

структуру, fazovyyi sostav i svoystva splava Nb–Ti / N.I.Matrosov, V.V.ChIshko, V.Yu.Dmitrenko, E.A. Pavlovskaya, L.F. SEnnikova, V.Z.Spuskanyuk, V.V. Chabanenko, S.V. VasilEv, E.A. MEdivEdskaya, B.A.Shevchenko // Fizika i tehnika vyisokih davleniy 2005, vol 15, No 1. P. 95–53. 7. Korshunov A.I. Issledovanie vliyaniya kolichestva tsiklov ravnokanalnogo uglovogo pressovaniya na skorostnuyu chuvstvitelnost titana VT1–0/ A.I. Korshunov, I.I. VEDernikov, L.V. Polyakov, A.A. Smolyakov, T.N. Kravchenko, I.V. Korotchenkova // Fizika i tehnika vyisokih davleniy 2006, vol. 16, No 4. P. 68–71. 8. Murashkin M.Yu. Osobnosti struktury i mehanicheskie svoystva alyuminievogo splava 6061, podvergnutogo obrabotke ravnokanalnyim uglovyim pressovaniem v parallelnyih kanalah /M.Yu. Murashkin, E.V. Bobruk, A.R. KilmanEtov, R.Z. VallEv // Fizika metallov i metallovedenie, 2008, vol 108, No 4, P. 439–447. 9. Varyuhin V.N. Vliyanie vintovoy gidroekstruzii i prokatki na izmenenie submikrostruktury medi /V.N. Varyuhin, E.G. Pashinskaya, S.V. Dobatkin, S.G. Sinkov, V.M. Tkachenko, A.V. REshEtov // Fizika i tehnika vyisokih davleniy 2002, tom 12, No 4, p. 53–59. 10. Patent UkraYini No 64346 Matritsya dlya zmltsnennya materlalu pri bagatorazovomu presuvanni /V.A. Tltov, M.S. Trivaylo, N.K. Zlochevska, E.V. Kondratyuk, G.I. Psychev., opubl. 10.11.2011. Byul.21. 11. Zlochevska N.K. ZakonomlrnostI formuvannya strukturnih ta mehanichnih vlastivostey splava sistemi Zr–Nb v umovah Intensivnih plastichnih deformatsiy // VIsnik NTU «KHPI». – 2013. No 43 (1016) p. 114–120. 12. Zlochevska N.K. DeyakI zakonomlrnostI formuvannya strukturnih vlastivostey livarnogo splavu AK7ch v umovah Intensivnih plastichnih deformatsiy / N.K. Zlochevska, V.M. Duka, V.V. PImanov, P.S.Vishnevskiy // VIsnik NTUU«KPI». SerIya «Mashinobuduvannya». – 2011. No 62. p. 251–254. 13. Semenchenko A.I. Izotermicheskoe pressovanie lityih zagotovok iz splava Ak7ch / A.I. Semenchenko, N.K. Zlochevska, A.G. Vernidub, L.K. Shenevidko // Vestnik Natsionalnogo tehniceskogo universiteta Ukrainy «Kievskiy politehnicheskiy institut». Seriya «Mashinostroenie». – 2011. No 62. p. 237–241. 14. Dobrovlyanskiy S.M. Ustanovka dlya doslIdzhennya presuvannya v Izotermichnih umovah / S.M. Dobrovlyanskiy, P.S. Vishnevskiy, S.F. Kalantir, N.K. Zlochevska // VIsnik NTUU «KPI». SerIya «Mashinobuduvannya». – 2009. – No 56. p. 189–192.

Надійшла (received) 12.11.2015

УДК 628.16:621.981.3

**О. І. ТРИШЕВСЬКИЙ**, докт. техн. наук, проф., ХНТУСГ

ім. П. Василенка, Харків,

**М. В. САЛТАВЕЦЬ**, інж., ХНТУСГ ім. П. Василенка, Харків

## **ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ШАРІВ МЕТАЛУ І ІНТЕНСИВНОСТІ ВИДІЛЕННЯ ТЕПЛА ПРИ ЧИСЕЛЬНОМУ РІШЕННІ ЗАДАЧ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ**

Встановлено, що для чисельного рішення теплофізичних задач теплообміну системи валок – полоса, що описуються рівняннями нестационарної теплопровідності, найбільш ефективним є вибраний метод кінцевих від’ємностей, на основі якого визначені залежності швидкості переміщення шарів металу і підвищення температури внаслідок його пластичного деформування. Виконані дослідження є основою для подальшого вирішення нелінійних задач, що описуються рівняннями нестационарної теплопровідності, зокрема задач теплового стану системи валок – полоса при прокатці.

**Ключові слова:** гаряча прокатка, смуга, математична модель, тепловий стан, надшвидкісне охолодження, чисельне рішення, метод кінцевих різниць.

**Вступ.** Відомо, що з метою скорочення часу технологічного процесу і економії енергетичних витрат, розроблено устаткування для надшвидкісного охолодження листа

(ULTRA FAST COOLING – UFC) на ділянках перед чистовою групою клітей і після чистової групи перед моталкою [1].

На Україні не існує прокатних станів V покоління, а також сучасних методів проектування технологічного процесу прокатки з використанням цього ефективного прийому. Одним із перспективних шляхів рішення практичних задач розробки нових технологій і устаткування є залучення для цих питань методу математичного моделювання з використанням аналогової і цифрової обчислюваної техніки.

Невирішеною до цього часу залишається проблема охолодження полоси і валків при мінімумі розходу енергії, що дозволило би більш ефективно використовувати існуюче обладнання для здійснення нового технологічного процесу. Внаслідок цього, розробка раціонального охолодження полоси і валків на основі математичного моделювання цього технологічного процесу є своєчасною та актуальною.

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** В роботах [2, 3] розроблена математична модель теплового стану полоси та валків під час прокатки. Якщо математична модель явища відома, то одним із шляхів її дослідження та отримання кінцевого рішення є математичне моделювання, тобто рішення систем рівнянь за допомогою або без допомоги обчислюваних машин [4, 5]. Для рішення лінійних і нелінійних задач застосовуються наступні методи: підстановок, варіаційний, ітераційний та кінцевих від'ємностей [6]. Методика вибору оптимального рішення задач математичної фізики як з використанням обчислювальних машин, так і без них – відсутня. На підставі розгляду робіт із застосування обчислювальних машин для рішення теплофізичних задач [4, 5] можна зробити висновок, що для рішення нелінійних і об'ємних задач, що описуються рівняннями типу рівняння нестационарної теплопровідності, найбільш ефективним є метод кінцевих від'ємностей.

**Матеріали досліджень.** Для отримання результатів у числовому вигляді переходять від диференціальних рівнянь з частковими похідними до відповідних рівнянь в кінцевих від'ємностях. Рішення в кінцевих від'ємностях отримують шляхом заміни похідних їх від'ємностями.

У роботах [4, 5, 6] наведені приклади переходу від диференціальних рівнянь з частковими похідними до рівнянь в кінцевих від'ємностях. Вони мають практично однаковий вигляд і відрізняються лише записом в залежності

від системи координат (прямокутна чи циліндрична) і виду (лінійного або нелінійного). Наведено [4, 5] навіть кінцево-від'ємні рівняння для прямокутної і циліндричної системи координат з нерівномірним кроками по простору. Ці рівняння призначені для визначення залежностей при обчисленні РС – сіткових, або R-R – сіткових електромоделей при рішенні задач нестационарної теплопровідності неявним кінцево-від'ємним методом.

При використанні цифрових обчислювальних машин для визначення розподілу температури у двомірному або тривимірному тілі може бути використано метод обернення матриці. У цьому випадку систему рівнянь балансу енергії для вузлів сітки записують у вигляді матриці. Спроба скористатися текстами програм обернення матриці (MATINV та EXCH), наведених у згаданих роботах показала, що їх тексти представлено у спотвореному вигляді, внаслідок чого використання цих програм неможливе. Таким чином, окрім системи рівнянь балансу енергії для усіх вузлів осередку деформації необхідно також самостійно розробити програми обернення матриць великих розмірів. Шлях можливий, але потребує значних затрат часу.

У разі використання явного кінцево-від'ємного методу задача спрощується – необхідно лише самостійно скласти кінцево-від'ємні рівняння балансу енергії для кожного вузла з урахуванням геометрії об'єктів досліджень.

Для визначення швидкості переміщення  $U$  шарів металу в зоні деформування необхідно знайти кут захвату металу валками. Відомо [7], що кут захвату знаходять з рівняння

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{2R}, \quad (1)$$

де  $\Delta h = h_0 - h_1$ ,

$h_0$  – товщина металу на вході в зону деформування;

$h_1$  – товщина металу на виході з зони деформування;

$R$  – радіус валка.

Оскільки швидкість деформування (переміщення шарів металу) при прокатці нерівномірна, поділимо зону деформування (кут захвату) на 10 окремих ділянок (рис. 1).

Час деформування у кожній ділянці становить  $0,1\Delta\tau$ . Рівняння (1) може бути записано у вигляді

$$\frac{\Delta h}{2} = R(1 - \cos \alpha) \quad (2)$$

Переміщення шарів металу на ділянках може бути знайдено з рівняння

$$\frac{\Delta h_i}{2} = \frac{\Delta h_{i+1}}{2} - R(1 - \cos \alpha_i) \quad (3)$$

де  $i$  – кількість ділянок ( $i=10, 9, 8...3, 2, 1$ );

$\alpha_i$  – кут захвату на  $i$ -тій ділянці (для ділянки №9  $\alpha_i=0,9\alpha$ ; для ділянки №8  $\alpha_i=0,8\alpha$ ).

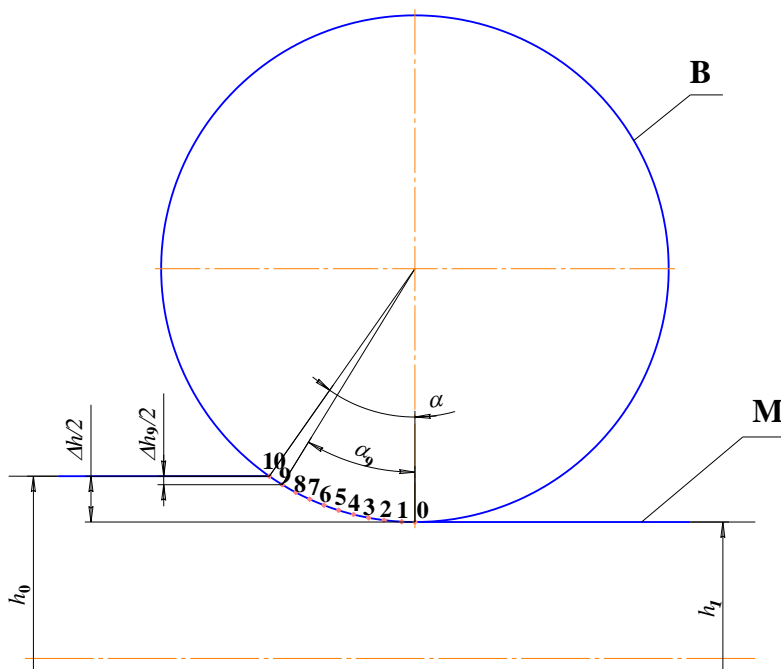


Рис. 1 – Схема поділу зони деформування на ділянки: В – валок; М – метал.

Маючи переміщення шарів металу на кожній ділянці і відомий час ( $0,1\Delta\tau$ ), є змога знайти швидкість переміщення шарів металу у напрямку до середини слябу, яка має більш високу температуру і обчислити підвищення температури.

Підвищення температури внаслідок пластичного деформування металу враховує інтенсивність виділення тепла в одиниці об'єму ( $q_v$ ). У роботі [8] наведено 10 залежностей, запропонованих різними авторами для визначення  $q_v$ . Відкидаючи 6 з них, які мають у своєму складі емпіричні коефіцієнти, маємо змогу проаналізувати ті, що залишилися.

В роботі [9] пропонуються однакові залежності, які мають вигляд

$$\Delta T_d = \frac{A}{G \times c} \quad (4)$$

де  $\Delta T_d$  – підвищення температури внаслідок деформування;

$A$  – енергія, яка необхідна для деформування металу;

$G$  – маса полоси, що прокатується;

$c$  – середня питома теплоємність металу.

В роботі [10] для визначенні підвищення температури під час прокатки пропонується залежність

$$\Delta T_d = \frac{p_{cp} \times \ln \frac{h_0}{h_1}}{\gamma \times c}, \quad (5)$$

де  $p_{cp}$  – середній питомий тиск;

$h_0$  – товщина полоси до деформації;

$h_1$  – товщина полоси після деформації;

$\gamma$  – питома вага металу.

У роботі [11] підвищення температури обчислюють по залежності виду

$$\Delta T_d = \frac{\sigma_s \times \ln \frac{h_0}{h_1}}{427 \times \gamma \times c} \quad (6)$$

де  $\sigma_s$  – опір металу деформуванню;

427 – механічний еквівалент одиниці тепла.

Підвищення температури металу внаслідок пластичного деформування металу представлено у вигляді

$$\Delta T_d = \frac{q_v \times \Delta \tau}{c \rho} \quad (7)$$

де  $\rho$  – питома вага металу.

З рівнянь (6) та (7) з урахуванням того, що  $\gamma = \rho$  знаходимо  $q_v$

$$q_v = \frac{\sigma_s \times \ln \frac{h_0}{h_1} \times c \times \rho}{427 \times \gamma \times c \times \Delta \tau} \quad (8)$$

де –  $\Delta\tau$  час проходження однією точкою металу зони деформування, сек.

З урахуванням перевідного коефіцієнту (4,1868) для механічного еквіваленту одиниці тепла маємо

$$q_v = \frac{\sigma_s \times \ln \frac{h_0}{h_1}}{102 \times \Delta\tau} \times 10^6 \quad (9)$$

де  $10^6$  – коефіцієнт, що дозволяє підставляти значення  $\sigma_s$  в кг/мм<sup>2</sup>.

Відомо, що, при поділі тіла на 8–10 елементарних шарів, похибка дискретизації по простору при визначенні температури наближається до нуля.

Виконано рішення тестових задач моделювання теплового стану металу. Спочатку використовували рівномірні сітки з поділом товщини слябу на 10  $\Delta x$  та 100  $\Delta x$ . Отримані результати (при поділі на 100  $\Delta x$ ), використовували у якості базових для оцінки відхилень рішення у вузлах нерівномірної сітки (поділ слябу на 100  $\Delta x$ , кількість шарів 10), які співпадають по глибині слябу з вузлами рівномірної сітки. Важко очікувати глибини проникнення теплової хвилі в метал на 15 мм при поділі слябу товщиною 150 мм на 10 рівномірних шарів (10  $\Delta x$ ), за час контакту точки поверхні металу з валками 0,08 с.

Стандартний підхід (рівномірний поділ слябу на шари однакової товщини) може призвести до отримання хибних результатів. Внаслідок цього, необхідно застосувати поділ слябу сіткою з нерівномірними кроками по простору.

**Висновки.** 1. Встановлено, що для дослідження процесів теплообміну полоси і валків, а також валків з водою під час прокатки найбільш ефективним є метод математичного моделювання. Для рішення теплофізичних задач теплообміну системи «валок–полоса», що описуються рівняннями нестационарної теплопровідності, найбільш ефективним є вибраний метод кінцевих від’ємностей.

2. Отримані на основі рішення тестових задач моделювання теплового стану металу з використанням сітки з поділом товщини слябу на 10  $\Delta x$  та 100  $\Delta x$  результати використовували у якості базових для оцінки відхилень рішення у вузлах нерівномірної сітки (поділ слябу на 100  $\Delta x$ , кількість шарів 10), які співпадають по глибині слябу з вузлами рівномірної сітки.

3. Виконані розрахунки є основою для подальшого дослідження та вирішення нелінійних задач, що описуються рівняннями нестационарної теплопровідності, зокрема задач теплового стану системи «валок–полоса» при прокатці тонких полос.

**Список літератури:** 1. De Paere, Simon P., Moerkerke I., Hermann J.C. Control of the temperature of the bar on entry to the finisher // ECSC STEEL RTD PROGRAMME. – 2000. – P. 1–9. 2. Trishevskii O. I., Saltavets N. V. Mathematical model of the thermal state of strip in rolling // Steel in translation, 2009 – №2 – Vol 39 – P. 42–44. Allerton Press Inc. 3. Тришевский О. И., Салтавец Н. В. Разработка математической модели теплового состояния валков при прокатке // Сталь, 2011. – №12. – С. 22–23. 4. Коздоба Л. А. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса / М.: Энергия. – 1972. – 296 с. 5. Кузьмин М. П. Электрическое моделирование явлений нестационарных процессов теплообмена. / М.: Энергия. – 1974. – 416 с. 6. Турчак Л. И. Основы численных методов. Учебн. пособие. / М.: Наука. – 1987. – 320 с. 7. Целиков А. И., Гришков А. И. Теория прокатки. / М.: Metallurgiya. – 1979. – 358 с. 8. Коновалов Ю. В., Остапенко А. Л. Температурный режим широкополосных станов горячей прокатки. / М.: Metallurgiya. – 1974. – 176 с. 9. Гелеи Ш. Расчёты усилий и энергии при пластической деформации металла. / М.: Metallurgiya. – 1958. – 420 с. 10. Павельски О. // Чёрные металлы, 1969. – №21. С. 13–17. 11. Венцель Х. // Прокатка и прокатное оборудование. (ВИНИТИ. Экспресс-информация), 1965. -№27.- С. 8–43.

1. De Paere, Simon P., Moerkerke I., Hermann J.C. Control of the temperature of the bar on entry to the finisher // ECSC STEEL RTD PROGRAMME. – 2000. – P. 1–9. 2. Trishevskii O. I., Saltavets N. V. Mathematical model of the thermal state of strip in rolling // Steel in translation, 2009 – No 2 – Vol 39 – P. 42–44. Allerton Press Inc. 3. Trishevskiy O. I., Saltavets N. V. Razrabotka matematicheskoy modeli teplovogo sostoyaniya valkov pri prokatke // Stal, 2011. – No 12. – P. 22–23. 4. Kozdoba L. A. Elektricheskoe modelirovanie yavleniy teplo- i massopere nosa / Moscow: Energiya. – 1972. – 296 p. 5. Kuzmin M. P. Elektricheskoe modelirovanie yavleniy nestatsionarnykh protsessov teploobmena. / Moscow: Energiya. – 1974. – 416 p. 6. Turchak L. I. Osnovyi chislennykh metodov. Uchebn. posobie. / Moscow.: Nauka. – 1987. – 320 p. 7. Tselikov A. I., Grishkov A. I. Teoriya prokatki. / Moscow: Metallurgiya. – 1979. – 358 p. 8. Kononov Yu. V., Ostapenko A. L. Temperaturnyy rezhim shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki. / Moscow: Metallurgiya. – 1974. – 176 p. 9. Gelei Sh. RaschYoty i usiliy i energii pri plasticheskoy deformatsii metalla. / Moscow: Metallurgiya. – 1958. – 420 p. 10. Pavelski O. // ChYornyye metallyi, 1969. – No 21. P. 13–17. 11. Ventsel H. // Prokatka i prokatnoe oborudovanie. (VINIITI. Ekspress-informatsiya), 1965. – No 27. – P. 8–43.

Надійшла до редакції 05.04.2015 р.

УДК 621.7

**В. Л. ЧУХЛІБ**, канд. техн. наук, доц., НМетАУ;

**Є. С. КЛЕМЕШОВ**, аспірант, НМетАУ, Дніпропетровськ;

**В. О. ГРИНКЕВИЧ**, докт. техн. наук, проф., НМетАУ, Дніпропетровськ;

**Х. ДИЯ**, докт. техн. наук, проф., Політехніка Ченстоховська, Ченстохова, Польща

## **ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ПРОТЯЖЦІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КУВАННЯ**

Якість поковок повинна забезпечувати високі показники механічних властивостей. Тому метою даної статті є дослідження впливу характеристик параметрів процесу протяжки (схеми кантувань) на схему напружено-деформованого стану поковки (розподілення напруг та деформацій) з титанового сплаву за допомогою математичного моделювання. Результатом дослідження є залежності нерівномірності розподілення деформацій в металі. При порівнянні впливу сумарного ступеню деформації при куванні визначено, що оптимальним сумарним ступенем деформації є 10%.

**Ключові слова:** титан; сплав; міцність; якість; схема кантувань; розподілення напруг; розподілення деформацій

© В. Л. Чухліб, Є. С. Клемешов, В. О. Гринкевич, Х. Дия, 2015