

**П. Ясній, докт. техн. наук; В. Гладь, канд. техн. наук;  
П. Марущак, канд. техн. наук**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **СТІЙКІСТЬ ТЕПЛОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ ДО ДИНАМІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ**

*Запропоновано методику оцінки чутливості матеріалу до динамічного навантажування за наявності концентраторів напружень на основі даних твердості та використання "правил сумішей". Одержані результати дозволять прискорити порівняльний аналіз властивостей матеріалів роликів за динамічного навантажування. Пропонується проводити додатковий контроль якості вихідних поковок для виготовлення роликів машин безперервного лиття заготовок на наявність концентраторів напружень.*

**P. Yasniy, V. Hlado, P. Maruschak**

## **HEAT - RESISTANT STEELS STRENGTH AS TO THE DYNAMIC TOUGHNESS UNDER STRESS CONCENTRATORS**

*The estimation method of the material sensibility as to the dynamic loading under stress concentrators basing on the hardness data and application of the "mixture rules", has been proposed. The obtained results make possible to speed up comparative analyses of the roll material properties under dynamic loading. Additional control of the out coming forgings for producing CCM rolls for identification of the stress concentrators is suggested to be carried out.*

Збитки, що наносяться металургійним підприємствам внаслідок швидкого розтріскування та пошкодження роликів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), є досить значними та приводять до збільшення витрат на поточне утримання і ремонт, зменшують надійність та скорочують термін служби відповідальних елементів. У відповідності до вимог виробництва інтенсивність зношування не повинна перевищувати 0,1...0,25 мм/тис. плавов, при цьому МБЛЗ має випустити не менше 1 млн. тон заготовок без граничного розтріскування поверхні. На даний час значного поширення набули методи підвищення надійності роботи МБЛЗ з використанням біметалів. Існує кілька підходів виготовлення біметалевих бочок, зокрема наплавленням порошковими дротами, виготовлення бочки методом відцентрового лиття з почерговим заливанням шарів [1,2].

Проте, незважаючи на значну кількість інформації щодо експлуатаційної пошкоджуваності матеріалів роликів, сьогодні відсутні узагальнені підходи до оцінки впливу концентраторів напружень на тріщиностійкість роликів за динамічних перевантажень конструкції [3].

Метою даної роботи є вивчення комплексу механічних властивостей матеріалів роликів МБЛЗ та оцінка їх впливу на динамічну в'язкість руйнування за наявності концентраторів напружень.

### **Методика експериментальних досліджень**

Для виготовлення бочки роликів використовують теплостійкі сталі, які мають значний запас пластичності. З метою підвищення експлуатаційних властивостей в них реалізують комплексне легування хромистого металу нікелем, молібденом, ванадієм. З метою запобігання зношуванню та окисненню поверхневі шари роликів МБЛЗ виготовляють зі сталі, вміст хрому в якій не менше 12 %, товщина зовнішнього шару повинна знаходитись в межах 3...4 мм. На металургійних комбінатах, як правило, зовнішній шар ролика становить 10...12 мм для забезпечення можливості 4...5 переточувань бочки ролика. Проте розрахунки доводять, що найменший рівень

термічних напружень та більш рівномірний розподіл температурного поля в процесі експлуатації досягається за товщини робочого шару 3...4 мм [1,2].

Для дослідження використовували зразки, вирізані з фрагментів нових роликів, що були встановлені на металургійному комбінаті “Азовсталь”.

Динамічну в'язкість руйнування матеріалів роликів МБЛЗ визначали на монометалевих зразках із сталей 15X13МФ і 25X1М1Ф та біметалевих зразках із сталей 18X11МНФБ та 35Г2 із однаковою товщиною шарів. Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в таблиці.

Таблиця 1 - Хімічний склад сталей роликів МБЛЗ, %

Матеріал	C	Si	Ni	Cu	Cr	Mn	Mo	V
25X1М1Ф	0,23- 0,29	0,17- 0,37	0,30	-	1,50- 1,80	0,40- 0,70	0,60- 0,80	0,15- 0,30
15X13МФ	0,15	0,65	-	-	12,20	0,6	-	-
35Г2	0,35	0,25	0,3	0,3	0,3	1,4	-	-
18X11МНФБ	0,18	0,6	1,0	-	11	1,0	0,7	0,2

Випробування на ударну в'язкість проводили на копрі ВКМ-5 при температурі +20 °С на зразках розміром 5×5×27,5 мм з радіусом надрізу 0,125 ± 0,0125 мм.

Фрактографічні дослідження після випробування на ударну в'язкість виконували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И.

Твердість вимірювали на приладі Супер Роквелл із навантаженням на індентор 150 N.

Відомо, що показники твердості та міцності характеризують деформівну здатність матеріалу. Японська асоціація матеріалознавців (JSMS) пропонує наступну формулу взаємозв'язку твердості  $HV$  та границі міцності матеріалу [4]:

$$\sigma_B = \frac{(HV - 1,837)}{0,304} \quad (1)$$

З метою обчислення границі міцності  $\sigma_{BK}$  композиційного матеріалу використовували “правило сумішей” [5]:

$$\sigma_{BK} = \sigma_{B1} \alpha + \sigma_{B2} (1 - \alpha), \quad (2)$$

де  $\alpha$  та  $(1 - \alpha)$  - частки (по площі перерізу) відповідно першого та другого компонентів біметалу;  $\sigma_{B1}$  та  $\sigma_{B2}$  - межі витривалості складових біметалу, обчислені згідно з формулою (1).

### Мікроструктура та твердість сталей роликів МБЛЗ

Сталі 25X1М1Ф та 35Г2 належать до сталей ферито-перлітного класу. Мікроструктура сталей складається з вільного фериту, перлітних колоній, які розташовані в різних частинах феритних зерен. Дослідження методами електронної просвічуальної мікроскопії довело, що для зерен фериту характерна незначна густина хаотично розподілених дислокацій [6,7]. В об'ємі феритних зерен та на їх границях зустрічаються карбідні включення глобулярної форми, розмір яких коливається в межах 0,05...0,3 мкм. Мікродифракційні зображення зерен фериту та перліту є достатньо чіткими, що вказує на те, що структура матеріалу не має значних внутрішніх напружень [6,7].

Сталі зовнішнього шару ролика 15X13МФ та 18X11МНФБ належить до сталей ферито-

мартенситного класу. Структура даних сталей являє собою дислокаційний мартенсит, який має вигляд пакетів з рейками, що мають незначну розорієнтацією та розділені малокутовими границями. Рейки всередині пакетів мають злами та локальну розорієнтацію, одержану в результаті мартенситного перетворення [6,7]. Всередині мартенситних рейок і у фериті спостерігали дисперсні виділення "масивних" карбідів. В більшості випадків ферит локалізується між мартенситними пакетами. При цьому міжфазні границі не є прямолінійними. Вони являють собою складні дислокаційні утворення.

Визначали параметри твердості сталей у початковому стані. Як видно з рис. 1, максимальну твердість мають сталі захисних шарів роликів 18X11МНФБ та 15X13МФ. Сталі несучого шару роликів 25X1М1Ф і 35Г2 є більш пластичними, що зумовлено їх мікроструктурою.

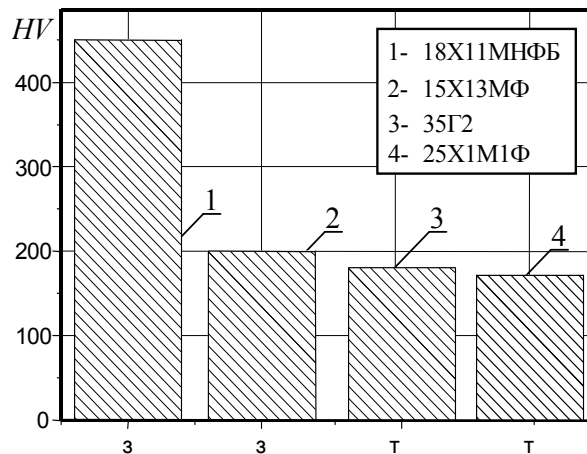


Рисунок 1 - Значення твердості сталей роликів МБЛЗ у вихідному стані: З – використовуються як захисний шар ролика; Т – використовуються як тримкий шар ролика

### Аналіз впливу концентраторів напружень на динамічну в'язкість сталей роликів МБЛЗ

Оцінку чутливості досліджуваних сталей до концентраторів напружень проводили з допомогою випробувань на ударну в'язкість. Під час динамічного навантаження робота руйнування, що витрачається на ударний злам, є функцією міцності і пластичності металу та пропорційна деформованому об'єму зразка. Це підтверджується тим, що криві зміни деформованого об'єму та криві зміни ударної в'язкості в залежності від температури мають дуже подібний характер [4,5]. Більш

пластичний матеріал має більшу величину деформованого об'єму та більше значення ударної в'язкості.

Для досліджених матеріалів, у випадку ударного навантажування, сталь 25Х1М1Ф має найвищу ударну в'язкість ( $KCV$ ) (рис.2). Це підтверджує високу пластичність та міцність даної сталі. Сталь 15Х13МФ має в 2,2 рази нижчу ударну в'язкість руйнування, що зумовлено її ферито-мартенситною структурою, яка має значно нижчу пластичність.

Збільшення  $KCV$  свідчить про зростання опору динамічному руйнуванню, а зміщення даних вправо по осі абсцис (рис.2) свідчить про збереження достатньо високої міцності матеріалу.

Досліджено закономірності руйнування біметалевих зразків із сталей 18Х11МНФБ і 35Г2, коли низька енергоємність руйнування феритно-мартенситної сталі із низькою пластичністю компенсується в'язкістю ферито-перлітної сталі. У випадку виконання надрізу з боку ферито-мартенситної сталі 18Х11МНФБ в'язкість руйнування значно вища, порівняно із зразками, які мали надріз з боку ферито-перлітної сталі 35Г2 (рис.2).

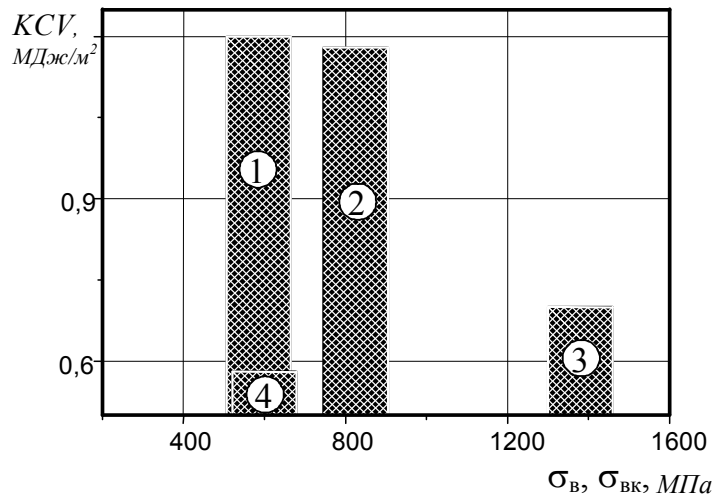


Рисунок 2 - Залежність значень динамічної роботи руйнування зразків Шарпі від умовної межі міцності (1,4 – зразки з мономатеріалу; 2,3 - композитні зразки): 1-сталь 25Х1М1Ф; 2- надріз виконано з боку сталі 18Х11МНФБ; 3- надріз виконано з боку сталі 35Г2; 4-сталь 15Х13МФ

Фрактографічний аналіз зразків після випробування на ударну в'язкість виявив, що руйнування сталі 15Х13МФ відбулось за мікромеханізмом сколювання. Сколювання сталі 15Х13МФ відбулося за певними кристалографічними площинами, що утворюють фасетки сколювання. Мікроструктура фасеток має вигляд струмкового узору, утвореного внаслідок злиття окремих мікротріщин (рис. 3,а). Злиття тріщин відбулось крихко, вздовж ліній спайності із наявністю незначної частки мікропластичної ямкової складової.

Поверхня руйнування іншої ферито-мартенситної сталі - 18Х11МНФБ представлена рівновісними квазікрихкими мікроямками приблизно однакового розміру, які утворилися за механізмом відриву (рис. 3,б). Відсутність витягнутості ямок на поверхні руйнування сталі 18Х11МНФБ свідчить про малу пластичність руйнування матеріалу.

Фрактографічний аналіз зразків зі сталі 25Х1М1Ф виявив, що поверхня руйнування представлена ділянками квазісколу (рис. 3,в). Механізм руйнування сталі має внутрішньозерновий характер. Злам характеризується незначною пластичною деформацією, поверхня зламу утворена сіткою гребенів, що свідчить про наявність крихких та окремих в'язких мікромеханізмів руйнування. Наявність вторинних мікротріщин свідчить про потребу додаткових витрат енергії руйнування.

Поверхня руйнування зразків зі сталі 35Г2 має ямкову будову (рис. 3,г), причому в умовах в'язкого руйнування зразків Шарпі утворюються ямки, схожі на витягнуті параболи, розвернуті до місця зародження тріщини. Порівняно невелику частку поверхні зламу становлять крупні ямки розміром більше 5 мкм. Утяжини бічних поверхонь свідчать про відносно високу енергоємність руйнування. В більшості ямок виявлено включення, які ініціювали зародження мікропор. Стінки ямок та гребені відриву декоровані ще дрібнішими ямками, в яких включень не виявлено.

Висока ударна в'язкість ферито-перлітних сталей 25Х1М1Ф та 35Г2 зумовлена значною енергомісткістю руйнування, що виявляється фрактографічними дослідженнями у значній пластичній деформації сталі 35Г2 та складним мікрорельєфом і наявністю вторинних мікротріщин у зламі сталі 25Х1М1Ф.

Порівняно найнижча з іншими сталями ударна в'язкість ферито-мартенситної сталі 15Х13МФ зумовлена крихким характером руйнування за механізмом сколювання. Невисока в'язкість руйнування сталі 18Х11МНФБ пов'язана з квазікрихким механізмом руйнування та малою пластичною деформацією, що фрактографічно виявлено у вигляді мікроямок відриву.

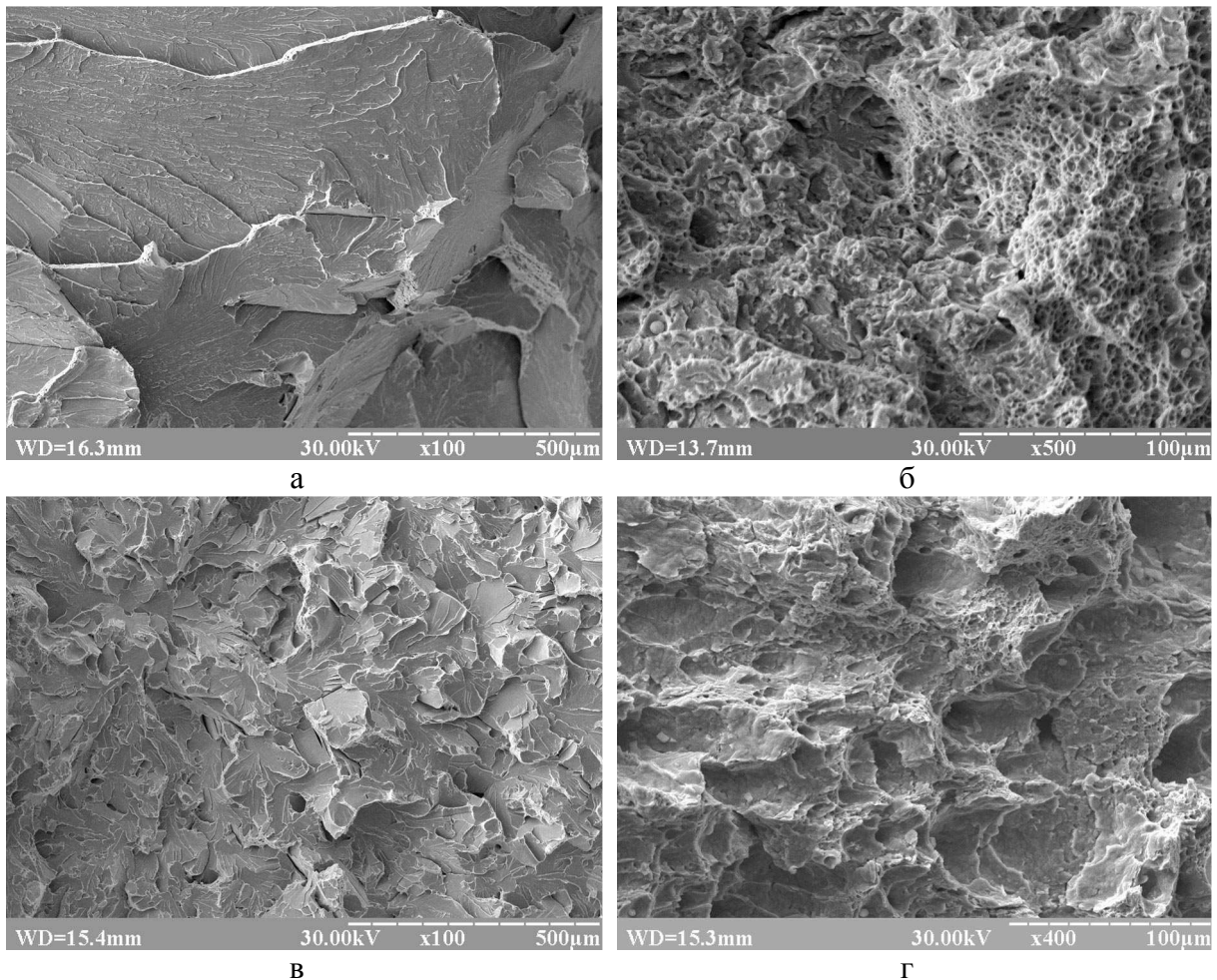


Рисунок 3- Фрактограми поверхонь руйнування після ударного навантаження зразків зі сталей 15Х13МФ (а), 18Х11МНФБ (б), 25Х1М1Ф (в), та 35Г2 (г)

Важливими є закономірності руйнування біметалевих зразків, коли під час руйнування відбувається перерозподіл енергії і низька енергомісткість руйнування ферито-мартенситної сталі захисного шару із низькою пластичністю компенсується значною пластичністю ферито-перлітної сталі основи ролика.

На основі проведених досліджень можна стверджувати, що найменшу чутливість до ударного навантажування буде мати сталь 25X1M1Ф, проте вона не володіє високою міцністю, що приводить до підвищеного зношування конструкції. Сталь 15X13MФ має низьку енергоємність динамічного руйнування та порівняно низькі показники міцності. Це зумовлено наявністю мартенситної структури та значною кількістю домішкових атомів у субструктурі матеріалу, що викликає блокування переміщення дислокацій. Крім того, під час відцентрового відливання та охолодження матеріалу, очевидно, формується гетерогенна структура та відбуваються процеси нерівномірного розподілу дислокацій. Процеси стоку та анігіляції дислокацій можуть приводити до виникнення в структурі локальних знеміцнених ділянок, а накопичення дислокацій біля дисперсних фаз викликає утворення локальних концентраторів напружень.

Досить високі значення *KCV* має біметал при поширенні тріщини зі сталі 18X11MНФБ у 35Г2. Це зумовлено достатньо високими показниками міцності та значною пластичністю основи ролика. Якщо тріщина поширюватиметься у зворотному напрямку - зі сталі 35Г2 у 18X11MНФБ, руйнування буде крихким, із малою енергомісткістю.

Згідно з одержаними результатами, встановлено, що збільшення питомої частки пластичної складової в біметалі приводить до зростання значень динамічної роботи руйнування, проте знижується межа міцності (рис. 2). Одержані результати задовільно узгоджуються із закономірностями руйнування біметалевих зразків, розглянутих у праці [8].

### **Висновки**

Встановлено основні закономірності руйнування моно- та біметалевих зразків, виготовлених зі сталей роликів МБЛЗ, за динамічного руйнування при наявності концентраторів напружень.

Проведено оцінку чутливості матеріалів роликів МБЛЗ до динамічного навантажування за наявності концентраторів напружень при одночасному забезпеченні міцності розрахованої на основі даних твердості з використанням "правила сумішей".

Найнижчу чутливість до концентрації напружень із одночасним збереженням високої тримкої здатності має біметал 18X11MНФБ/35Г2 при поширенні тріщини зі сталі 18X11MНФБ. Одержані результати дозволяють зробити висновки про підвищення ресурсу роликів МБЛЗ, виготовлених з даних матеріалів. Проте за наявності концентраторів напружень в основі наплавленого ролика - сталі 35Г2, опір руйнуванню за динамічних перевантажень істотно знижується. Таким чином, необхідно проводити додатковий контроль якості вихідних поковок, з яких виготовляють ролики з наплавленим захисним шаром, на наявність концентраторів напружень.

***Роботу виконано за рахунок бюджетних коштів Державного фонду фундаментальних досліджень, реєстраційний номер 0107U004213.***

### **Література**

1. Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф. С. Домбровский, Л. К. Лещинский.-К.: Институт электросварки им. Е. О. Патона, 1995.-198 с.
2. Восстановительная наплавка порошковой проволокой деталей металлургического и горнодобывающего оборудования / Л.Н. Орлов, А.А. Голякевич, В.И. Титаренко, В.Н. Пелешко // Автоматическая сварка.-2005.-№12.-С. 45-50.
3. Lee K.-S., Song Ji-Ho Estimation methods for strain-life fatigue properties from hardness // International Journal of Fatigue.-2006.-Vol. 28.-P. 386-400.
4. Марковец М.П., Борисов В.Г., Матюнин В.М. О возможности контроля ударной вязкости стали безобразцовым методом // Известия ВУЗов. Машиностроение.-1970.-№1.-С. 17-21.
5. Меандров Л.В. Двухслойные коррозионностойкие стали. - М.: Металлургия, 1970.-228 с.
6. Ясній П.В., Гладь В.Б., Марущак П.О. Вплив структури на мікромеханізми руйнування наплавленого шару ролика слябової машини безперервного лиття заготовок при ударному навантаженні // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"). - Луцьк, 2007. - Випуск 20. - С. 591-595.

7. Yasniy P.V., Maruschak P.O., Hlado V.B. Effect of temperature, frequency and loading waveform on fatigue crack growth in bimaterial of the roll for continuous casting mashines // Selected reviewed papers presented at PRO-TECH-MA '05. – Rzeszow, 2005. – P. 117-125.
8. Назарчук А.Т. Изучение влияния соотношения слоев с различными свойствами на механические характеристики двухслойных стальных образцов // Автоматическая сварка.-1992.-№7-8.-С. 27-29, 32.

*Одержано 25.08.2007 р.*