

УДК 670.191.33

**П. Марущак, докт. техн. наук; Г. Габрусєв, канд. фіз.-мат. наук;
Д. Баран; Р. Біщак; Ю. Готович**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО ТЕРМОЦИКУВАННЯ РОЛИКА МБЛЗ НА МАЛОГАБАРИТНОМУ АВТОМАТИЗОВАНОМУ СТЕНДІ

Резюме. Розроблено автоматизовану фізичну модель ролика МБЛЗ із внутрішнім та зовнішнім охолодженням. Досліджено вплив короткотермінової зупинки лиття на зміну температурного поля, несиметричного відносно осей ролика. Проведено порівняння параметрів модельного й експлуатаційного температурного циклу роликів МБЛЗ.

Ключові слова: температурне поле, фізичне моделювання, ролик МБЛЗ, термовтома.

P. Maruschak, H. Habrusev, D. Baran, R. Bishchak. Yu. Gotovych

MODELING OF THE IN-SERVICE THERMAL CYCLING OF THE ROLL FOR CONTINUOUS CASTING MACHINE BY THE AUTOMATED STAND

The summary. A new automated model of continuous caster roll was developed. The effect of short-stop molding to the changes of temperature fields roll caster was investigated. A comparison of the parameters of the model and industrial temperature cycle of caster rolls was done.

Key words: temperature field, physical simulation, continuous caster roll, thermal fatigue.

Вступ. Відомо, що ролики є основним тримким вузлом слябової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Вони експлуатуються за умов термомеханічного навантажування, яке спричиняє структурні зміни та деградацію міцнісних властивостей матеріалу [1,2]. Оскільки швидкість безперервного лиття становить близько 1,0 м/хв, відбувається нагрівання поверхні ролика у зоні контакту зі слябом та його охолодження у нижній частині [3]. Це зумовлює процеси термовтоми матеріалу, проте дозволяє уникнути перегріву та пластичного прогину ролика, який може спричинити деформування слябу, «жування» його поверхні та зниження якості заготовки [1].

За тривалого термоциклічного навантаження на поверхні ролика утворюється сітка множинних дефектів, вплив яких на довговічність ролика є неоднозначним. Зокрема, на початковому етапі виникнення вони спричиняють релаксацію напружень і збільшують площу теплообміну. Проте за умови виділення з їх сукупності магістрального дефекту можливе непрогнозоване руйнування ролика [4].

Аналіз останніх досліджень. Відомий ряд праць, у яких досліджено температурні поля у ролику МБЛЗ за експлуатаційних умов, аналітичними та чисельними методами [5–7]. Хоча усталені режими роботи роликів МБЛЗ є досить добре вивченими, важливим є проведення досліджень температурних полів у ролику МБЛЗ під час зупинок і зниження швидкості лиття.

Метою даної роботи є розроблення та апробація методики фізичного моделювання роботи роликів МБЛЗ.

Експлуатаційні умови роликів МБЛЗ. Розглянемо переріз ролика МБЛЗ, рис. 1а. Поверхневі шари ролика (т. I) експлуатуються за циклічної зміни температури (рис. 1а). Внутрішні шари матеріалу ролика МБЛЗ (т. II) працюють за умов ізотермічного

високотемпературного навантаження (див. рис. 1а), а поблизу охолоджувального отвору (т. III) температура внутрішньої поверхні ролика не перевищує 60 °С [1, 2].

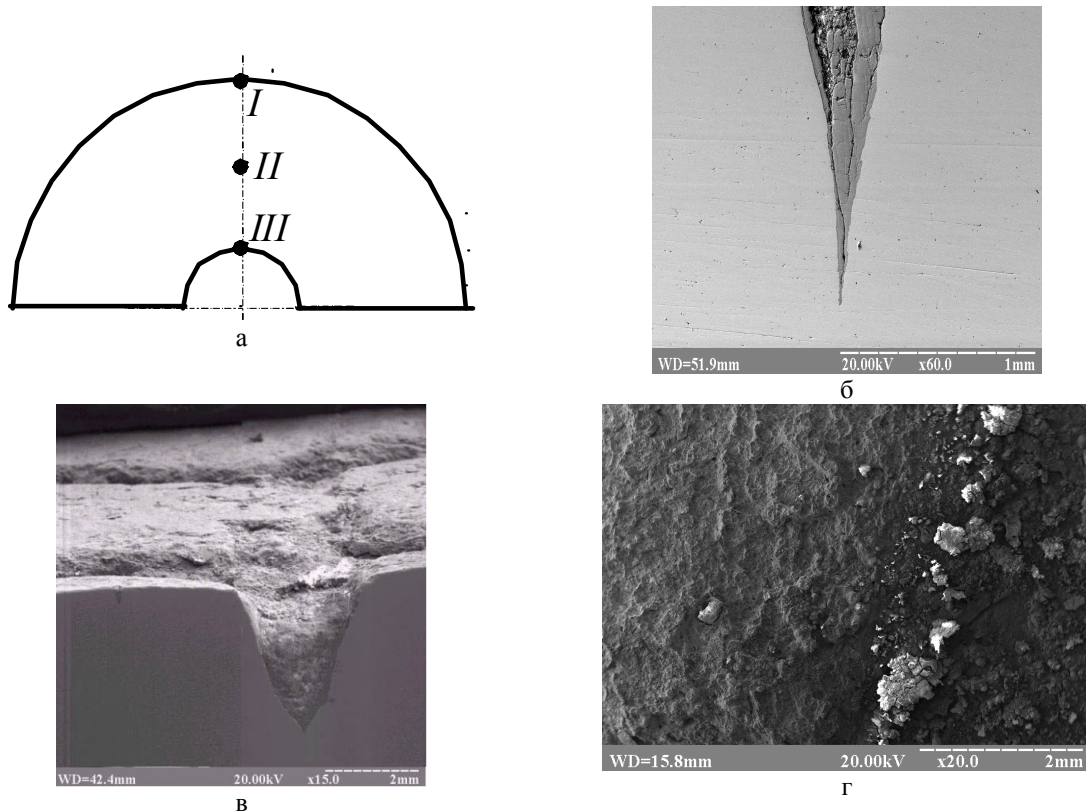


Рисунок 1. Схема розподілу температури (I – зона термоциклічного навантаження ($t_1 = 375 \dots 600$ °С); II – зона ізотермічного навантаження ($t_2 = 200 \dots 375$ °С); III – зона охолодження ($t_3 = 40 \dots 60$ °С)) у ролик МБЛЗ при експлуатації (а), приповерхнева тріщина (б), вершина тріщини термовтоми (в), поверхня тріщини термовтоми (г)

За даними макроаналізу поверхні роликів знятих з експлуатації на Маріупольському металургійному комбінаті ім. Ілліча та МК «Азовсталь», на поверхні ролика виявлено сітку розпалу, що утворилась унаслідок багаторазово повторюваних циклів інтенсивного нагріву й охолодження поверхневих шарів. Тріщини, орієнтовані в осьовій площині, мають напівкруглу форму, що зумовлено їх підростанням у сформованій сітці радіальних дефектів. Поверхня ролика вкрита шаром окалини, яка утворилась унаслідок контакту зі слябовою заготовкою (рис. 1б) [2]. Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що зародження поверхневих дефектів відбулось унаслідок термовтоми, а їх підростання та коалесценція спричинена комплексним впливом термічної та механічної складових.

Розроблена установка. З метою моделювання експлуатаційного термоциклування поверхневих шарів ролика МБЛЗ (рис. 2), модель ролика виконано у вигляді порожнистого товстостінного циліндра зі сталі 25Х1М1Ф довжиною 200 мм, діаметром 60 мм. Охолоджувальний отвір діаметром 12 мм виконано вздовж осі ролика.

Модельний ролик закріплювали на валу із поздовжнім отвором, встановленим в опорах ковзання, через який прокачували проточну воду. Низькошвидкісне обертання ролика від синхронного двигуна з редуктором типу ЦД-54 здійснювали через знижуючу клинопасову передачу. Частота обертання ролика становила 0,01 Гц, що приблизно відповідає експлуатаційним умовам [1, 8, 9].

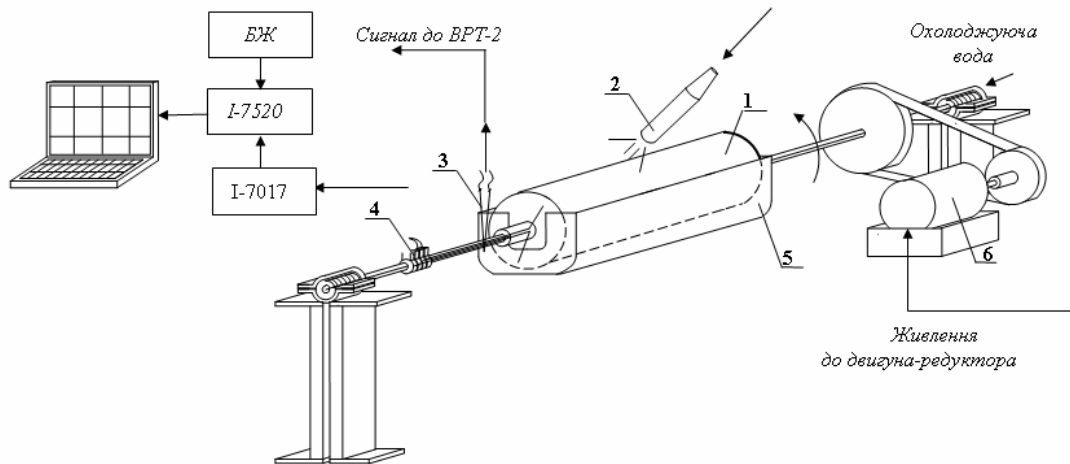


Рисунок 2. Схема установки для випробувань моделей роликів у нестационарному температурному полі:
 1 – ролик; 2 – газовий пальник; 3 – хромель-алюмелеві термопари; 4 – порожнистий вал, 5 – охолоджувальна ємність; 6 – мотор-редуктор

Система нагрівання й охолодження ролика. Робочу температуру поверхні ролика задавали нагріванням газовим пальником. Записували покази хромель-алюмелевих термопар, встановлених на відстані ($h = 0; 5,0; 15,0$ мм) від поверхні ролика. Температуру контролювали візуально, за показниками цифрового вольтметра. Охолодження ролика здійснювали зануренням нижньої частини ролика в ємність з проточною холодною водою, рис. 2.

Система запису даних. Термопари для вимірювання температурних полів закріплювали в тілі ролика. Сигнал з термопар через модулі I-7016 передавався на модуль I-7017F, який є 8-канальним модулем АЦП (до 10 вим./сек). Інтерфейсний модуль I-7520 з'єднував систему запису даних з ПК. Окремий блок забезпечував живлення модулів системи ($U = 24$ В, $I = 1,5$ А).

Випробування ролика і деякі результати. Оскільки довжина моделі ролика в 3,3 раза більша за його діаметр, вимірювання температурних полів проводили в його центральній частині. При цьому не враховували зміну температури вздовж осі ролика, розглядаючи плоску задачу в окремо взятому поперечному перерізі [10].

Моделювали зупинку процесу розливання за 1,0 хвилину, рис. 3. Виявлено, що після запуску розігрітого до квазістаціонарного стану ролика відбувається незначне зниження температури циклу з її подальшою стабілізацією протягом 4–5 обертів. У цілому дані експерименту ($t_{max} = 600$ °С, $t_{min} = 90$ °С) близькі до експлуатаційних ($t_{max} = 580$ °С, $t_{min} = 130$ °С). Побудовано графіки залежності осесиметричної складової температурного поля ролика від часу обертання, рис. 4.

Найбільше значення температури (600 °С) на зовнішній поверхні ролика досягається в максимальній точці циклу при контакті з джерелом нагрівання, мінімальне – при охолодженні в ємності (90 °С). Унаслідок інтенсивного тепловідведення з внутрішніх шарів, температура в нижній точці циклу залишається стабільною протягом 35 сек. Аналіз результатів досліджень (рис. 3а, б) показує, що при збільшенні кута контакту ролика з джерелом нагрівання, час переходу ролика на сталий режим зменшується. Це пов'язано з більш рівномірним і швидким прогріванням моделі ролика. Слід зазначити, що зупинка ролика спричиняє підвищення температури у приповерхневих шарах, при цьому розмах термоциклу наближається до значень, отриманих на поверхні, рис. 3б.

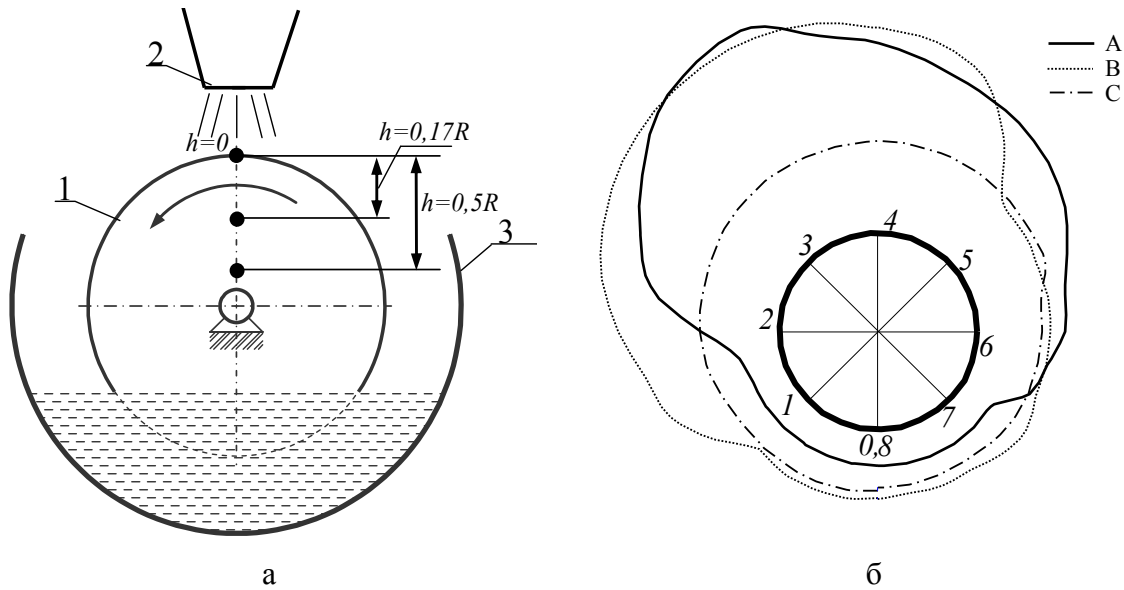


Рисунок 3. Схема термоцикування (а): ролик – 1, газовий пальник – 2, водоохолоджуюча ємність – 3 та температурні поля в боці ролика (б): на відстанях $h=0$; 5,0; 15,0 мм (А, В,С) відповідно, від робочої поверхні, після зупинки протягом 5,0 хвилин

Обертання ролика спричиняє виникнення періодичної та неперіодичної складової температурного поля, рис. 3б. Неперіодична складова поля температур виникає лише за перехідних режимів. Періодична складова притаманна технологічному процесу, і локалізується у поверхневому шарі. За дослідженого квазістаціонарного режиму існує активна зона з періодичною зміною температури та осесиметричне ядро, що є практично незмінним протягом одного оберту [9, 10].

Таблиця 1. Параметри температурного поля у модельному ролику МБЛЗ

Точка вимірювання	Розподіл температур (t) по радіусу ролика, °C		
	R	$0,17R$	$0,5R$
0	92	174	156
1	92	176	164
2	198	407	200
3	538	547	224
4	485	523	234
5	357	200	219
6	221	186	163
7	94	190	151

Візуалізація термоциклу (рис. 4а) дозволяє оцінити зміну його форми. Для поверхні характерний «гострий» термоцикл трикутної форми, зі збільшенням відстані від поверхні він набуває «згладженої» форми. Максимальний розмах термоциклу спостерігали на поверхні моделі. Зі зменшенням значення R розмах термоциклу зменшується (рис. 4б), зменшення розмаху термоциклу у внутрішніх шарах ролика МБЛЗ спричинене зниженням інтенсивності тепловідведення та переходом до квазістаціонарного температурного поля.

Отримані результати задовільно узгоджуються з експлуатаційними даними, отриманими на промислових слябових МБЛЗ [2].

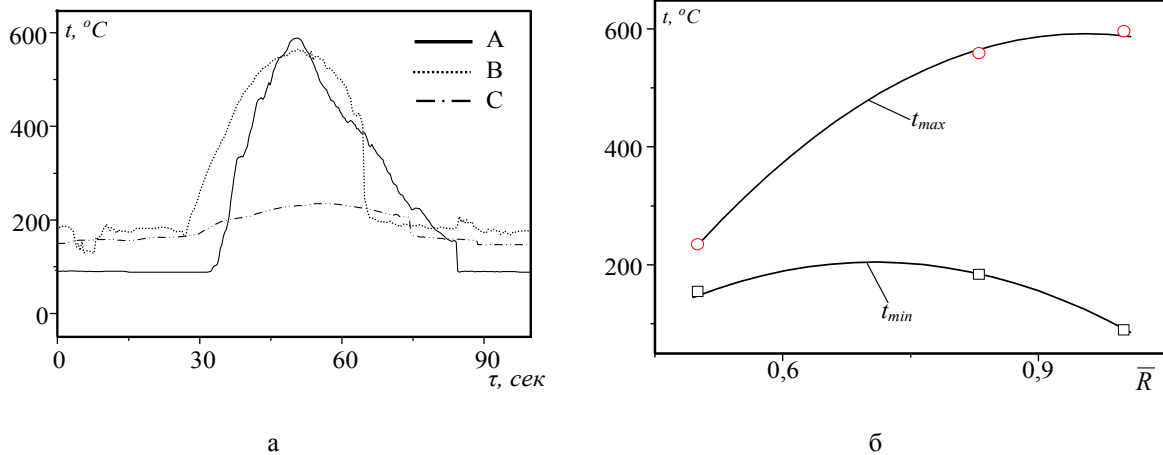


Рисунок 4. Термоцикли у бочці модельного ролика на різних відстанях від поверхні (а) та максимальні й мінімальні температури термоциклу (б), позн. див на рис. 3

Знаючи коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 13,82$ сталі 25Х1М1Ф, можна визначити розмах деформації ($\Delta\varepsilon$) у точках нагрівання

$$\Delta\varepsilon = \alpha\Delta T.$$

Отримаємо $\Delta\varepsilon = 0,51\%$ та $\Delta\varepsilon = 0,70\%$ відповідно.

Кубічна сплайн-інтерполяція температурного поля. Для побудови функції розподілу температури у ролику $F(x, y)$ застосовано інтерполяцію кубічними сплайнами. Область визначення $[a, b]$ розбивали на невеликі відрізки довжиною h , на кожному з яких функцію задавали поліномом третього порядку. Коефіцієнти полінома підбирали таким чином, щоб виконувались певні умови: неперервності самої функції, її першої та другої похідних і проходження через задані точки (вузли інтерполяції).

Використовуючи цей принцип, побудовано вісім функцій $f_i(\rho)$, $i = \overline{0,7}$, які визначають температуру вздовж променя зі сталим кутом відносно осі OX . Положення точки вимірювання 6 (рис. 3б) відповідає куту $\phi = 0$, $5 - \phi = \frac{\pi}{4}$, $4 - \phi = \frac{\pi}{2}$, $3 - \phi = \frac{3\pi}{4}$, $2 - \phi = \pi$, $1 - \phi = \frac{5\pi}{4}$, $0 - \phi = \frac{3\pi}{2}$, $7 - \phi = \frac{7\pi}{4}$. У якості вузлів використано дані таблиці 1.

Оскільки значення похідних на межі області визначення невідомі, задавали так звані природні граничні умови $f''(a) = 0$, $f''(b) = 0$, тобто побудовано природний сплайн. Похибка інтерполяції в такому випадку становить $O(h^2)$. Максимум похибки спостерігали в околах граничних вузлів, у внутрішніх вузлах точність інтерполяції значно вища.

Функції $f_i(\rho)$, $i = \overline{0,7}$ дозволили збільшити кількість вузлів до 81. Застосувавши двовимірну сплайн-інтерполяцію, отримано функцію $F(\phi, \rho)$, що описує розподіл температури у ролику в циліндричних координатах (рис. 5а). Використавши зв'язок між полярними та прямокутними декартовими координатами, остаточно отримано функцію розподілу температури у ролику $F(x, y)$, карту ліній рівня якої зображено на рисунку 5б.

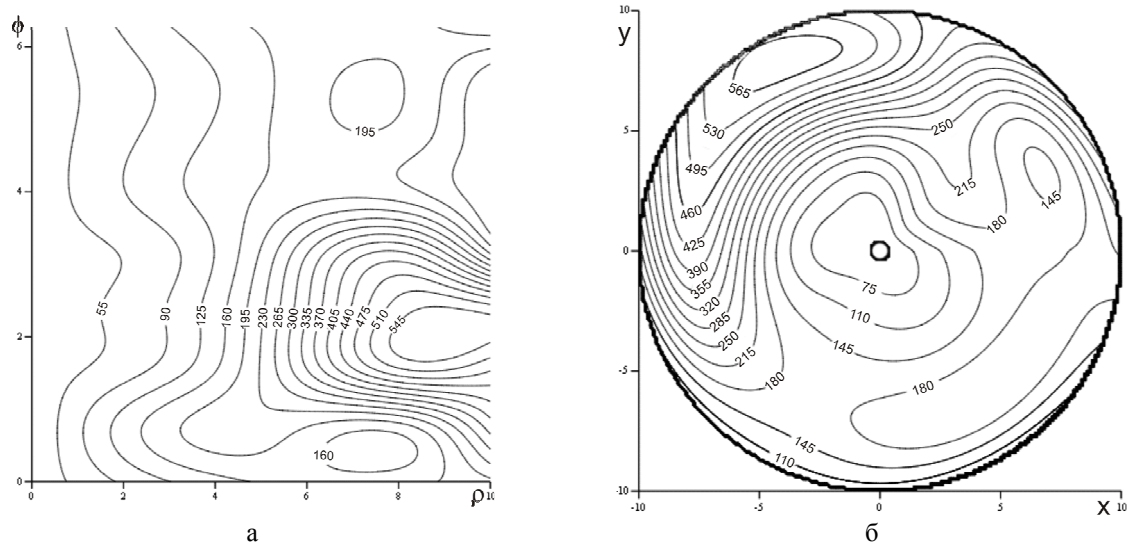


Рисунок 5. Функція розподілу температури у ролику в циліндричній (а) та прямокутній декартовій системі координат (б)

Висновки. Розроблено нову фізичну модель ролика МБЛЗ, яка дозволяє досліджувати вплив зупинок лиття на зміни температурних полів ролика на різних відстанях від поверхні. Порівняння модельного й експлуатаційного температурного циклу в ролику МБЛЗ показало задовільне узгодження. Отримані дані являють теоретичний інтерес при аналізі теплофізичних властивостей матеріалів роликів, при оцінюванні термонапружень бочки ролика МБЛЗ.

Роботу фінансовано Державним агентством з питань науки, інновацій та інформатизації України.

Література

1. Деградація поверхні ролика МБЛЗ під час експлуатації [Текст] / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Д.Я. Баран, В.В. Шишкін // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – Том 11. – №3. – С.10–16.
2. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет [Текст] / Л.В. Буланов, Л.Г. Корзунин, Е.П. Парфенов и др. / Издательство: Уральский центр ПР и рекламы "Марат". – 2004. – 349с.
3. Калініченко, В. Вплив експлуатаційних факторів на напружено-деформований та граничний стан роликів машин безперервного лиття заготовок [Текст] / В. Калініченко, Н. Гопкало // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2010. – Том 15. – № 1. – С. 41–51.
4. Оценка конструкционной прочности роликов зоны вторичного охлаждения МНЛЗ [Текст] / Л.А. Шапран, Л.Х. Иванова, А.Ю. Хитько, А.Д. Копылов // Системные технологии. – 2009. – №4(63). – С. 76–82.
5. Казакиявичус, Г.А. Некоторые вопросы термостойкости сплошного цилиндра [Текст] / К.А. Казакиявичус, Г.А. Пранцявичус // Проблемы прочности. – 1972. – №6. – С 61–64.
6. Jinu, G.R. Failure analysis on T 92 steel tube and compared with predicted number of cycles to failure using Coffin-Manson equation / G.R. Jinu, P. Sathiya // Int. Journ. of Eng. Sci. and Tech. – 2010. – Vol. 2(10). – P. 5017–5033.
7. Методика дослідження температурних полів модельного ролика машини безперервного лиття заготовок [Текст] / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Р.Т. Бищак, Д.Я. Баран // Тез. допов. III Міжн. науково-техн. конф. "Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні" (29–31 травня). – 2007. – К.: ІПМіц. ім. Г.С. Писаренка НАН України. – С. 219–220.
8. Wei, Ji Mathematical modeling of temperature field in continuous casting rolls for design optimization of internal cooling system / Ji Wei, Li Jin, Li Fu-Shuai // Num. Heat Transfer, Part A: Applications: An Int. Journ. of Comp. and Method. – 2009. – Vol. 56. – P. 269 – 285.
9. Телин, Н.В. Динамика осесимметрического температурного поля ролика МНЛЗ [Текст] / Н.В. Телин, Н.И. Шестаков: Мат-лы IV межд. научно-техн. конф., посв. 120-летию И.П. Бардина. – Череповец, 2003. – С. 146–148.
10. Тимошпольский, В.И. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии [Текст] / В.И. Тимошпольский, Ю.С. Постольник, Д.Н. Адрианов. – Мн.: «Бел. наука», 2005. – 560 с.