

МАШИНОЗНАВСТВО. ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 670.191.33

Д.Я. Баран, м.н.с.**В.Б. Гладько, к.т.н., доц.****П.О. Марущак, к.т.н., доц.***Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя***О.В. Носоченко, д.т.н., проф.***ВАТ МК "Азовсталь"***П.В. Ясній, д.т.н., проф.***Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

ВПЛИВ МІКРОСТРУКТУРИ НА ДИНАМІЧНУ В'ЯЗКІСТЬ РУЙНУВАННЯ СТАЛІ З НАПЛАВЛЕНИМ ЗАХИСНИМ ШАРОМ

Досліджено вплив напрямку поширення тріщини в біметалевих зразках (з основи і наплавленого шару), температури та розмірів зразків на ударну в'язкість та енергоємність зародження та поширення тріщин в біматеріалі ролика МНЛЗ. Проаналізовано вплив мікроструктури на енергетичні параметри динамічного руйнування зразків.

Вступ. Ролики машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) експлуатуються при малих швидкостях обертання та піддаються значним термомеханічними і динамічними навантаженням. Динамічні напруження можуть виникати, зокрема, при проходженні холодного кінця заготовки [1].

Робоча поверхня роликів наплавляється порошковими дротами з метою одержання високохромистого жаро- та зносостійкого шару та збільшення ресурсу конструкції з можливістю ремонтного переточування під новий експлуатаційний розмір. Проте забезпечення однорідності наплавленого шару із дотриманням нормативним вимог залишається актуальною проблемою [1].

Зокрема ЗАТ "НКМЗ" виготовляє ролики діаметром від 100 до 300 мм із наплавленим захисним шаром твердістю 40...50 HRC глибиною 3...6 мм, що становить від 15 до 30 % від товщини ролика. Наплавлений захисний шар має підвищену твердість та зносостійкість, порівняно з монометалевим роликом. Проте відомо, що зростання твердості матеріалу може спричинити зменшення його в'язкості руйнування [2, 3]. Крім того, наплавлений шар має неоднорідну мікроструктуру та включення, що є додатковими концентраторами напружень [1, 4].

Мета. В роботі досліджували мікроструктуру композиції, та вплив наплавки на параметри руйнування біметалу за умов динамічного навантаження: енергоємність зародження та поширення тріщини.

Методика дослідження і матеріали. Досліджували біметал ролика діаметром 100 мм, що був встановлений на підвісці під кристалізатором МБЛЗ металургійного комбінату "Азовсталь". Несучий шар ролика виготовлений на ЗАТ "НКМЗ" з суцільнокованої заготовки довжиною 500...700 мм. Захисний шар наплавлений порошковим дротом за технологією фірми "Сіменс-ФАГ" (Австрія). Загальна товщина стінки ролика становить 18 мм. Ударну в'язкість досліджували на зразках Шарпі з розташуванням надрізу з боку несучого (основного) та з боку захисного (наплавленого) металів, твердість, мікротвердість та мікроструктуру обох металів.

Шліфи для вимірювання твердості і мікротвердості вирізали перпендикулярно до повздожньої осі ролика. Твердість матеріалів визначали приладом Супер Роквел, мікротвердість біля зони сплавлення вимірювали мікротвердоміром ПТМ-3, при навантаженні 1 Н та витримці 12 с.

Мікроструктуру основного та наплавленого металу досліджували на електронному просвічувальному мікроскопі ПЕМ-125К методом тонкої фольги. Об'єкти для мікроструктурних досліджень вирізали у повздожньому напрямку ролика. Остаточне стоншення об'єктів з обох сталей для отримання тонкої фольги досягали методом струминного електролітичного полірування.

Ударну в'язкість визначали на зразках розмірами 10×10×55 мм із V-подібним надрізом радіусом 0,25±0,025 мм з боку основного металу (тип I) та з боку наплавленого (тип II). Випробування проводили на копрі РКР-300 з енергією удару 300 кДж та реєстрацією діаграми навантаження в координатах "зусилля удару-час" та "зусилля удару-прогин зразка". Схему вирізки і форму зразків для випробування на ударну в'язкість обирали з умов моделювання поширення тріщини в роликів МБЛЗ під час експлуатації. В процесі роботи ролика МБЛЗ втомні тріщини зароджуються на поверхні ролика і розвиваються в радіальному напрямку, тому зразки вирізали вздовж осі обертання ролика. Товщина шарів зразка після фінішних операцій становила: для наплавленого – 3,6 мм, для основного – 6,4 мм. Оскільки термоцикл ролика за експлуатаційних умов приблизно +100...320 °С, випробування проводили при +20 та +100 °С.

Крім того, на копрі ВКМ-5 досліджували біметалеві зразки з однаковою товщиною наплавленого та несучого шарів розміром 55×27,5 мм із радіусом надрізу $0,125 \pm 0,0125$ мм за температур +20, +100, +250 °С. Всі дані з ударної в'язкості, що стосуються цих зразків, містять індекс "м".

Ударну в'язкість визначали за формулою [3]:

$$KCV = A / F, \quad (1)$$

де A – повна робота руйнування зразка; F – площа поперечного перерізу зразка в місці надрізу.

Програма запису та обробки інформації під час випробувань VUHI-CHARPY на копрі РКР-300 дозволяє визначати величину складових енергій руйнування зразка за допомогою перетворення залежності "навантаження–час" ($P-t$) в залежність "навантаження–переміщення" ($P-s$). Для цього за відомою масою ударника (навантажувального пристрою) m , початковою швидкістю удару v_0 та залежністю $P(t)$ за допомогою подвійного послідовного інтегрування обчислювали зміну швидкості ударника $v(t)$ при навантаженні зразка Шарпі згідно з рекомендаціями [5, 6]:

$$v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t P(t) dt$$

після чого залежність переміщення ударника s від часу t :

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt .$$

За одержаними залежностями обчислювали значення $P(s)$ та складові енергетичних витрат на окремих етапах руйнування зразка.

Аналізували загальну роботу руйнування матеріалу (A) для зразків, а також її складові – роботу зародження (A_3) та росту тріщини (A_p) [5]:

$$A = A_3 + A_p . \quad (2)$$

Твердість, мікротвердість та хімічний склад матеріалів. З метою виявлення границі розділу між основним та наплавленим шарами попередньо поліровану поверхню шліфа змачували 10 % розчином HNO_3 . Макроаналізом на мікроскопі МБС-10 було встановлено, що товщина наплавленого шару складає ~3,6 мм, лінія сплавлення не має хвилястості, пори відсутні. Хімічний склад матеріалів ролика визначали за методом спектрального аналізу на установці МЦС-8 (табл. 1). За хімічним складом ролик виготовлений зі сталей таких марок: основний метал – 35Г2; наплавлений шар – 18Х11МНФБ.

Таблиця 1

Хімічний склад сталей ролика МБЛЗ з наплавленим робочим шаром, %

Марка сталі	C	Si	Ni	Cu	Cr	Mn	Mo	V
35Г2	0,35	0,25	0,3	0,3	0,3	1,4	–	–
18Х11МНФБ	0,18	0,6	1,0	–	11	1,0	0,7	0,2

Наплавлений шар, сталь 18Х11МНФБ, містить ряд легуючих елементів, що сприяють його експлуатації за умов високотемпературної втоми. Вміст хрому 11 % сприяє жаростійкості сталі та зменшує її окислення. Наявність ~0,2 % ванадію сприяє утворенню стабільних карбідів та перешкоджає переходу молібдену з твердого розчину в карбідну фазу під час тривалої експлуатації. Нікель зменшує вміст в структурі сталі δ -фериту, що сприяє підвищенню в'язкості та жаростійкості [1, 4].

Відомо, що наплавлені порошковими дротами ролики повинні мати нормовану твердість та однорідність наплавленого матеріалу [3].

Вимірювали твердість матеріалів основи (сталь 35Г2) та наплавленого (сталь 18Х11МНФБ) шарів. Найбільша твердість 475 HV виявлена у поверхневому шарі наплавки, з наближенням до зони сплавлення твердість зменшується до 415 HV (рис. 1, а). В основному металі твердість лінійно зменшується від 210 HV біля зони сплавлення до 160 HV біля внутрішньої поверхні шліфа.

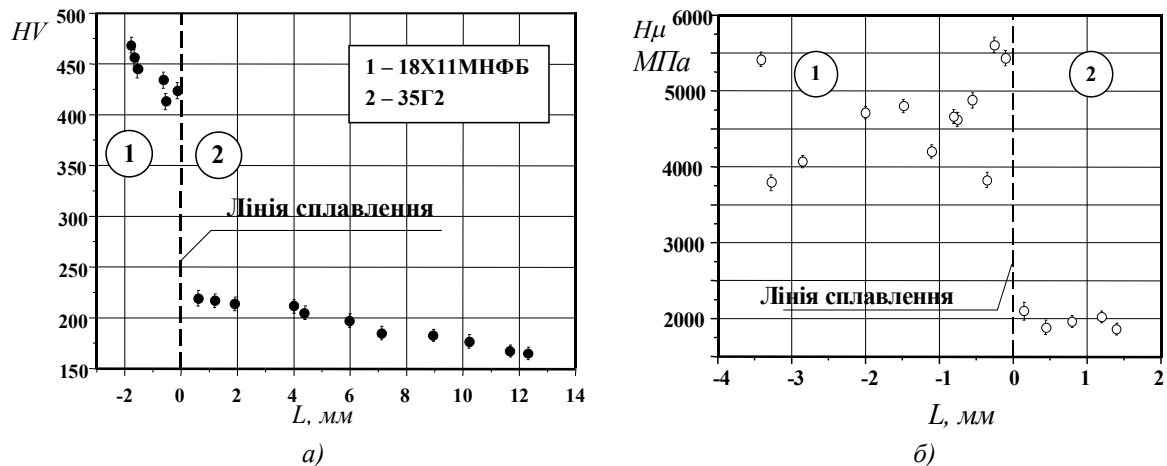


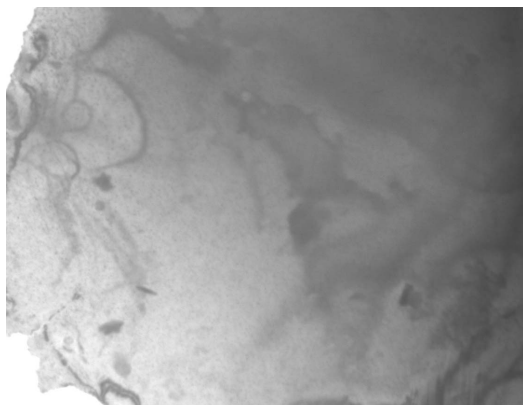
Рис. 1. Твердість (а) та мікротвердість (б) основного (2) та наплавленого (1) шарів

Виявлено, що мікротвердість основи ролика на відстані до 1,5 мм від поверхні сплавлення приблизно однакова, з незначним розкидом значень в межах 1800–2200 МПа (рис. 1, б). Для наплавленого металу на відстані 0,1..0,15 від поверхні сплавлення спостерігали локальне зростання мікротвердості до 5430 МПа, в діапазоні 0,5...1,5 мм мікротвердість становила 3800...4880 МПа. На відстані 3,5 мм від поверхні мікротвердість зменшується до 3820 МПа. Мікротвердість біля зовнішньої поверхні ролика (на відстані 0,15...0,2 мм) становила 5410 МПа, що пов'язано зі зміцненням (зростанням густини дислокацій) після поверхневої термообробки. Локальне зростання мікротвердості біля поверхні сплавлення, очевидно пов'язане із процесами виділення карбідів по границям зерен наплавленого металу [1]. Таким чином, мікротвердість наплавленого шару має значний розкид значень від 3800 до 5430 МПа, що є наслідком неоднорідності мікроструктури, утвореної в процесі наплавлення.

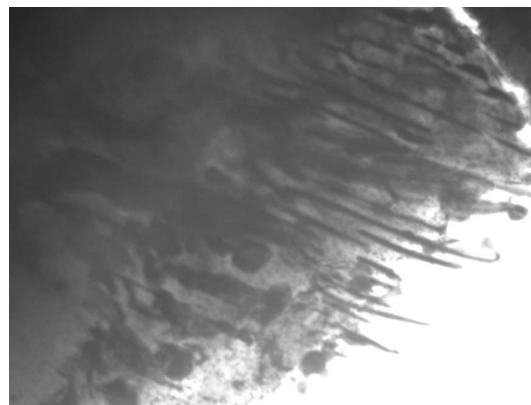
Мікроструктура сталей ролика. Сталь несучого шару ролика 35Г2 належить до середньовуглецевих сталей ферито-перлітного класу. Електронно-мікроскопічні дослідження виявили наявність структурно-вільного фериту (рис. 2, а), перлітних колоній, які розташовані в різних частинах феритних зерен (рис. 2, б, в), і карбідних виділень (цементиту), витягнутої та глобулярної форм (рис. 2, г). За оцінкою дисперсності цементитних пластин, структуру можна класифікувати як сорбіт.

Сталь наплавленого шару ролика 18X11MНФБ належить до сталей ферито-мартенситного класу. Мартенситні ділянки структури є рейковим дислокаційним мартенситом. Структура пакетів мартенситу характеризується системою паралельних рейок різного розміру (рис. 3, а, в). Всередині мартенситних рейок і в фериті спостерігаються ділянки дислокаційної структури з плямистим контрастом. Причому контраст зображення від дислокацій важко відрізнити від контрасту, що викликаний дисперсними виділеннями (рис. 3, б, г). Такий контраст, що спричинює розмитість зображення дислокаційних ліній обумовлений, очевидно, наявністю значної концентрації атмосфер із атомів домішок на дислокаціях, які обумовлюють ефект блокування руху дислокацій.

Також всередині мартенситних рейок і у фериті спостерігаються виділення "масивних" карбідів і дисперсні виділення, які істотно впливають на механічні властивості сталі 18X11MНФБ, оскільки є ефективними бар'єрами на шляху переміщення дислокацій (рис. 3, б). Мікропори виявлено переважно біля масивних включень, що утворились, очевидно, під час технологічного процесу наплавлення захисного шару ролика (рис. 3, в, г).



а)



б)

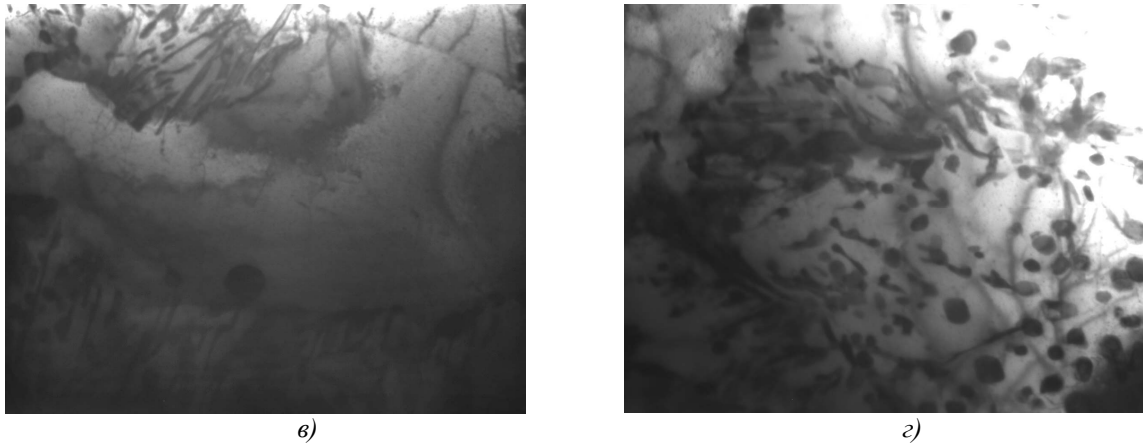


Рис. 2. Мікроструктура сталі 35Г2: а – структурно-вільний ферит; б, в – перлітні колонії; г – карбідні виділення витягнутої та глобулярної форм ($\times 30000$)

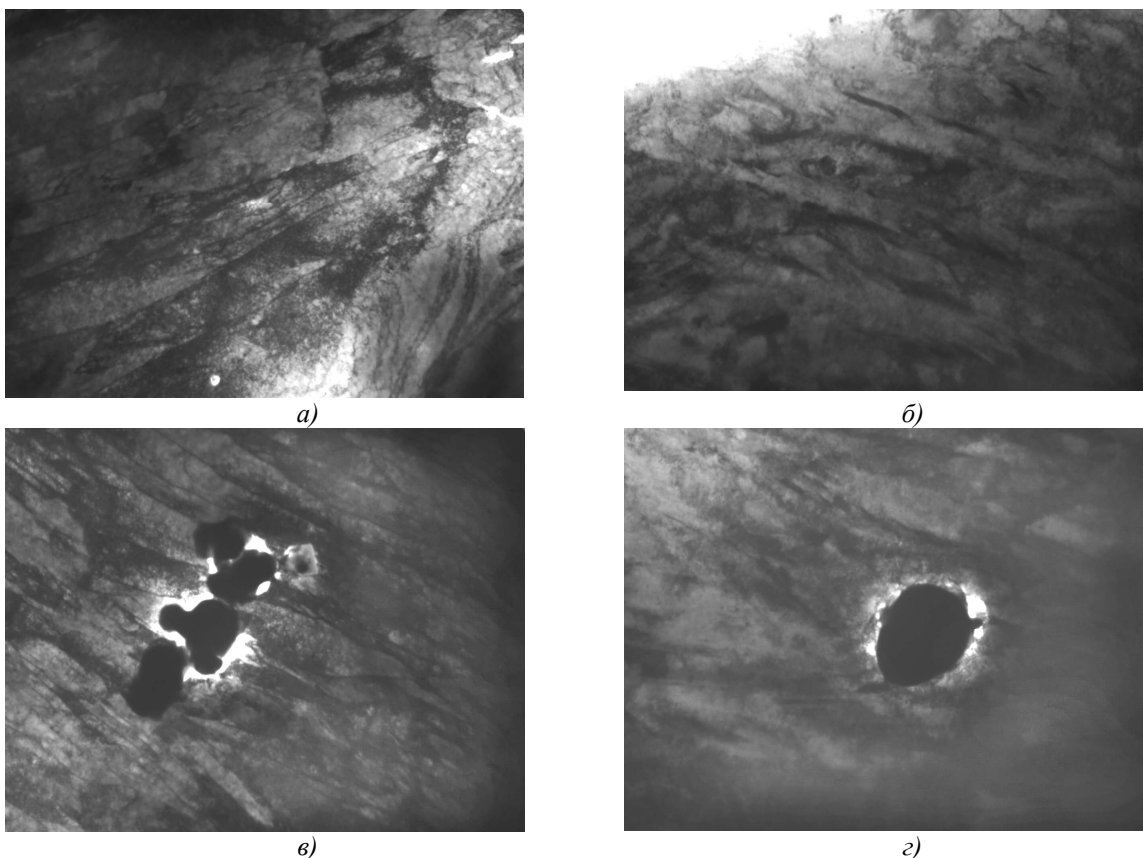


Рис. 3. Мікроструктура сталі 18Х11МНФБ: а – рейковий дислокаційний мартенсит; б – карбідні виділення; в, г – мікропори біля масивних включень ($\times 30000$)

Ударна в'язкість матеріалів. Діаграми ударного руйнування біметалевих зразків типів I і II в координатах “зусилля–час” та “витрати енергії на руйнування–час” показані на рис. 4. Результати експериментальної оцінки в'язкості руйнування, в тому числі складові енергії руйнування, надано в табл. 2, де P_{\max} і P_{02} – найбільше зусилля та зусилля початку текучості відповідно, E , E_z , E_n – повна енергія руйнування, енергія зародження та енергія поширення тріщини відповідно. На експериментально отриманих за допомогою копра РКР-300 діаграмах динамічного руйнування (рис. 4) помітні зубчасті коливання, які усувались програмно методом поточного усереднення [7].

Виявлено, що для зародження тріщини в біматеріалі з надрізом в сталі 18Х11МНФБ (тип II) необхідно в 1,5...1,7 разів менше енергії, ніж при зародженні тріщини з боку сталі 35Г2 основного шару (тип I). Характер одержаних діаграм руйнування для зразків II типу свідчить, що сталь 18Х11МНФБ має низьку пластичність, що призводить до швидкого зародження тріщини. Найбільше зусилля та зусилля початку текучості діаграм деформування даних зразків є на 20...25 % нижчими, порівняно зі зразками I типу (табл. 2). Низька пластичність та крихкість сталі 18Х11МНФБ обумовлена характером мікроструктури даної сталі: наявністю пакетів рейкового мартенситу, значної концентрації атмосфер із

атомів домішок на дислокаціях, карбідних включень, що обумовлюють ефект блокування руху дислокацій, мікропор, та загальною неоднорідністю мікроструктури, що утворена в процесі наплавлення.

Сталь 35Г2, навпаки, завдяки своїй мікроструктурі є досить пластичною, тому діаграма динамічного руйнування зразків I типу забезпечує інтенсивне зростання витрат енергії на початковому етапі зародження тріщини.

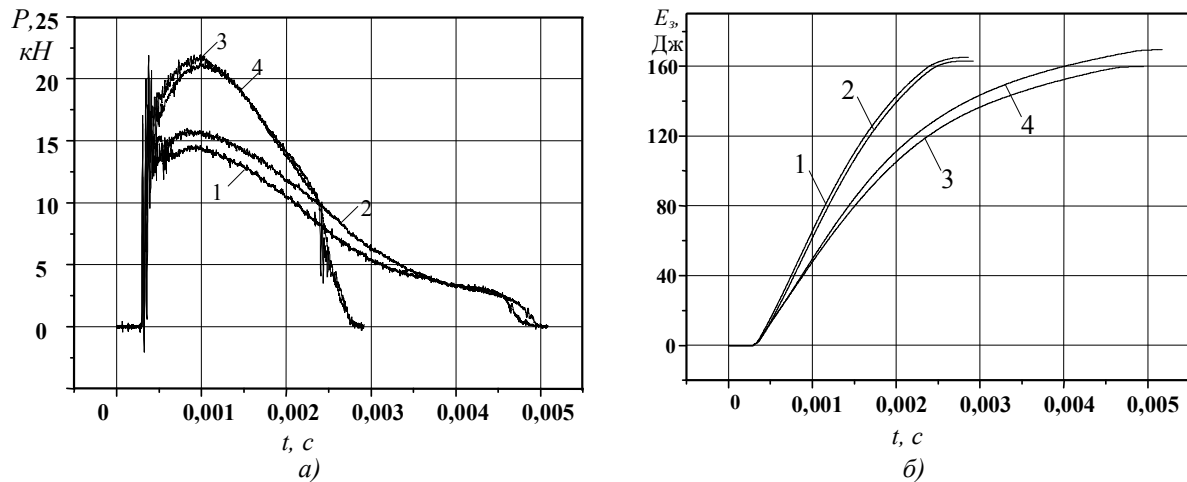


Рис. 4. Діаграми ударного руйнування біметалевих зразків в координатах: а – “зусилля–час”; б – “витрати енергії на руйнування–час”; із розташуванням надрізу у наплавленому шарі (1, 2) та у несучому (3, 4) шарі за температур $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1, 3) та $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2, 4)

Важливими для розуміння поширення ударної тріщини в біметалевих зразках є спадаючі ділянки діаграми динамічного руйнування. На даних ділянках особливо відчутним є вплив характеристик матеріалу тильної частини зразків. Дуже істотно (в 1,4...1,9 раза) зростає робота поширення тріщини в зразках II типу. Тривалість даної стадії руйнування становить близько 0,004 с, що приблизно в 2 рази більше, ніж для зразків I типу. Для зразків I типу спадаюча ділянка діаграми динамічного руйнування має стрімкий нахил, що свідчить про швидке вичерпування тримкої здатності матеріалу тильного боку зразка та долот. Тривалість даної стадії для зразків I типу складає 0,002 с.

Аналіз діаграм динамічного руйнування металу зразків свідчить про перерозподіл енергії руйнування по етапах деформування. Кінетику зміни витрат енергії на динамічне руйнування наведено на рис. 4, б; чисельні значення перерозподілу енергії на окремих етапах руйнування зведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати експериментальної оцінки в'язкості руйнування

Тип зразка	$t, ^\circ\text{C}$	E_z	E_p	E_n	P_{\max}	P_{02}	K_{CV}
I	20	69	96,1	165	21,8	16,3	2,06
	100	61,3	105,2	166	21,1	14,6	2,08
II	20	41,0	130,5	171	15,9	11,3	2,14
	100	41,6	118,2	159	14,5	–	1,99

Характер діаграм руйнування для зразків з надрізом в основному металі відповідає “множинному руйнуванню” [8]. Збільшення температури від +20 до +100 °С призводить до незначного зменшення енергоємності зародження тріщини E_z з 23,8 до 18,3 % від загальної роботи руйнування (E_n). Загальна в'язкість руйнування для даних зразків лежить в межах розкиду.

Оскільки при випробуванні зразків поперечним перерізом 10×10 мм з глибиною надрізу 2 мм вирізається значна частина наплавленого шару, то динамічну в'язкість руйнування визначали також для зразків (“м”) поперечним перерізом 5×5 мм, де питома товщина кожного з шарів становила 50 % товщини зразка. Це дозволило більш повно врахувати вплив кожної з складових на в'язкість руйнування біметалевого зразка [9]. Вплив температури на в'язкість руйнування зразків “м” типу I і II наведено на рис. 5.

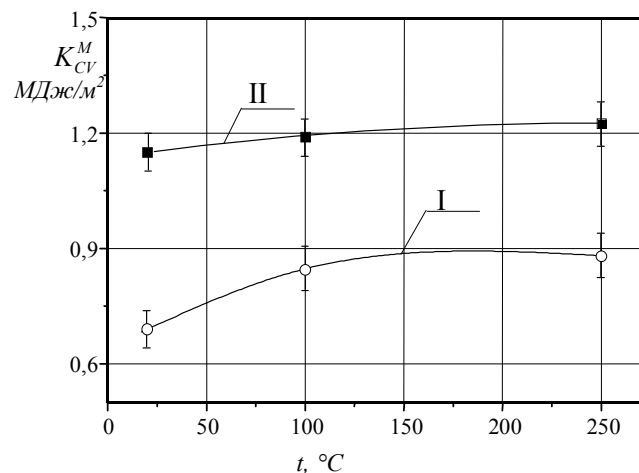


Рис. 5. Залежність в'язкості руйнування “малих” зразків типу I та II від температури

Виявлено, що при температурі +20 °С динамічна в'язкість руйнування “малих” зразків типу II більша, ніж зразків типу I в 1,7 раза. Зі збільшенням температури випробувань до +250 °С вказане відношення складає 1,4 раза.

Порівнюючи експериментальні дані для різних типорозмірів зразків (табл. 2 та рис. 5), виявлено, що динамічна в'язкість руйнування не чутлива до напрямку поширення тріщини для зразків із перерізом 10×10 мм, проте для зразків 5×5 мм даний фактор є визначальним. На нашу думку, це може бути обумовлено ефектом масштабу і, відповідно, різною часткою в'язкої та крихкої складової в зламі.

Висновки. Досліджено вплив напрямку поширення тріщини в біметалевих зразках (з основи і наплавленого шару), температури та розмірів зразків на ударну в'язкість та енергоємність зародження та поширення тріщин в біматеріалі ролика МНЛЗ (основа–сталь 35Г2, наплавлений шар–сталь 18Х11МНФБ).

Виявлено, що при ударному навантаженні для зародження тріщини з наплавленого шару необхідно в 1,5...1,7 разів менше енергії, ніж з основного шару, а для поширення тріщини – в 1,4...1,9 рази більше. Встановлено, що ударна в'язкість “малих” зразків типу II в 1,7 раза більша, ніж зразків типу I при температурі + 20 °С і 1,4 раза більша при +250 °С.

Проаналізовано вплив мікроструктури на енергетичні параметри динамічного руйнування біметалевих зразків. Пластичність сталі 35Г2 обумовлена гомогенною ферито-сорбітною структурою. Низька пластичність та крихкість сталі 18Х11МНФБ обумовлена її мікроструктурою: наявністю мартенситу, значною концентрації атмосфер із атомів домішок на дислокаціях, карбідними включеннями, що обумовлюють ефект блокування руху дислокацій, мікропорами, та загальною неоднорідністю мікроструктури, що утворена в процесі наплавлення.

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. Строение и свойства биметаллических материалов: Коллективная монография / А.И. Тананов, В.Д. Катихин, И.С. Гузь и др. – М.: Изд-во Наука, 1975. – 124 с.
3. Наплавка роликов МНЛЗ / В.А. Коротков, И.Д. Михайлов, А.С. Веселов, В.Р. Тагильцева // Сталь. – № 8. – 2003. – С. 60–63.
4. Карпенко В.М., Невидомский А.В. Повышение работоспособности роликов МНЛЗ наплавкой порошковой проволокой // Тез. докл. научного семинара “Современные достижения в области сварки, наплавки и родственных технологий”. – Мариуполь, 2000. – С. 122–125.
5. ISO 14556. Steel Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. – 05.01.2005.
6. Влияние температуры и скорости нагружения на энергию зарождения и распространения трещин в образцах Шарпи из углеродистых сталей / В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.Н. Жмака и др. // Проблемы прочности. – 2006. – № 5. – С. 120–127.
7. Angamuthu K., Guha K. D.R.G. Achar Investigation of dynamic fracture toughness (J_{Id}) behaviour of strength mis-matched Q & T steel weldments using instrumented Charpy impact testing // Engineering Fracture Mechanics. – 1999. – Vol. 64. – Pp. 417–432.
8. Трещиностойкость многослойного наплавленного металла упрочненного высококонцентрированным источником нагрева / Л.К. Лещинский, С.С. Самогугин, И.И. Пирч и др. // Сварочное производство. – 1987. – № 4. – С. 23–25.
9. 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.

БАРАН Денис Ярославович – молодший науковий співробітник кафедри матеріалознавства Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування.

Тел. 8(0352) 25-35-09.

ГЛАДЬО Володимир Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування;

– трансмісійна електронна мікроскопія.

Тел. 8(0352) 25-35-09.

E-mail: labmat@tu.edu.te.ua

МАРУЩАК Павло Орестович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів та виробництв Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування;

– довговічність металургійного обладнання.

Тел. 8(0352) 25-35-09.

E-mail: Maruschak@tu.edu.te.ua

НОСОЧЕНКО Олег Васильович – доктор технічних наук, професор, начальник ЦЛМК, ВАТ МК“Азовсталь”.

Наукові інтереси:

– надійність і довговічність металургійного обладнання.

Тел. 8(0629) 22-73-27.

ЯСНІЙ Петро Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства, проректор з наукової роботи Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування.
Тел. 8(0352) 25-36-74.
E-mail: Yasniy@tu.edu.te.ua

Подано 15.12.06

Баран Д.Я., Гладь В.Б., Марущак П.О., Носоченко О.В., Ясній П.В. Вплив мікроструктури на динамічну в'язкість руйнування сталі з наплавленим захисним шаром

Баран П.О., Гладё В.Б., Марущак П.О., Носоченко О.В., Ясний П.В. Влияние микроструктуры на динамическую вязкость разрушения стали с наплавленным защитным слоем

УДК 670.191.33

Вплив мікроструктури на динамічну в'язкість руйнування сталі з наплавленим захисним шаром / Д.Я. Баран, В.Б. Гладь, П.О. Марущак, О.В. Носоченко, П.В. Ясній

Досліджено вплив напрямку поширення тріщини в біметалевих зразках (з основи і наплавленого шару), температури та розмірів зразків на ударну в'язкість та енергоємність зародження та поширення тріщин в біматеріалі ролика МНЛЗ. Проаналізовано вплив мікроструктури на енергетичні параметри динамічного руйнування зразків.

УДК 670.191.33

Влияние микроструктуры на динамическую вязкость разрушения стали с наплавленным защитным слоем / Д.Я. Баран, В.Б. Гладё, П.О. Марущак, О.В. Носоченко, П.В. Ясний,

Исследовано влияние направления распространения трещины в биметаллических образцах (с основы и наплавленного слоя), температуры и размеров срезов на ударную вязкость и энергоёмкость зарождения и распространения трещин в биматериале ролика МНЛЗ. Проанализировано влияние микроструктуры на энергетические параметры динамического разрушения образцов.