

К. Е. Дьомічев, асистент

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна
demichevka@mail.ru

ПРО ДОСТОВІРНІСТЬ ТЕОРЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ДЕЯКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

Розглядається питання достовірності теоретичних розрахунків для деяких деталей машин, які працюють в умовах підвищених температур. Отримано рекурентні формули неявної схеми методу розщеплення для визначення температури, швидкостей переміщень, напруг і деформацій в довільній точці перерізу валка. Порівнюються результати теоретичних і практичних досліджень температурного поля валка за час контакту.

Ключові слова: температурні напруження, температурне поле, деталі машин.

Вступ. Прокатне виробництво займає в металургії особливе місце. Будучи завершальним в повному металургійному циклі, воно забезпечує своєю продукцією багатьох споживачів. Серед наявних резервів прокатного виробництва важливе значення має скорочення простоїв станів у зв'язку з перевалками, настройками і поломками деталей як основного, так і допоміжного обладнання.

Значна частка простоїв прокатних станів нині визначається якістю прокатних валків. Валок безпосередньо бере участь у деформації металу, отже, піддається інтенсивному зносу і руйнуванню від дії знакоперемінного навантаження, що виникло в процесі прокатки та температурного режиму.

Від стійкості прокатних валків, їх опору природному зносу, поломок залежить коефіцієнт використання прокатного стану і всього допоміжного обладнання. Особливістю роботи валків станів гарячої прокатки є періодичність їх нагріву від прокатного металу і охолодження водою. У процесі нагрівання та охолодження в поверхневому шарі валків виникає змінне температурне поле, під дією якого з'являються значні циклічні температурні напруги. Величина цих напруг, залежно від режимів роботи прокатного стану, може значною мірою перевищувати межу плинності матеріалу і бути основною причиною виникнення сітки розпалу і подальшої термічної втоми [1; 2].

Наведемо деякі приклади виходу з ладу валків [2].

1. Сортопрокатний стан 350, кліть 1У. Валок вийшов із ладу через злом лопаток в

обох валках. За час роботи валок прокатав 110893,0 т металу, три рази піддавався переточуванню і на четвертій установці вийшов з ладу.

2. Рейкобалковий, кліть чистова. Валок вийшов з ладу через утворення тріщини на 8-му калібрі. За час роботи валок прокатав 19315,0 тонн металу, два рази піддавався переточуванню і на третій установці вийшов з ладу.

3. Рейкобалковий, кліть чистова. Валок вийшов з ладу через дефект в металі. За час роботи валок прокатав 13913,0 т металу, чотири рази піддавався переточуванню і на п'ятій установці вийшов з ладу.

4. Універсальний стан. Валок вийшов з ладу через знос. За час роботи валок прокатав 25940,0 тонн металу, сім раз піддавався переточуванню і на восьмій установці вийшов з ладу.

5. Універсальний стан. Валок зламаний по бочці. За час роботи валок прокатав 3710,0 тонн металу, один раз піддавався переточуванню і на другій установці вийшов з ладу.

6. ТЗС, кліть 900. Валок зламаний по першому калібру. За час роботи валок прокатав 193137,7 тонн металу, чотири рази піддавався переточуванню і на п'ятій установці вийшов із ладу.

7. ТЗС, кліть 900. Валок зламаний по третьому калібру. За час роботи валок прокатав 173322,4 тонн металу, шість разів піддавався перешліфовці і на сьомій установці вийшов з ладу. Більш схильні до руйнувань від розгарних тріщин валки, метал яких відрізня-

ється високим коефіцієнтом теплового розширення та малою теплопровідністю. До таких відносяться, в першу чергу, литі валки, а потім ковани. Більш зносостійкими є валки зі сталі 50ХН, 60ХН, 60ХГ. Валки з цих сталей меншою мірою схильні до розгарних тріщин.

Особлива вимога висувається до матеріалів валків, які працюють в дуже важких умовах. Так, матеріали валків обтискові і сортопрокатні станів повинні володіти високою міцністю і жаростійкістю, тому що ці стани працюють в умовах підвищених динамічних ударів. Найбільш небезпечним видом виходу валків з ладу є поломки, особливо, в зонах тріфів, лопастей, шийок і по калібрах бочок. Вихід з ладу валків по втомним руйнуванням є типовим для кованих і литих сталевих валків, що пропрацювали значний час. Руйнування від втоми металу, що виникає в процесі роботи, в першу чергу, настає на валках, що зазнають значних змінних напруг від періодичних динамічних навантажень.

Метою роботи є застосування методу покомпонентного розщеплення, отримання рекурентних формул неявної схеми для визначення температури, швидкостей переміщень, напруг і деформацій та порівняння теоретичних результатів з експериментальними.

Метод розв'язання. У роботах [3–4] вирішено ряд нестационарних задач механіки деформованого твердого тіла, де застосовувалися фізичні співвідношення теорії термопружно-пластичності, що дозволяють описувати прості і близькі до простих процеси деформування.

Одним з найбільш ефективних прийомів при чисельному розв'язанні просторових нестационарних задач теорії термопружно-пластичності є підхід, який дозволяє звести розв'язання тривимірної нестационарної задачі термопружно-пластичності до послідовного розв'язання системи з трьох одновимірних задач, метод дробових кроків або метод покомпонентного розщеплення в поєднанні з поданням невідомих величин у вигляді сплайн-функцій [3].

Для порівняння результатів розглянемо кінцево-різницевої підхід до вирішення нестационарної двовірної задачі теорії термопружно-пластичності і нестационарного рівняння теплопровідності. Введемо в розгляд

сітку за часом ω_r і сітку за координатами ω_h

$$\omega_r = \left\{ \begin{array}{l} t_p; t_{p+1} = t_p + \tau; \\ t_0 = 0; p = 0, 1, 2, \dots \end{array} \right\}, \quad (1)$$

$$\omega_h = \left\{ \begin{array}{l} r_i, \phi_j, x_k; r_{i+1} = r_i + h_1; \\ \phi_{j+1} = \phi_j + h_\phi; x_{k+1} = x_k + h_3; \\ i = 0, 1, \dots, N_1; j = 0, 1, \dots, N_2; \\ k = 0, 1, \dots, N_3. \end{array} \right\}. \quad (2)$$

Неявна різницева схема для визначення нестационарного поля температур в довільному вузлі r_i, ϕ_j, x_k має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{T^{p+1/3} - T^p}{\tau} = & \frac{a}{h_1^2} \left[\alpha \left(\mu_1(T^{p+1}) + \frac{h_1}{r_i} \lambda_1(T^{p+1}) \right) + \right. \\ & \left. + \beta \left(\mu_1(T^p) + \frac{h_1}{r_i} \lambda_1(T^p) \right) \right] + \\ & + \frac{a}{r_i^2 h_\phi^2} \left[\alpha \mu_2(T^{p+1}) + \beta \mu_2(T^p) \right] + \\ & + \frac{a}{h_3^2} \left[\alpha \mu_3(T^{p+1}) + \beta \mu_3(T^p) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

де $\alpha + \beta = 1$, λ_n, μ_n ($n = 1, 2, 3$) – різницеві оператори, що апроксимують похідні відповідно першого і другого порядку за координатами [3; 4].

Для явної схеми ($\alpha = 0, \beta = 1$) на підставі (3) знаходимо

$$T^{p+1} = T^p + \tau a \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{h_1^2} \left(\mu_1(T^p) + \frac{h_1}{r_i} \lambda_1(T^p) \right) + \\ + \frac{\mu_2(T^p)}{r_i^2 h_\phi^2} + \frac{\mu_3(T^p)}{h_3^2} \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Теоретичні дослідження температури і температурних напружень. Довговічність валків станів гарячої прокатки залежить від величини і характеру їх навантажування. Однак, поряд з указаними факторами, значний вплив на довговічність роблять температурні умови роботи валків.

Ступінь нагріву валків у процесі прокатки залежить від величини обтиснення, механічних властивостей прокатуваного металу, тертя в осередку деформації, швидкості і часу процесу прокатки, подачі охолоджуваної емульсії, коефіцієнтів теплопровідності, конвекції і т.д.

Ступінь нагрівання валків впливає на їх профіль і, отже, впливає на умови деформації металу як по довжині, так і по ширині смуги.

У зв'язку з розвитком безперервних станів і тенденцією зростання швидкостей прокатки тепловий баланс і температурний режим роботи валків мають особливо важливе значення.

Особливістю роботи валків станів гарячої прокатки є періодичність їх нагріву від металу, що прокачується, та охолодження водою. В процесі нагрівання й охолодження в поверхневому шарі валків виникає змінне температурне поле, під дією якого з'являються значні циклічні температурні напруги.

Величина цих напружень, залежно від режимів роботи прокатного стану, може значною мірою перевищувати межу плинності матеріалу і бути основною причиною виникнення сітки розпалу і наступної термічної втоми.

При гарячій прокатці найбільше термонапруження на поверхню валка – в зоні контакту в металі, що прокочується. Однак в цій зоні матеріал знаходиться в умовах всебічного стиснення, а в таких випадках допустимі напруження практично в чотири рази можуть перевищувати межу плинності матеріалу.

В результаті теоретичних досліджень були отримані рівняння для визначення температурних напружень у довільній точці перерізу валка [1].

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} \frac{2g\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi c\lambda\gamma}} \left\{ F\left(\frac{R}{2\sqrt{a\tau}}\right) \left[\frac{2a\tau}{R^2} + \frac{1}{3} \right] - \right. \quad (5)$$

$$\left. - F\left(\frac{R-r}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \frac{2a\tau}{3R^2} \right\} * e^{-\frac{R^2}{4a\tau}} + \left[\frac{\sqrt{\pi}\sqrt{a\tau}}{3R^2} \right]$$

$$\sigma_r = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} \frac{2g\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi c\lambda\gamma}} \left\{ F\left(\frac{R-r}{2\sqrt{a\tau}}\right) \left[\frac{(R-r)R}{2r^2} + \frac{(R-r)^2}{3r^2} - 1 + \frac{a\tau R}{r^2(R-r)} \right] + \right. \quad (6)$$

$$\left. + \frac{a\tau}{r^2} e^{-\frac{(R-r)^2}{3r^2}} \left(\frac{2}{3} - \frac{R}{R-r} \right) + \left(\frac{\sqrt{\pi}\sqrt{a\tau}}{2R} - \frac{2a\tau}{3R^2} \right) \right\}$$

$$\sigma_r = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} \frac{2g\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi c\lambda\gamma}} \left\{ F\left(\frac{R-r}{2\sqrt{a\tau}}\right) \left[\frac{(R-r)R}{2r^2} + \frac{(R-r)^2}{3r^2} + \frac{a\tau R}{r^2(R-r)} \right] + \right. \quad (7)$$

$$\left. + \frac{a\tau}{r^2} e^{-\frac{(R-r)^2}{3r^2}} \left(\frac{2}{3} - \frac{R}{R-r} \right) + \left(\frac{\sqrt{\pi}\sqrt{a\tau}}{2r} - \frac{3a\tau}{3R^2} \right) \right\}$$

де $\sigma_z, \sigma_t, \sigma_r$ – відповідно осьова, окружна і радіальна нормальні напруги.

За отриманими рівняннями (5)–(7) були визначені межі напруження в поверхневому шарі валка блюмінга. Максимальні температурні напруги в поверхневому шарі валка спостерігаються при найбільш тривалому часі контакту з розігрітим металом. При цьому температура поверхні валка в місці контакту досягає 450°C. При сталому режимі прокатки температура поверхні валка не перевищує 300°C. Результати розрахунків приведені на рис. 1. Показано розподіл температури по радіусу в торці валка блюмінга для фіксованих моментів часу. Суцільні лінії одержані за допомогою методу покомпонентного розщеплення підвищеної точності [2; 4], а пунктирні – аналітичним методом [1].

Висновки. Порівняння експериментальних результатів з аналогічними результатами, отриманими за допомогою методу покомпонентного розщеплення підвищеної точності, показало збіжність результатів (розбіжність по температурі до 3,5%) в околі середини валка, а в міру наближення до краю, де стан є свідомо неодномірним по осевій і радіальній координаті, результати істотно відрізняються. В околі краю валка, для розрахунків температурного напружено-деформованого стану доцільно застосовувати метод покомпонентного розщеплення підвищеної точності, оскільки він дає більш точні результати у вузлах просторової сітки, ніж звичайно-різницевий метод.

Отримано рекурентні формули неявної схеми методу розщеплення для визначення температури, швидкостей переміщень, напруг і деформацій, які дають, відповідно третій і четвертий порядок апроксимації методу за координатами.

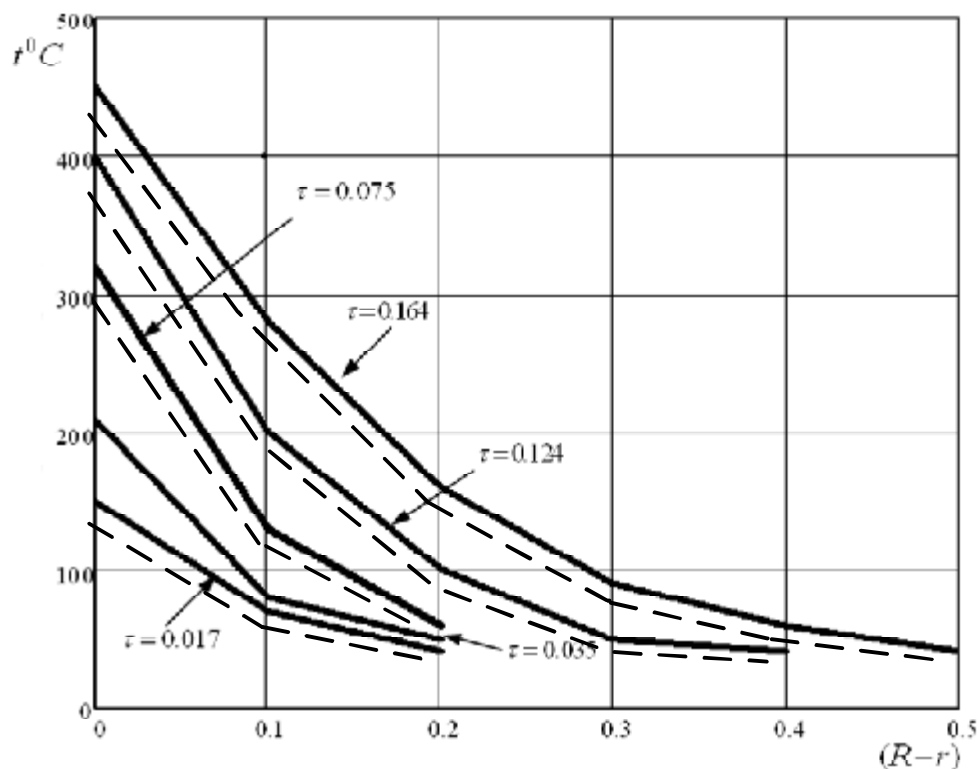


Рис. 1. Графік зміни температурного поля валка за час контакту

Список літератури

1. Боли Б. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Д. Уэйнер. – М.: Мир, 1964. – 517 с.
2. Волосова Н. Н. Сопоставление методов расчета нестационарного термоупруго-пластического состояния на примере некоторых деталей металлургического оборудования / Н. Н. Волосова, В. И. Сарандачев, П. А. Стебляно // Современные проблемы металлургии. – Днепропетровск, 2007. – С. 154–163.
3. Стебляно П. А. Методы расщепления в пространственных задачах теории пластичности / П. А. Стебляно. – К.: Наукова думка, 1998. – 304 с.
4. Стебляно П. А. Застосування методу дробових кроків для визначення поля напруження та деформації при температурному навантаженні циліндричних тіл / П. А. Стебляно, Н. Н. Волосова, К. Е. Дьомічев // Математичні проблеми технічної механіки : зб. наук. праць Дніпродзерж. держ. техн. ун-ту. Тематичний випуск. – Вип. 2 (19). – Дніпродзержинськ, 2012. – С. 78–85.

References

1. Boli, B. and Ueiner, D. (1964) Theory of thermal stresses. Moscow: Mir, 517 p. [in Russian].
2. Volosova, N. N., Sarandachev, V. I. and Steblyanko, P. A. (2007) Comparison of methods for the calculation of non-stationary thermoelastic-plastic state by the example of some of the details of metallurgical equipment. *Sovremennye problemy metallurgii*. Dnepropetrovsk, pp. 154–163 [in Russian].
3. Steblyanko, P. A. (1998) Splitting methods in spatial problems of the theory of plasticity. Kiev: Naukova dumka, 304 p. [in Russian].
4. Steblyanko, P. A., Volosova, N. N. and D'omichev, K. E (2012) Application of fractional steps method to determine stress and strain fields at temperature load of cylindrical bodies. *Matematychni problemy texnichnoyi mexaniky*: collection of scient. works of Dneprodzerzhynsk State Technical University. Thematic issue, 2 (19). Dneprodzerzhynsk, pp. 78–85 [in Ukrainian].

K. E. D'omichev, *assistant*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
demichev@mail.ru

**ON THE RELIABILITY OF THEORETICAL CALCULATIONS FOR SOME
MACHINE ELEMENTS WORKING AT ELEVATED TEMPERATURES**

The problem of reliability of theoretical calculations for some machine elements operating at elevated temperatures is considered. In particular, thermal load of the roll mill on the stability, resistance, natural wear and tear, damage depends on the utilization of the rolling mill and all accessories. A peculiarity of the work of rolls hot rolling mills is their frequency heating of metal rolling and cooling water. In the process of heating and cooling in the surface layer temperature of rolls there is an alternating field at which there is significant influence of cyclic thermal stresses. The magnitude of these stresses, depending on operating modes of the rolling mill can greatly exceed the yield strength of the material and to be the main cause of the grid height and subsequent thermal fatigue. An approach that allows to reduce the solution of three-dimensional nonstationary problem of thermoelastic-plasticity to successive solution of a system of three one-dimensional problems, the method of fractional steps or the method of component-wise splitting in combination with the representation of unknown quantities in the form of spline-functions is one of the most effective methods for numerical solution of spatial non-stationary problems of the theory of thermoelastic-plasticity. The result is a comparison of theoretical and experimental researches of the roll mill at high temperatures.

Keywords: *thermal loads, temperature field, machine elements.*

*Рецензенти: Ю. О. Ляшенко, д.ф.-м.н., професор,
В. М. Рудницький, д.т.н., професор*