

**П. Ясній¹, докт. техн. наук; П. Марущак¹, канд. техн. наук;
Д. Баран¹; В. Шишкін², канд. техн. наук**

ДЕГРАДАЦІЯ ПОВЕРХНІ РОЛИКА МБЛЗ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

¹Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя
²Приазовський державний технічний університет

Досліджено пошкоджувальність матеріалу ролика МБЛЗ під час експлуатації, зокрема топографію поверхневих тріщин, проведено їх статистичний аналіз. За результатами вимірювання мікротвердості оцінено структурну деградацію матеріалу в залежності від віддалі до поверхні ролика.

P. Yasniy; P. Maruschak; D. Baran; V. Shyshkin

DEGRADATION OF CONTINUOUS CASTING MACHINE ROLL SURFACE DURING OPERATION

The deterioration of a material of a continuous casting machine roller in operation time is investigated, topography of superficial cracks, their statistical analysis is carried out. Have estimated structural deterioration of a material caused in operation by conditions depending on distance up to a surface of a roller.

Ролики машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) працюють за умов циклічного термомеханічного навантажування, що приводить до деградації та термічного розтріскування їх робочої поверхні.

На даний час на підприємствах значне розповсюдження отримала технологія відновлення та повторного використання роликів, знятих з експлуатації, шляхом обточування пошкодженого шару та ремонтного наплавлення [1-4].

Ремонт роликів виконують методом одношарового або багатшарового наплавлення порошковими дротами з метою одержання на поверхні хромистого металу із вмістом хрому 13...18% [1,2,4]. Існують також методи відновлювального наплавлення роликів без повного сточування тріщин, лише із використанням певних видів термообробки, що приводить до їх затуплення [3].

Однак ефективне використання раніше наведених конструкторських рішень можливе лише при ретельному аналізі геометрії, взаємного розміщення та густини мікротріщин на поверхні ролика, аналізу пошкоджуваності металу на різній глибині ролика [4].

Стаття присвячена оцінці пошкоджуваності матеріалу ролика МБЛЗ під час експлуатації, зокрема, досліджується топологія поверхневих тріщин та їх статистичний аналіз, твердість та мікротвердість матеріалу, на основі яких робиться висновок про структурну деградацію матеріалу.

Методика аналізу поверхні ролика

Досліджували геометрію тріщин, що утворилися упродовж експлуатації в поверхневому шарі суцільнокованого ролика з сталі 25Х1М1Ф, виготовленого на ВАТ "ММК ім. Ілліча". Термообробка ролика: відпал за температури 920 °С, кування, ПФВ та нормалізація при 950-980 °С, з відпуском при 650 °С. Остаточне зміцнення поверхні досягається гартуванням із наступним відпуском при 650 °С. Після вказаної термообробки сталь 25Х1М1Ф має наступні механічні властивості: $\sigma_{02}=750...760$ МПа, $\sigma_B=850...870$ МПа, $\delta=16,0...17,0$ %, $\psi=50,0...55,0$ %, $KCV=0,6...1,0$ МДж/м², $HRC=23...25$ [5].

Розтріскування поверхні ролика відбувається внаслідок термічної втоми, зумовленої періодичним контактом з розжареним металом ($1100-1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) та охолодженням в атмосфері водяної пари.

Температура поверхні ролика змінюється від $450\text{...}670\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зоні контакту, до $100\text{...}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зоні охолодження.

Вивчали глибину та поширений розподіл тріщин у ролику з діаметром робочої частини $D=320\text{ мм}$, що експлуатувався на горизонтальній ділянці МБЛЗ протягом 4500 плавок, без переточування, рис. 1.

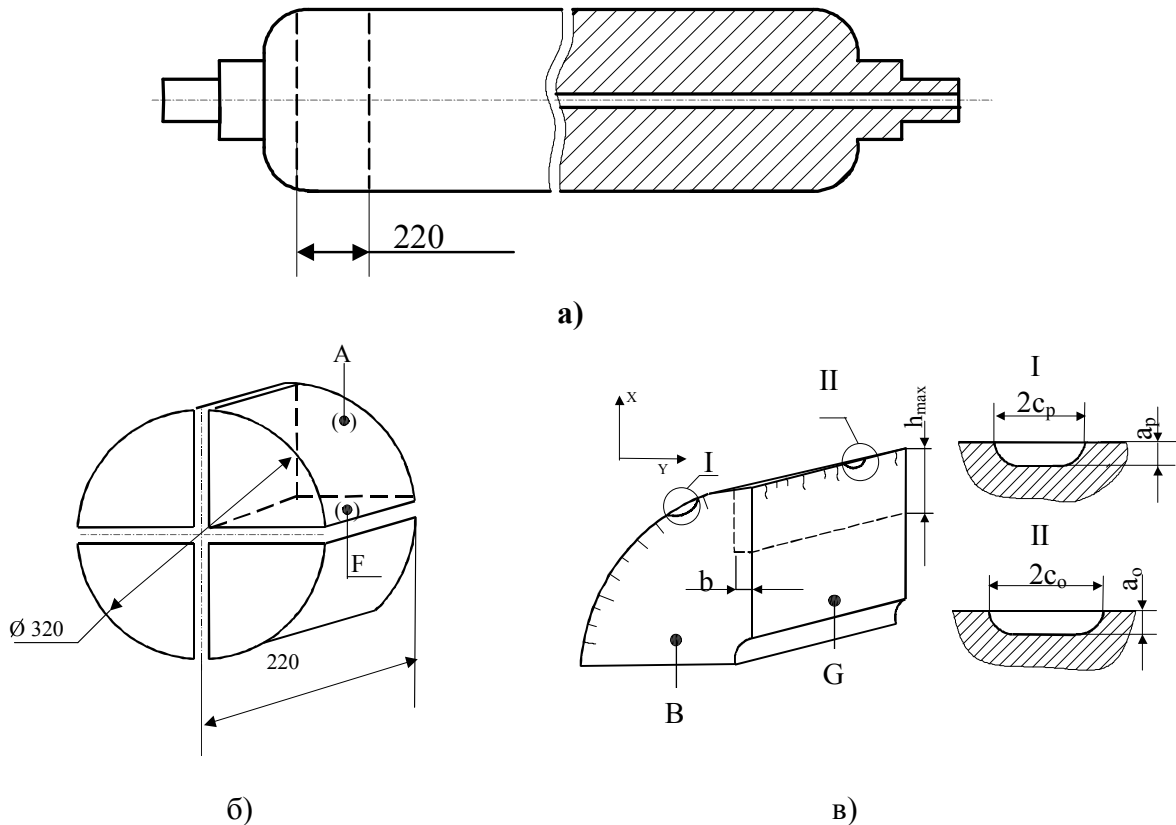


Рисунок 1 - Схема вирізання фрагмента ролика МБЛЗ діаметром 320 мм – а; вирізання темплетів - б; досліджуваних поверхонь та тріщин - в.

Розміри поверхневих тріщин визначали на шліфованих торцевих (А, В) та бічних поверхнях (F, G) темплетів довжиною 220 мм, висотою $h_{max}=40\text{ мм}$ та товщиною $b=5\text{ мм}$, які були вирізані вздовж осі ролика та у радіальному напрямку (рис.1). Прийняті наступні позначення розмірів поверхневих тріщини: a_p, a_o - глибина тріщини, площина якої відповідно перпендикулярна до осі зразка і проходить через вісь зразка; $2c_p, 2c_o$ - довжина тріщини на поверхні, площина якої відповідно перпендикулярна до осі зразка і проходить через вісь зразка. Поверхні темплетів досліджували на оптичному мікроскопі типу МБС-10 за збільшення $20\text{...}70$ разів. На цих темплетях також визначали зміну твердості HRB та мікротвердості HV металу ролика в радіальному напрямку h_i .

Макроаналіз поверхні ролика

Методами макроаналізу поверхні темплетів, на поверхні ролика, виявлено магістральні кільцеві тріщини та сітка розгару (рис. 2 а,б). Тріщини в площині, що проходить через вісь зразка, мають форму півкола, що, на нашу думку, зумовлено їх розміщенням між сіткою радіальних тріщин. Очевидно, відбувалася релаксація напружень на їх краях, що сповільнювало їх поширення вздовж осі ролика.

Поверхня ролика покрита шаром окалини, що утворився внаслідок дії високих температур та контакту зі слябовою заготовкою (рис. 2). Відомо, що за тисячу годин експлуатації при 600 °С на сталі в повітряній атмосфері утворюється шар окалини не більше 0,09 мм [3].

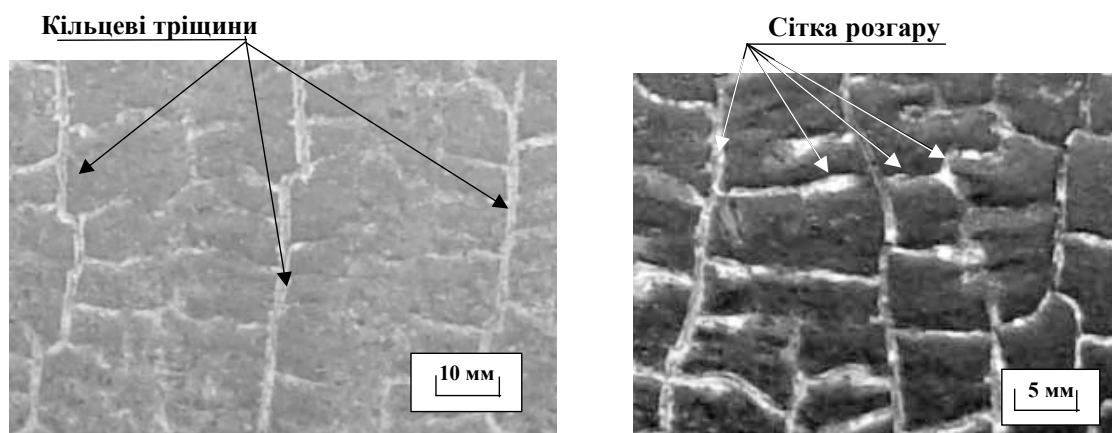


Рисунок 2 - Фотографії поверхні ролика МБЛЗ діаметром 320 мм із типовими експлуатаційними пошкодженнями після 4500 плавок.

Дослідження геометричних параметрів та взаємного розташування тріщин

Оскільки ролик МБЛЗ працює за умов високотемпературного циклічного деформування, напрям розтріскування залежить від напрямку найбільш інтенсивного деформування, який визначається за формулою:

$$\tan(2\theta_p) = \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y},$$

де θ_p - напрям головних напружень; ε_x , ε_y - деформації в напрямку осі X та Y ;

ε_{xy} - деформація зсуву.

На поверхні ролика головні напруження, зумовлені згином, будуть паралельні і перпендикулярні осі ролика, тобто $\theta_p = 0$ і 90° . Проте під дією термічного циклічного навантаження, сил тертя, які виникають між слябовою заготовкою і роликом, напрям головних напружень може змінюватися [6].

З цього випливає, що найбільш інтенсивне деформування, вичерпування пластичності матеріалу та тріщиноутворення на поверхні ролика відбуватиметься в напрямках перпендикулярно і вздовж до осі ролика.

Досліджували взаємозв'язок глибини та довжини тріщин в площинах, що проходять через вісь ролика, та перпендикулярних до осі (рис. 2-3).

Дані, наведені на рис. 3,4 свідчать про те, що співвідношення між геометричними параметрами поверхневих тріщин, отримані у нашому дослідженні, та наведені в інших працях [1,2] задовільно корелюють між собою.

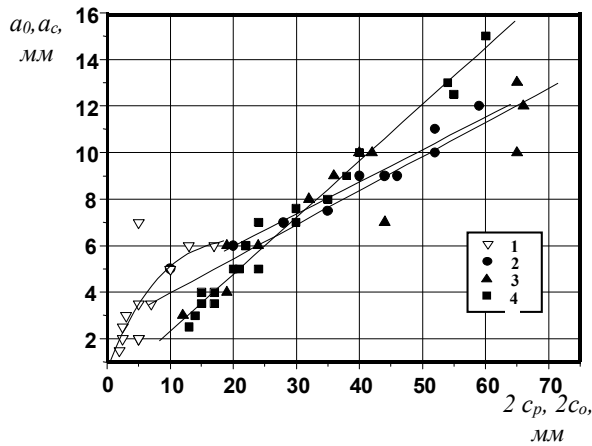


Рисунок 3 - Залежність глибини тріщини від її довжини на поверхні в осьовій площині -1 та площині, перпендикулярній до осі ролика - 2-4 (за даними [1] -2 і [2] -4 та виявлені - 3).

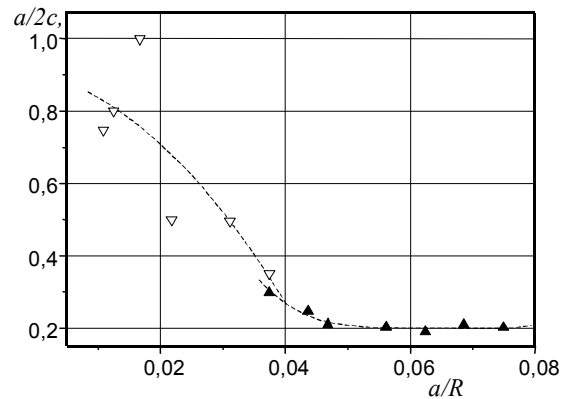


Рисунок 4 - Залежність коефіцієнта форми тріщини від відносної глибини (позначення див. рис.3).

Тріщини, виявлені в площині, перпендикулярній до осі ролика, в 1,5...1,8 рази глибші за осьові. Коефіцієнт форми тріщини (відношення глибини тріщини до її довжини на поверхні) зменшується із збільшенням глибини тріщини (Рис.4). Зокрема,

для тріщин, які лежать в осьовій площині, з $\frac{a_o}{2C_o} = 0,8$ при глибині $a/R = 0,01$ до

$\frac{a_o}{2C_o} = 0,35$ при $a/R = 0,36$. Тріщини в площині, перпендикулярній до осі зразка, мають

форму, близьку до напівеліптичної, зокрема, при $a/R = 0,037$ коефіцієнт форми тріщини $\frac{a_p}{2C_p} = 0,3$. Зазначимо, що при $a/R \geq 0,05$ коефіцієнт форми тріщин, перпендикулярних

до осі зразка, є сталим і дорівнює 0,2 мм.

Також при зовнішньому огляді ролика виявлені окремі кільцеві тріщини - це об'єднані еліптичні тріщини. На робочій поверхні ролика виявлено переривчасті радіальні тріщини, глибиною $a_p = 8-12$ мм, та сітку розгару. Радіальні тріщини являють собою розриви металу і розміщені нормально до поверхні ролика із кроком 20-25 мм. Причиною їх виникнення є осьові температурні напруження (в напрямку повздовжньої осі ролика).

Другими за величиною є колові напруження, що приводять до виникнення та росту осьових тріщин, паралельних твірній ролика, глибина яких в 2...2, 5 рази менша від радіальних. На рис. 4 побудована топологічна схема розміщення тріщин в осьовому та радіальному напрямках по довжині темплета L (L_1).

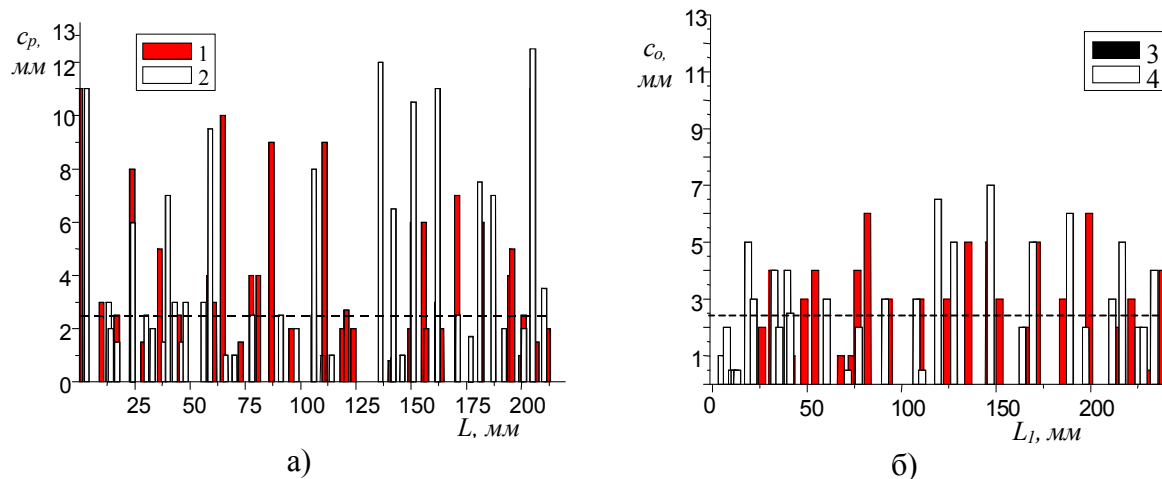


Рисунок 5 - Топологія розташування тріщин різної глибини на поверхні темплетів в осьовій площині 1-F, G-(а) та в площині, перпендикулярній до осі ролика 2-А, В - (б) (позначення див. рис.1 б,в).

Довжину поверхні темплету (рис. 1 в) в тангенціальному напрямку визначали як $L_1 = \frac{\pi R}{2}$, де R – радіус ролика.

Також провели статистичний аналіз тріщин різної глибини. Було проаналізовано 153 тріщини, виявлених на 2 темплетях на осьовій площині, та 80 тріщин в площині перпендикулярній до осі ролика.

На основі аналізу (Рис.5) поверхневі тріщини за відносною кількістю умовно можна поділити на дві групи. Це тріщини глибиною до 2,5 мм, які за зовнішнім виглядом та довжиною можна ідентифікувати як сітку розгару [7], та тріщини глибиною > 2,5 мм або сітка “глибоких тріщин”.

Питомий розподіл тріщин різної довжини в радіальному та осьовому напрямках наведено на рис. 6. Тріщини сітки розгару становлять близько 57% відсотків загальної кількості досліджених тріщин. З їх утворенням зменшуються поверхневі напруження ролика внаслідок збільшення вільної поверхні. Проте вони сприяють інтенсифікації процесу корозійного окиснення та наступного зношування робочої поверхні.

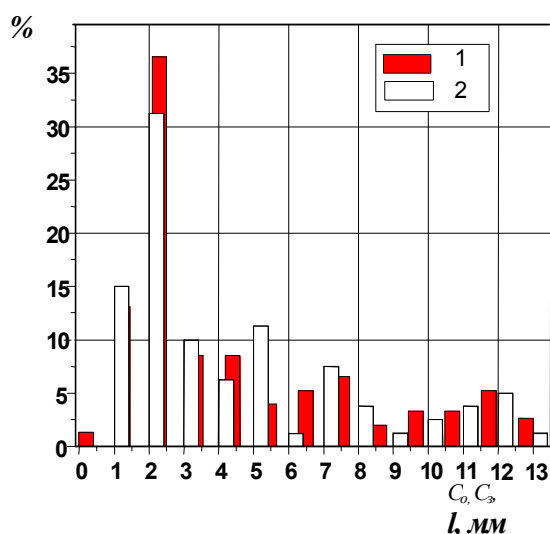


Рисунок 6 - Графік розподілу тріщин різної глибини (%), виявлених в на поверхні темплету в осьовій площині 1-F, G-(а) та в площині, перпендикулярній до осі ролика 2-А, В - (б) (позначення див. рис.1 б,в).

"Глибокі" тріщини довжиною більше 10 мм, становлять лише близько 10% загальної кількості виявлених тріщин. Глибина найдовшої з них в осьовій площині становить 13 мм. Поширюючись в тілі ролика, вони утворюють сітку тріщин, яка,

розвантажуючи прилеглі ділянки, створює так звану "зону тіні" для тріщин меншої глибини, що дозволяє прилеглим до них ділянкам вільно розширюватись при нагріванні та скорочуватись при охолодженні.

Проте, з іншого боку, такі тріщини є найбільш небезпечними, оскільки, поширюючись і об'єднуючись, вони утворюють кільцеві тріщини, які можуть привести до повного руйнування ролика.

Аналіз твердості та мікротвердості по глибині ролика

Твердість та мікротвердість визначали за стандартною методикою на твердомірі Вікерса та мікротвердомірі ПТМ-3 з алмазною пірамідкою, з кутом при вершині 136° , при навантаженні на індентор 0,3 Н, час витримки під навантаженням 15 сек, згідно з вимогами [8].

Досліджували твердість сталі 25X1M1Ф на різних відстанях від зовнішньої поверхні ролика. Виявлено, що твердість зменшується із віддаленням від зовнішньої поверхні: зокрема, на відстані 5 мм твердість становила 92 HRB, (192 HB), на відстані 38,5 мм -85 HRB (166 HB). Одержані значення твердості дещо нижчі від вихідної (269...217 HB).

Структурну неоднорідність матеріалу описували за розподілом Вейбула [9]:

$$P(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{k}\right)^m}, \quad (1)$$

де m, k - параметри розсіювання, причому параметр m (коефіцієнт гомогенності, який відображає ступінь розсіювання параметрів досліджуваної величини) визначали за формулою Гумбеля:

$$m = \frac{d(n)}{2,30259 \cdot S(\lg HV)}, \quad (2)$$

де $d(n)$ - емпіричне значення функції розподілу; $S(\lg HV)$ - середньоквадратичне відхилення випадкової величини.

Величини $d(n)$, $S(\lg HV)$ визначали в залежності від кількості вимірювань, причому, згідно з рекомендаціями [8], значення $n = 22...25$.

Відомо, що більшим значенням коефіцієнта m відповідає менший ступінь пошкоджуваності.

Максимальна мікротвердість 2500 МПа виявлена на поверхні ролика (рис.7). З віддаленням від поверхні мікротвердість зменшується до 2200...2350 МПа. Незначне підвищення мікротвердості у поверхневих шарах, очевидно, зумовлено з одного боку, технологічним процесом виготовлення ролика, з іншого - впливом експлуатаційних умов, зокрема, пружнопластичним деформуванням поверхневих шарів та зміною структури сталі, що полягає у розпаді перліту, перерозподілі карбідів вздовж феритних зерен.

Це узгоджується із відомими даними [9], коли за умов циклічного навантаження спостерігається лише незначна зміна твердості та мікротвердості, а також існує слабка кореляція даних характеристик із структурним станом металу.

Використання коефіцієнта гомогенності Вейбулла дозволяє виявити деградацію матеріалу. Зокрема, зниження значення коефіцієнта гомогенності до $m=6,9$ свідчить про те, що процес накопичення пошкоджень відбувався значно інтенсивніше в поверхневих шарах. Очевидно, відпуск на заключному етапі термообробки не приводить до утворення рівноважної структури, тому в процесі термовтоми можливий перерозподіл легуючих елементів та вуглецю в твердому розчині із розчиненням існуючих та виділенням нових карбідних фаз.

На відстані від поверхні $h=9...25$ мм $m=9,5...11,5$, що на 60...72 % вище, ніж в приповерхневій зоні, це свідчить про менше розсіювання мікротвердості та нижчу пошкоджуваність металу.

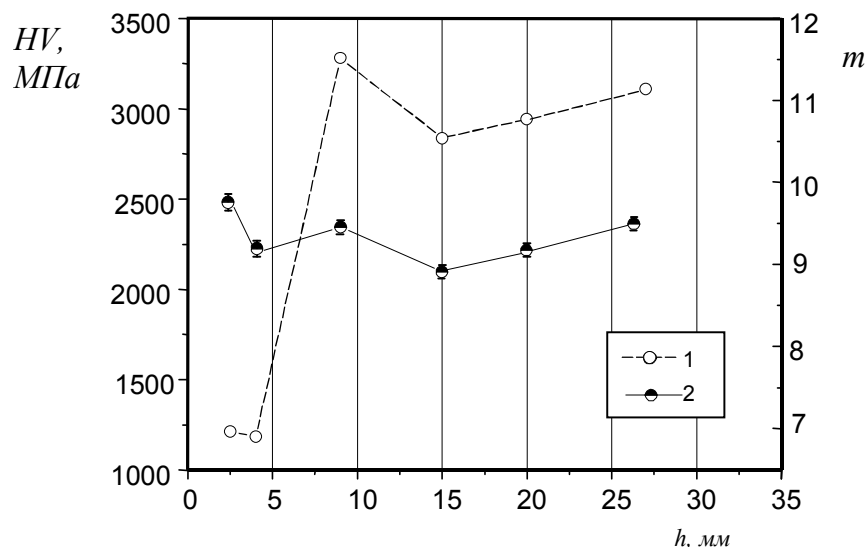


Рисунок 7 - Залежність коефіцієнта гомогенності (1) та мікротвердості (2) від віддалі в площині, перпендикулярній до осі ролика.

Висновки

Досліджено топологію поверхневих тріщин в суцільнокованому ролику МБЛЗ із сталі 25Х1М1Ф, знятому із експлуатації після 4500 плавок. Проведений статистичний аналіз розмірів тріщин, визначено питому вагу кожної з груп тріщин в площині, що проходить через вісь зразка, та в площині, перпендикулярній до осі ролика. Виявлено, що тріщини в площині перпендикулярній до осі ролика в 1,5...1,8 рази глибші за осьові.

Виявлено, що, незалежно від орієнтації площини тріщини (осьова чи перпендикулярна до осі ролика), коефіцієнт форми тріщини (відношення глибини тріщини до її довжини на поверхні) зменшується із збільшенням глибини тріщини.

На основі вимірювання мікротвердості і статистичного аналізу оцінено структурну деградацію матеріалу, зумовлену експлуатаційними умовами, в залежності від віддалі до поверхні ролика. Виявлено, що пошкоджуваність поверхневих шарів матеріалу ролика, глибина яких знаходиться в діапазоні 2,5...4 мм, на 60...72 % вища, ніж пошкоджуваність на глибині $h=9...32$ мм.

Література

1. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет. Л.В.Буланов, Л.Г.Корзунин, Е.П.Парфенов, Н.А.Юровский, В.Ю.Авдонин Под. общ ред Г.А. Шалаева. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2003, 320 с.
2. Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф.С.Домбровский, Л. К. Лещинский.-К.: Институт электросварки им. Е. О. Патона, 1995.-198 с.
3. Наплавка роликов МНЛЗ / В.А. Коротков, И.Д. Михайлов, А.С. Веселов, В.Р. Тагильцева // Сталь.- №8.-2003.-С. 60-63.
4. Chudzincki J., Horn B., Tsai C.L. Mechanisms of surface deterioration-cladded rolls for continuous slab casting-Phase 1. // 36th MWSP Conf. Proc., ISS-AIM.- Vol. 32.-1995.-P. 67-77.
5. Повышение стойкости роликов МНЛЗ за счет регулирования химического состава и выбора оптимального режима упрочнения в условиях ОАО "ММК им. Ильича" / Ф.К. Ткаченко, Н.А. Холопенко // IX региональная научно-техническая конференция: Тезисы докладов / ПГТУ. – Мариуполь.- 2002. -Том 1. - С. 89.
6. Srivastava A., Joshi V., Shivpuri R. Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling // Wear.- Vol.-256.-2004.-P. 38-43.
7. Коротков В. А., Баскаков Л. В. Трещиностойкость роликов установок непрерывной разливки стали // Сварочное производство.-1993.-№4.-С. 17-19.
8. ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: 1982.-32 с.
9. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Проблемы прочности.- 2002.- № 4.- С 5-11.

Одержано 01.06.2006 р.