

П. Марущак, канд. техн. наук; О. Ясній

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ОЦІНКА ТРИМКОЇ ЗДАТНОСТІ РОЛИКА МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК З НАШВЕЛПТИЧНОЮ ТРІЩИНОЮ

Проведено аналіз існуючих методів прогнозування залишкового ресурсу металургійного обладнання. Оцінено тримку здатність ролика машини безперервного лиття заготовок із напівеліптичною поверхневою тріщиною на основі використання підходів SINTAP з урахуванням розкиду розмірів тріщини, в'язкості руйнування, характеристик механічних властивостей матеріалу та величини прикладеного навантаження через випадкові змінні з відповідними функціями розподілу. Одержані результати свідчать, що метод може бути рекомендовано для практичного використання.

P. Maruschak, O. Yasniy

DAMAGE TOLERANCE ANALYSIS OF CONTINUOUS CASTER ROLL CONTAINING A CIRCUMFERENTIAL SEMI-ELLIPTICAL CRACK

The procedure for damage tolerance analysis of metallurgical equipment is presented and illustrated by a case study on caster roll. The scheme is based on the recently developed procedure SINTAP taking into account the scatter of crack's geometry, fracture toughness, material properties and applied loadings as random variables with corresponding distribution functions. The results show that the method can be used in practice.

З досвіду експлуатації роликів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) відомі випадки їх непрогнозованого крихкого руйнування. Це обумовлено поширенням втомних тріщин, що призвели до зниження витримної здатності матеріалу та руйнування конструкції. Із зростанням швидкостей розливання сталі збільшується кількість циклів навантаження ролика, внаслідок чого зростають кількість і розміри дефектів.

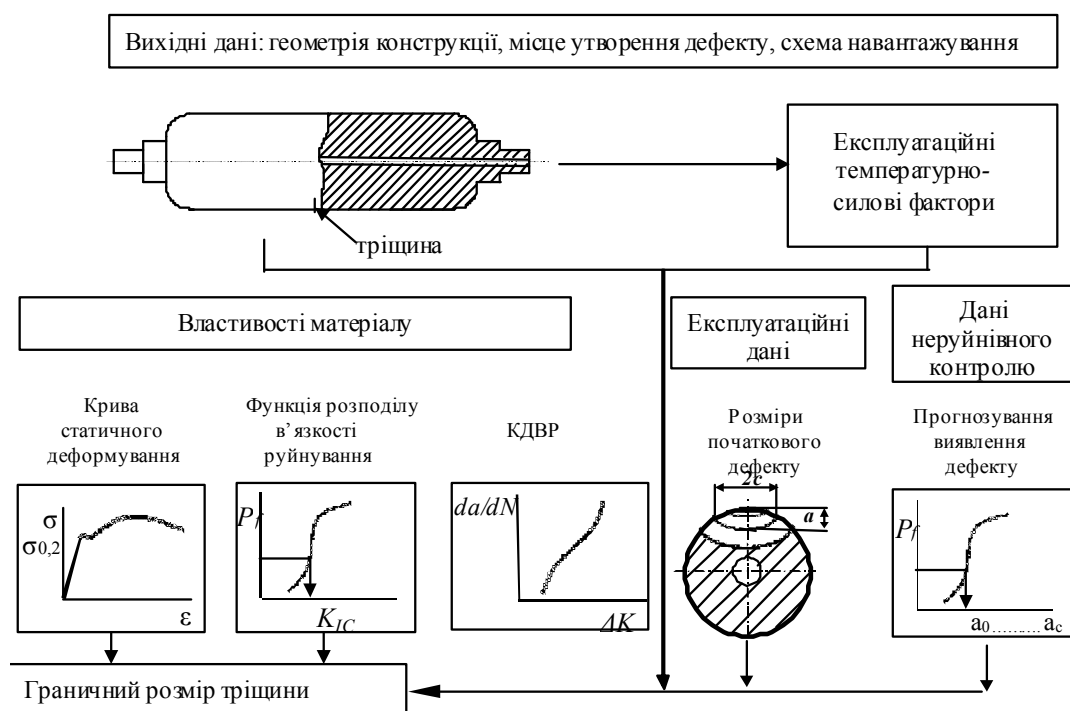


Рисунок 1 - Схема оцінки граничного стану ролика МБЛЗ

Для оцінки міцності конструкцій з високоміцних матеріалів широко використовується лінійна механіка руйнування, що дозволяє достатньо надійно оцінити тримку здатність деталей з тріщиноподібними дефектами [1-3]. Проте її використання має певні обмеження. Відомо, що дефекти у в'язкому матеріалі при статичному навантаженні практично не впливають на міцність деталей, оскільки її зниження пропорційне відноській площі дефектів в небезпечному перерізі, а в цьому випадку справедливими є традиційні методи розрахунку [1-3].

Перспективними для оцінки стану конструкції є підходи SINTAP, які враховують властивості тріщиностійкості, міцності і пластичності матеріалу, забезпечуючи визначення причини втрати тримкості об'єкту внаслідок розвитку тріщини або за пластичної деформації конструкції [4]. Цей підхід ґрунтується на кількісному двокритеріальному аналізі властивостей моделі об'єкту. Алгоритм побудовано за схемою послідовних покрокових рівнів аналізу. Це дозволяє проводити швидко оцінку стану конструкції з використанням мінімальної інформації про об'єкт дослідження [4,5].

Вхідними параметрами, потрібними для прогнозування руйнування конструкції, є:

- геометричні параметри розташування і орієнтації потенційних тріщин або тріщиноподібних дефектів;
- експлуатаційні навантаження;
- деформаційні характеристики матеріалу (статична крива розтягу);
- розмір критичного дефекту.

Частиною вхідних параметрів, зокрема умовну межу текучості, діючі навантаження та статичну в'язкість руйнування матеріалу описували з використанням методів математичної статистики.

Метою роботи є оцінка тримкої здатності конструкції з тріщиною на основі підходу, що поєднує класичні методи розрахунку та ґрунтується на лінійній механіці руйнування.

Визначення гарантовано «безпечних» дефектів

Під межею тріщиностійкості розуміють неперервну сукупність значень граничних КІН матеріалу для всього інтервалу характерних розмірів тріщин. Концепція межі тріщиностійкості дозволяє використовувати відомі формули обчислення КІН для оцінки тримкості при крихкому та квазікрихкому руйнуванні [1-3].

У праці визначали запас міцності за критичним напруженням або межею міцності матеріалу. Запас за розміром дефекту визначали порівнянням експлуатаційного та критичного розмірів тріщини. Мінімальну величину поверхневого напівеліптичного дефекту $a_{\min}^{\text{крих}}$, що зумовлює крихке руйнування деталі, визначали за формулою [1]:

$$\frac{a_{\min}^{\text{крих}}}{Q} \geq 0,4 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{0,2}} \right)^2, \quad (1)$$

де Q - параметр форми тріщини, K_{IC} – статична тріщиностійкість матеріалу, $\sigma_{0,2}$ - умовна межа текучості матеріалу.

За напружень вищих межі текучості починається область квазікрихкого руйнування, коли треба застосовувати нелінійну механіку руйнування. Відомо, що якщо в цій області, за умови перевищення $0,8\sigma_{0,2}$, застосувати лінійну механіку руйнування, отримаємо похибку, що йде в запас міцності конструкції. У вершині дефекту виникає пластична деформація, зменшується гострота тріщини, а отже, і руйнування відбувається за вищого рівня напружень [1].

За в'язкого руйнування тріщина перестає знижувати міцність матеріалу, а руйнування відбувається за критичного напруження, що перевищує межу міцності [1]:

$$\frac{a_{\min}^{\text{в'язк}}}{Q} \leq 0,25 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_B} \right)^2, \quad (2)$$

σ_B - межа міцності матеріалу; $a_{\min}^{\text{в'язк}}$ - мінімальна глибина напівеліптичного дефекту, яка приводить до в'язкого руйнування деталі.

Відомий метод визначення граничної довжини тріщини a_k в матеріалі ролика МБЛЗ ґрунтується на аналогічних підходах [6]:

$$a_k = 0,16 \frac{K_{IC}^2}{\sigma_{кр}}$$

де $\sigma_{кр}$ - найбільше короткотривале напруження на поверхні ролика від механічних навантажень, яке виникло внаслідок відхилень від технологічного режиму.

Параметри експлуатації ролика МБЛЗ

Ролик розглядали у вигляді порожнинного циліндра, довжина якого приблизно в 7 разів перевищує діаметр, поверхнева напівеліптична тріщина розміщена в центральній частині конструкції. Діаметр ролика становив 300 мм, діаметр отвору - 80 мм.

Зовнішнє навантаження на ролик спричинене феростатичним тиском стовпа рідкого металу на оболонку слябу, яка підтримується роликами, зусиллями від випрямлення злитка та рядом інших факторів [7,8].

Навантаження на ролики суттєво залежить від швидкості лиття. При литті із усталеною швидкістю величина навантажень стабілізується, а при тимчасовому зниженні швидкості лиття та зупинках ролики деформують поверхню злитка, що приводить до додаткових реакцій підшипникових опор. Для оцінки напружено-деформованого стану ролика МБЛЗ з тріщиною використовували розрахункові результати, наведені в праці [7].

Таблиця 1 - Залежність навантаження на ролики від швидкості лиття і матеріалу заготовки

Швидкість лиття, м/хв	Марки сталі слябової заготовки		
	Вуглецева сталь (C>0,2%)	X18H9T	35ХМФА
	Значення навантаження, кН		
1,0	650	900	1100
0,5	800	1250	1500

Припущення, прийняті при оцінці залишкової міцності ролика МБЛЗ:

- розглядали одну магістральну напівеліптичну тріщину, яка може бути причиною руйнування ролика;
- нехтували впливом термічної складової на напружено-деформований стан напівеліптичної тріщини, оскільки дефекти, які розглядаються, мають довжину ≥ 15 мм;
- приймали однорідним температурне поле в середині ролика, розрахунок проводили для властивостей матеріалу при температурі 20 °С;
- вважали, що матеріал ролика є ізотропним;
- не враховували перерозподіл навантажень, пов'язаних з формозміною ролика в процесі роботи.

Досліджувані величини розглядали як випадкові змінні, які описуються густиною розподілу ймовірності. Результати досліджень були оброблені методами

математичної статистики, визначені функції і параметри розподілу характеристик механічних властивостей матеріалу ($\sigma_B, \sigma_{0,2}, K_{IC}$), табл. 2.

Таблиця 2 - Механічні властивості сталі 25X1M1Ф

Умовна межа текучості, $\sigma_{0,2}$, МПа	Межа міцності, σ_B , МПа	Статична тріщиностійкість, МПа $\sqrt{м}$
		K_{IC} [6]
500-550	600-650	94,8-110

Провівши розрахунок за формулами (1,2), визначили глибину тріщини, яка гарантовано не може бути причиною руйнування ролика $a_{\max}^{в'язк} = 6,25$ мм. Більш глибокі дефекти допускаються, проте за обмеженого рівня напружень. Рівень $a_{\min}^{крих} = 14,4$ мм, що є мінімальною довжиною тріщини, за якої можливе крихке руйнування, був прийнятий як початкова довжина тріщини для оцінки методом SINTAP.

Коефіцієнт інтенсивності напружень для товстостінного циліндра з поверхневою напівеліптичною тріщиною обчислено за формулою [9]:

$$K = \sigma_{bg} \sqrt{\pi a} \cdot Y, \tag{3}$$

де $Y = 0,5 + 4,78 \frac{a}{D} - 30,6 \left(\frac{a}{D}\right)^2 + 68 \left(\frac{a}{D}\right)^3$, a – глибина тріщини; D – діаметр тріщини;

σ_{bg} - напруження, спричинені згинальним моментом в аналізованому перерізі ролика;

$\sigma_{bg} = M_{bg} / W_b$, де M_{bg} - згинальний момент; W_b - момент опору перерізу ролика;

$W_b = \frac{\pi}{32D_0} (D_0^4 - d_0^4)$, де D_0, d_0 – зовнішній та внутрішній діаметр ролика.

Значення напружень в перерізі ролика визначали методом скінченних елементів та методом плоских перерізів.

Використання процедури SINTAP

Забезпечення надійної роботи конструкції полягає у виключенні можливості руйнування конструкції в межах заданого ресурсу. Наявність дефекту знижує реальне значення ресурсу роботи за рахунок зменшення коефіцієнту запасу. Тому безвідмовна робота конструкції повинна гарантуватись таким коефіцієнтом запасу, зниження якого недопустимо з міркувань надійності. Огинаюча крива руйнування, інакше крива оцінювання руйнування, залежить тільки від властивостей матеріалу за статичного розтягу і є функцією тримкої здатності матеріалу [4].

$$K_r = f(L_r), \tag{4}$$

де $f(L_r)$ - гранична крива;

$$f(L_r) = \left[1 + \frac{1}{2} L_r^2 \right]^{-1/2} \cdot \left[0,3 + 0,7 \exp(-\mu L_r^6) \right] \text{ для } 0 \leq L_r \leq 1.$$

$\mu = \min\left(0,001E / \sigma_{0,2}, 0,6 \right)$, де E – модуль пружності першого роду.

$f(L_r) = f(L_r = 1) \cdot L_r^{(N-1)/2N}$ для $1 \leq L_r \leq L_{r \max}$,

$$N = 0,3 \left[1 - \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} \right], \quad L_{r \max} = \frac{1}{2} \frac{[\sigma_{0,2} + \sigma_B]}{\sigma_{0,2}}.$$

Тримкість матеріалу визначають за формулою:

$$L_r = F / F_{0,2} \text{ або } L_r = \sigma_{ref} / \sigma_{0,2},$$

де F , F_y , σ_{ref} - відповідно прикладені навантаження, напруження межі текучості, напруження в нетто-перерізі та умовна межа текучості матеріалу конструкції [4].

В таблиці 3 наведено функції густини розподілу та параметри розподілів механічних властивостей матеріалу.

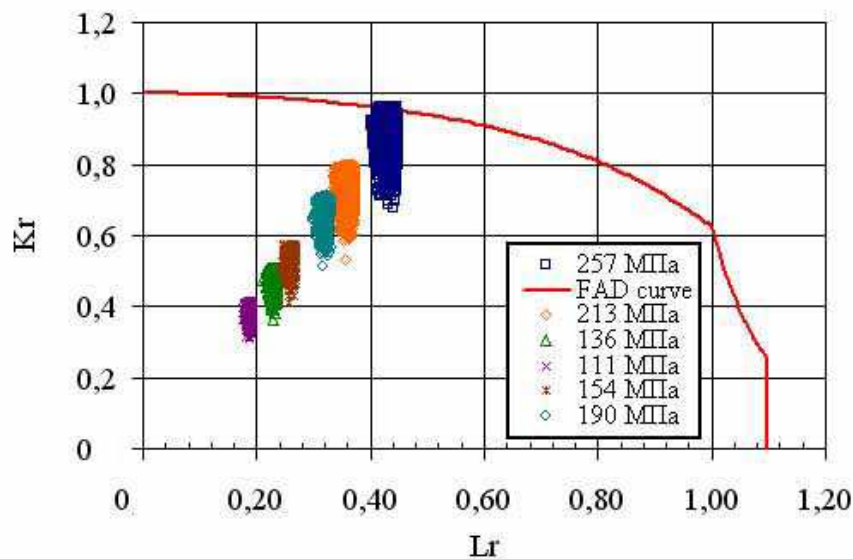
Таблиця 3 - Функція густини розподілу та значення параметрів розподілу

Характеристика	Тип розподілу	Параметри розподілу
K_{IC}	Вейбулла $f(u) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{u - u_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{u - u_0}{\eta} \right)^\beta \right]$	$u_0 = 93,969$, $\beta = 7,601$, $\eta = 1,393$
$\sigma_{0,2}$	логарифмічно-нормальний $f(u) = \frac{1}{(u - u_0)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{1}{2\sigma^2} \left(\ln \frac{u - u_0}{m} \right)^2 \right]$	$u_0 = 500$, $m = 16$, $\sigma = 0,7$
σ_B		$u_0 = 600$, $m = 17$, $\sigma = 0,5$

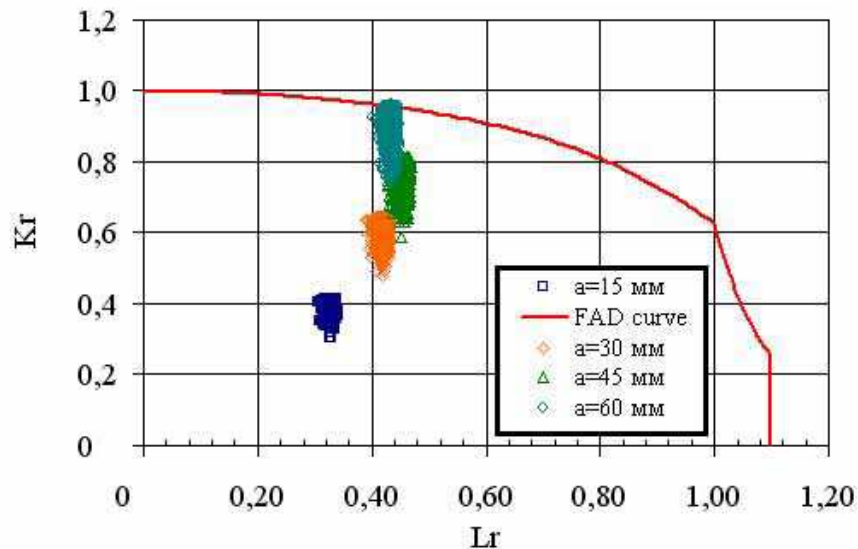
З метою одержання імовірності руйнування конструкції, методом Монте-Карло проводили 10000 симуляцій параметрів FAD . Аналізували кілька варіантів напівеліптичних тріщин глибиною a в діапазоні $0,05 D \dots 0,2D$. Відношення глибини тріщини до довжини на поверхні $a / 2c = 4$, де $2c$ – довжина напівеліптичної тріщини на поверхні ролика.

Таким чином, отримано три статистичні вибірки значень пошкодженості ролика за параметрами K_r та L_r . Згідно з діаграмою оцінки живучості ролика МБЛЗ з тріщиною довжиною 60 мм, режими розливки слябової заготовки суттєво впливають на стан конструкції, (рис. 2). Помітно, що причиною виходу з ладу ролика є тріщини та вичерпування ресурсу за показником K_r . Виявлено, що є значний запас міцності за L_r , оскільки граничні значення даного показника не перевищують 0,5.

Це свідчить про квазікрихке руйнування ролика за граничних значень КІН, що узгоджується з експлуатаційними даними [6]. Зниження швидкості лиття з 1,0 м/хв до 0,5 м/хв приводить до підвищення імовірності руйнування ролика та зростання K_r від 0,5...0,8 до 0,7...1,0. Імовірність руйнування конструкції P_f при 257 МПа становить 0,0259.



а

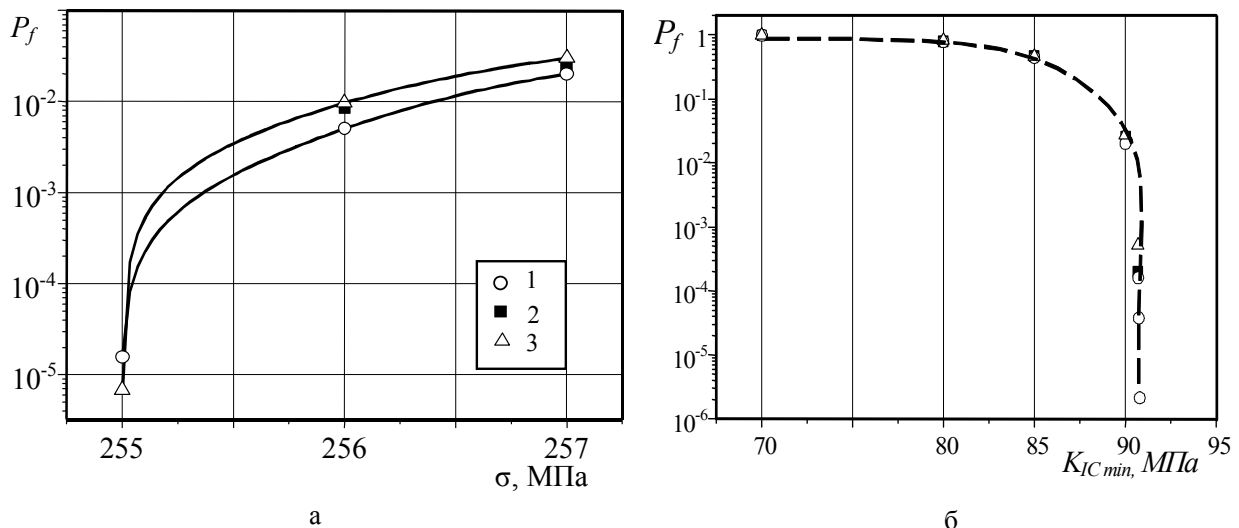


б

Рисунок 2 - Діаграми оцінки руйнування (FAD) ролика МБЛЗ в залежності від експлуатаційних напружень - а та глибини тріщини -б

Досліджували вплив розміру дефекту на пошкодженість ролика та можливість його експлуатації при зниженні швидкості лиття від 1,0 до 0,5 м/хв. Виявлено, що дефекти, менші за 60 мм, є допустимими та не приводять до руйнування конструкції за досліджуваними параметрами. Проте даний висновок є правомірним з урахуванням попередньо зроблених припущень. За умови наявності в перерізі кількох напівеліптичних тріщин, краї яких контактують між собою, глибина критичної тріщини може бути меншою [9].

На рис. 3а побудовано графік оцінки імовірності руйнування ролика МБЛЗ за різних значень експлуатаційного навантаження.



а

б

Рисунок 3 - Залежність імовірності руйнування від експлуатаційних напружень а) та від зниження мінімального значення КІН матеріалу - б): 1 – метод оцінювання надійності І-го порядку; 2 – Монте-Карло з вибіркою за значущістю; 3- Монте-Карло

Оцінку імовірності руйнування ролика проведено за 3-ма методами (Монте-Карло, оцінювання надійності І-го порядку, Монте-Карло з вибіркою за значущістю), результати всіх методів дають задовільне графічне узгодження імовірності руйнування P_f від експлуатаційних напружень конструкції, рис. 3. Для апроксимації даних використано сігмоїдальну функцію (функцію Больцмана), рис. 3б.

Якщо розглядати руйнування ролика як аварію середнього рівня важкості ($P_f=10^{-3}$) то граничним значенням напружень конструкцій з тріщиною $a=60$ мм є 255 МПа. Проте, прийнявши, що руйнування ролика приведе до важких наслідків, наявність тріщини $a=60$ мм приводить до зняття ролика з експлуатації, оскільки імовірність його руйнування P_f перевищує допустиму ($P_f=7 \cdot 10^{-5}$).

Вплив деградації властивостей напрацювання на імовірність руйнування ролика оцінювали шляхом зниження мінімального значення K_{IC} в розподілі властивостей статичної тріщиностійкості матеріалу за припущення закону розподілу Вейбулла. Виявлено, що за максимальної довжини тріщини конструкція є чутливою до зміни тріщиностійкості матеріалу за сталого рівня напружень. Зниження K_{Icmin} на 10% збільшує імовірність руйнування конструкції до 10^5 , рис. 3б.

Висновки

Сформульовано підходи до аналізу граничного стану ролика МБЛЗ з технологічним або експлуатаційним дефектом, схематизованим відповідно до моделей лінійної механіки руйнування.

Проведено моделювання пошкоджуваності ролика МБЛЗ як послідовності етапів підростання тріщини до повної втрати тримкої здатності конструкції на основі параметрів міцності та тріщиностійкості.

Виявлено, що уповільнення швидкості лиття з 1,0 м/хв до 0,5 м/хв приводить до підвищення імовірності руйнування ролика та зростання K_I від 0,5...0,8 до 0,7...1,0 за довжини тріщини 60 мм. Дефекти глибиною менші за 60 мм не приводять до руйнування конструкції за досліджених експлуатаційних умов.

Роботу виконано за рахунок бюджетних коштів Державного фонду фундаментальних досліджень України, номер реєстрації 0107U006982.

Література

1. Оценка прочности дисков и роторов турбин и генераторов / Ю.Н. Работнов, А.И. Федосов, В.П. Рабинович и др. // Известия ВУЗов. Машиностроение.-1976.-№1.-С. 5-9.
2. Васильченко Г.С., Морозов Е.М. Расчет на прочность массивных конструкций, содержащих дефекты // Вестник машиностроения.-1977.-№3.-С. 72-74.
3. Куркин С.А., Рукосуев И.В., Данилов Г.И. К вопросу о регламентации размеров дефектов в сварном изделии // Известия ВУЗов. Машиностроение.-1977.-№5.-С. 142-146.
4. SINTAP: Structural Integrity assessment procedure for European Industry. Final procedure. Brite-Euram Project №BE95-1426.-British Steel, 1999.-189 p.
5. The development of damage tolerance concept for railway components and its demonstration for a railway axle / U. Zerbst, M. Vormwald, C. Andersch et al. // Engineering Fracture Mechanics.-2005.-Vol. 72.-P.209-239.
6. Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф.С. Домбровский, Л.К. Лещинский.-К.: Институт электросварки им. Е. О. Патона, 1995.-198 с.
7. Баранов Г.Л., Гостев А.А., Денисов Ю.В. Расчет и исследование роликового аппарата зоны вторичного охлаждения МНЛЗ.-Магнитогорск.-МПП., 1993.-110 с.
8. 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.
9. Оцінка розподілу КІН по фронту поверхневої напівеліптичної тріщини у товстостінному циліндрі / Пиндус Ю.І., Марущак П.О., Бішак Р.Т., Ясній О.П. // Вісник Житомирського державного технологічного університету.-2008.-С. 27-33.
10. Prediction of fatigue crack propagation of double surface cracks by "SCAN" / M. Shiratori, N. Yoshikawa, N. Seki et al // Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT 17, (August 17–22), Prague, Czech Republic.-2003.-P. 1-8.

Одержано 15.05.2008 р.