами і розбіжності їх кутових швидкостей і встановити межі раціонального використання цих параметрів для практичної реалізації процесу керування. Достовірність одержаних результатів підтверджується їх високою якісною відповідністю відомим ефектам, обумовленим впливом факторів, які розглядаються як керуючі при оптимізаційнім розв'язуванні (відношень R_1/R_2 і ω_1/ω_2).

В заключенні узагальнені результати, одержані в роботі і зроблені висновки.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Показано, що метод ліній ковзання можна використовуватися

для розв'язування задач плоскої пластичної течії тіл з довільно змінюючимся граничним опором зсуву, і розв'язано задачу про дію жорсткого штампу на пластично неоднорідну штабу. Одержані результати використовувались для визначення граничних навантажень при розрахунку параметрів операції передавлювання безперервної стрічки металу, яка становить собою частину технологічного процесу безперервного розливу сталі.

2. Розв'язано задачу про нестационарну пластичну течію пластини з криволінійними вирізами довільної форми. Використання матричних операторів і розкладення радіусу кривизни вирізу у ряд Неймана дозволило визначити зміну форми вирізу і ширини шийки при навантаженні, знайти залежність середнього напруження від змінювання радіусу кривизни і, нарешті, форму вільної поверхні в процесі навантаження і в момент руйнування. Одержані результати можуть бути використані при побудові моделей руйнування конструкцій, які містять елементи з дефектами, уточненні відповідних кількісних характеристик, при аналізі результатів механічних випробувань і розрахунку параметрів технологічних операцій.

3. Розв'язано задачу про вплив кута нахилу штаби при вході у валки на викривлення її переднього краю при виході із валків. Доведено, що наявність заднього натягування суттєво знижує величину викривлення.

4. Розв'язано задачу оптимізації параметрів процесу прокатки при похилому вході полоси у валки. Показано, що за рахунок розбіжності кутівих швидкостей валків і різниці їх радіусів можливо мінімізувати викривлення виходячого кінця. Чисельно встановлено, що керування процесом за рахунок зміни цих

параметрів ефективно при малих кутах нахилу штаби і, відповідно, при незначних розбіжностях куткових швидкостей і малих різницях радіусів валків. Знайдене виявлення цієї обставини.

Основний зміст дисертації опублікований у роботах:

1. Бинкевич И. В. Определение параметров плоского пластического течения с использованием нелинейного программирования // Актуальные проблемы вычислительной механики и прочности конструкций (Сборник научных трудов). - Днепропетровск. Изд-во ДГУ. - 1995. - с. 4 - 9.
2. Бинкевич И. В., Колесник И. А., Медведева Л. В. Определение параметров плоского пластического течения металла как задача нелинейного программирования // Динамика и прочность машин и конструкций. Межвузовский сб. научн. трудов. - Днепропетровск. Изд-во ДГУ. - 1993. - вып. 14. - с. 91- 99.
3. Бинкевич И. В., Колесник И. А. Расчет и оптимальное проектирование полосы с выточками при конечных пластических деформациях // Тез. докладов III междунар. научн. конференции "Материалы для строительных конструкций". - Днепропетровск. - 1994. - с. 85.
4. Голубченко А. К., Мазур В. Л., Бинкевич И. В. Влияние угла входа полосы в валки на параметры процесса прокатки // Металлургическая и горная промышленность. - 1994., N 3 (173). - с. 20-24.
5. Binkevich I., Mamuzic'I., Medvedeva L. The investigation of the metal forming processes using nonlinear programming technique // Proceedings of the 1st congress of Croatian Society of Mechanics. - Pula, Croatia. - 1994. - P. 505-511.

6. Mamuzic'I., Binkevich I., Medvedeva L. The determination of the plane strain plastic flow parameters using nonlinear programming technique // International conference on Formability '94. - Ostrava, Czech Republic. - 1994. - P. 362 - 369.

7. Mamuzic' I., Binkevich I., Shinkarenko V., Application of finite elements method for the analysis of coils of thin cold-rolled strip // Metallurgija. - 1995, N4 (34). - P. 149-151.

Особистий внесок автора. Усі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. Особистий внесок автора в публікації по темі дисертації, які виконані спільно з співавторами, полягає в наступному:

[2], [3] - постановки задач, одержання теоретичних залежностей, складання, лагодження і тестування програм, участь у проведенні обчислювань, аналіз результатів;

[4] - постановка і всебічний теоретичний аналіз задачі, складання і лагодження програми, проведення обчислювань, участь у аналізі одержаних результатів;

[5], [6] - постановка задач, одержання теоретичних залежностей, складання обчислювальних програм, участь у проведенні обчислювань, аналіз результатів;

[7] - участь у постановці задачі та аналізі результатів (з точки зору порівняння з можливостями методу ліній ковзання).

Бинкевич И. В.

Решение нестационарных и неоднородных задач пластического

течения методом линий скольжения с использованием матричных операторов и нелинейного программирования.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Запорожский государственный университет, Запорожье, 1996.

Представлены полученные на основе метода линий скольжения с использованием матричных операторов и нелинейного программирования аналитические разработки и численные алгоритмы, позволяющие решать задачи механики деформируемого твердого тела, возникающие при рассмотрении вопросов общетеоретического и прикладного характера. Решены задачи о действии штампов на пластически неоднородную полосу, нестационарном течении полосы с симметричными выточками произвольной формы и о влиянии угла наклона полосы на входе в валки на ее искривление на выходе.

Ключові слова: метод ліній ковзання, матричні оператори, нелінійне програмування, здавлювання штаби жорсткими штампамі, нестационарна течія пластини з криволінійними вирізами, похилий вхід штаби у валки, визначення і оптимізація параметрів асиметричної прокатки.

Binkevich I. V.

Method of solution of nonstationary and inhomogeneous problems of plastic flow on the basis of slip-line method using matrix operators and non linear programming technique.

Thesis for the physico-mathematical sciences 01.02.04 - candidate's degree in mechanics of deformable bodies. Zaporozhski

State University, 1998.

Presented results contain the theoretical development and numerical algorithms enabling the investigation of problems of the deformable bodies, appearing in theoretical and practical fields of research activities. There are obtained the solutions of problems of a pressure of rigid punches, on a plastically inhomogeneous strip, of a nonstationary plastic flow of a plate having lateral symmetric cuts of arbitrary radius of curvature and of the parameters of asymmetrical rolling, supposed the asymmetry to be caused by inclined coming of a rolled strip into rolls.

Key words: slip-line method, matrix operators, nonlinear programming, pressure of a punch, plastically inhomogeneous strip, nonstationary flow of a plate, asymmetrical rolling.

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск Ю. А. Сисосв

Підписано до друку 10.04.96. Формат 60x84/16. Напір друкарський. Офсетний друк. Умови друк арк. 1,62. Умови фарб.-відб. 1,62. Тираж 80. Замовлення N 301. Замовлене.

Видавничо-поліграфічне орендне підприємство "Дніпро"

ВПЮП "Дніпро", 320070, м. Дніпропетровськ, вул. Серова, 7.

44653

AB 34.857

AB 34.857