

Експериментальне дослідження механічної поведінки матеріалів методом продавлювання дискових мікроразривів

В. В. Харченко, А. Г. Макаєв, О. А. Каток, В. В. Бухановський, А. В. Богомолов

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Розроблено методику та експериментальне обладнання для проведення випробувань дискових мікроразривів. Експериментально опробовано методику на зразках зі сталі 45. Проведено порівняльний аналіз відомих методик визначення умовної границі плинності за діаграмами продавлювання дискових мікроразривів.

Ключові слова: метод продавлювання дискових мікроразривів, діаграма деформування, умовна границя плинності.

Вступ. Метод продавлювання дискових мікроразривів, відомий як small punch test (SP-Test), базується на реєстрації процесу деформування кулькою дискового мікроразрива, що жорстко затиснутий по периметру в спеціальному пристрої, у координатах навантаження, прикладеного до кульки, – глибина продавлювання мікроразрива [1–9].

Даний метод за своєю суттю близький до методу інструментованого інденування. Відмінність полягає в тому, що останній належить до методів неруйнівного контролю, тоді як при використанні методу продавлювання дискових мікроразривів необхідно виготовляти зразки специфічної дискової форми, до геометричних параметрів і шорсткості поверхні яких ставляться досить жорсткі вимоги. Використання даного методу передбачається у разі, якщо проведення традиційних випробувань на розтяг за ГОСТ 1497-84 [10] неможливе, оскільки зразки необхідно виготовляти з міні-вирізків. У світовій практиці за допомогою методу продавлювання дискових мікроразривів визначають характеристики міцності σ_B , $\sigma_{0,2}$ [2–9] та тріщиностійкості J_{Ic} , K_{Ic} [1, 5, 8], а також оцінюють температуру в'язко-крихкого переходу [6].

Модернізація лабораторної установки UTM-20HT для проведення випробувань методом продавлювання дискових мікроразривів. Для реалізації даного методу було використано лабораторну установку UTM-20HT [11], розроблену в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України для випробувань матеріалів методом інструментованого інденування, після її модернізації. Установка відповідає вимогам міжнародного стандарту ISO 14577 [12].

Основним вузлом установки, що забезпечує інденування навантаження, є вузол інденування. До його складу входять інденатор та вузол вимірювання глибини його вдавлення. Головним елементом інденатора є кулька, закріплена за допомогою різьби або вальцювання в оправі.

При використанні методу продавлювання мініатюрних дисків, на відміну від методу інструментованого інденування, глибина продавлювання значно перевищує радіус кульки. У процесі випробувань кулька продавлює зразок, у результаті чого в ньому виникає наскрізна тріщина, через яку проходить кулька.

Для реалізації методу продавлювання дискових мікроразривів було розроблено новий вузол вимірювання глибини продавлювання дискового мікроразрива (рис. 1), у якому модернізована оправа інденатора закінчується штоком, діаметр якого не перевищує діаметра кульки. На рис. 2 показано оправу інденатора до і після модернізації.

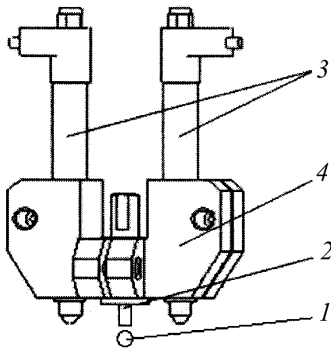


Рис. 1

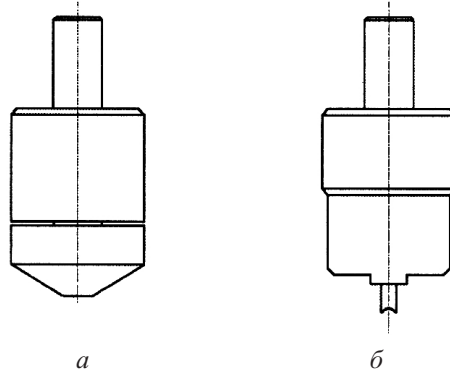


Рис. 2

Рис. 1. Вузол вимірювання глибини продавлювання дискового мікрозразка: 1 – кулька; 2 – оправа; 3 – датчики вимірювання глибини продавлювання дискового мікрозразка; 4 – кронштейн для кріплення датчиків вимірювання глибини продавлювання дискового мікрозразка.
Рис. 2. Оправа індентора до (а) і після (б) модернізації.

Конструктивно вузол вимірювання глибини продавлювання дискового мікрозразка складається з кульки, оправы, датчиків вимірювання глибини продавлювання дискового мікрозразка і кронштейна для кріплення цих датчиків (рис. 1). У кронштейні виконано три паралельні отвори. Центральний отвір використовується для кріплення оправы до кронштейна. У бокових отворах кріпляться датчики. Таке розташування датчиків дозволяє суттєво зменшити вплив деформування конструктивних елементів силового ланцюжка установки на точність отриманих результатів.

Для фіксації зразка на координатному столику установки було розроблено затискний пристрій (рис. 3), який складається з двох втулок, обойми, затискної гайки та циліндричного стакана. Зразок у цьому пристрої розташовують між верхньою і нижньою втулками, які вставляють в обойму та закріплюють за допомогою затискної гайки. Зібрану конструкцію розміщують у циліндричному стакані та жорстко закріплюють на координатному столику співвісно з навантаженням (рис. 4). У процесі випробування навантаження прикладається до зразка через кульку діаметром 2,5 мм із карбиду вольфраму.

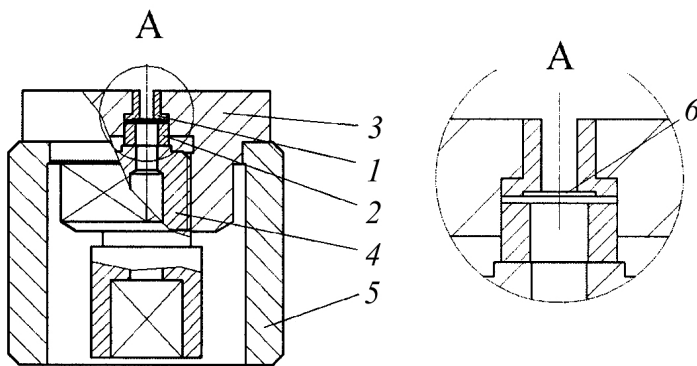


Рис. 3. Затискний пристрій для фіксації дискового мікрозразка на координатному столику: 1, 2 – верхня та нижня втулки; 3 – обойма; 4 – затискна гайка; 5 – циліндричний стакан; 6 – дисковий мікрозразок.

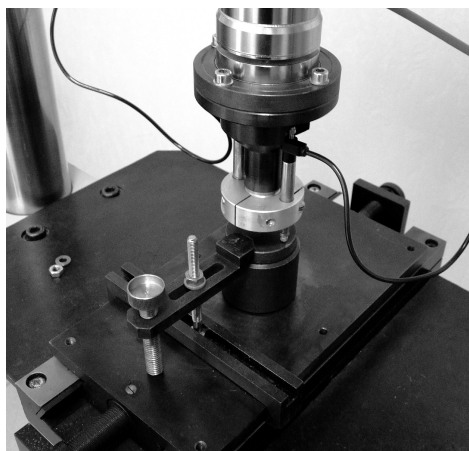


Рис. 4. Монтаж затискного пристрою з дисковим мікророзразком на координатному столику установки UTM-20HT.

Глибина продавлювання зразка вимірюється непрямим методом шляхом реєстрації переміщення оправы відносно поверхні обойми двома індуктивними датчиками лінійного переміщення, закріпленими за допомогою кронштейна на оправі. Зусилля, що прикладається до кульки в процесі випробування, вимірюється датчиком U3 з номінальним навантаженням 10 кН. Вимірювання переміщення штоку і його місцеположення забезпечуються датчиком резистивного типу RC13-150M.

Для керування процесом деформування кулькою зразка на модернізованій установці, вимірювання, накопичення і збереження параметрів експерименту в цифровому вигляді та у вигляді діаграм деформування в координатах навантаження F , що прикладається до кульки, – глибина продавлювання u дискового мікророзразка було розроблено програмне забезпечення (ПЗ). До його складу входять програми керування вимірювальною системою Spider-8 та аналоговою платою PIO-DA4. Окрім того, було розроблено оригінальну програму SP-Test, яка безпосередньо виконує функції керування процесом деформування кулькою дискового мікророзразка, збору даних, їх накопичення та представлення інформації у вигляді функцій залежностей F і u від часу t .

Випробування зразків проводиться за постійної швидкості переміщення індентора, що задається оператором. Передбачено систему захисту установки UTM-20HT у разі граничного положення рухомого штоку, перевантаження датчика навантаження і граничного положення рухомого штоку датчиків лінійного переміщення. У програмі передбачено збереження та подальшу роботу з даними випробування в двох форматах: у текстовому з розширенням “*.csv” для роботи з даними в програмах Excel, Origin і Axum, а також із розширенням “*.hrd” для роботи у розробленій програмі. У разі збереження даних у текстовому вигляді у файлі є вікно попереднього перегляду параметрів випробувань, які можна доповнити або змінити.

Методика проведення випробувань методом продавлювання дискових мікророзразків на модернізованому обладнанні. Випробування металів методом продавлювання дискових мікророзразків на лабораторній установці UTM-20HT проводяться за методикою, розробленою відповідно до вимог CWA 15627 [1]. При цьому рекомендується використовувати зразки діаметром $d = 8$ мм і товщиною $h = 0,5$ мм. Непаралельність робочих поверхонь (поверхня контакту кульки зі зразком та поверхня контакту зразка з нижньою втулкою затискного пристрою) не повинна перевищувати 0,001 мм. Граничне відхилення по товщині зразків із механічно обробленими робочими поверхнями сягає $\pm 0,005$ мм. Шорсткість R_a робочих поверхонь

зразка не перевищує 0,006 мкм за ГОСТ 2789, а шорсткість R_a бічних поверхонь – 0,8 мкм. Підготовку поверхні зразка слід проводити таким чином, щоб твердість робочої поверхні (наприклад, внаслідок нагрівання або поверхневого наклепу) не змінювалась, а за неможливості була зведена до мінімуму. На поверхні контакту зразка не повинно бути рідин або мастильних речовин, за винятком тих випадків, коли це необхідно для проведення випробувань. При випробуваннях температура навколишнього середовища знаходиться в межах $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. У процесі окремого випробування температурні умови мають бути стабільними і не відрізнятися від початкової температури випробування, що забезпечить високу точність вимірювання глибини продавлювання дискового мікроразка. Для уникнення значного збільшення податливості дослідного обладнання затискний пристрій разом із випробуваним зразком має бути жорстко закріплений на координатному столику установки за допомогою струбцини (рис. 4). При цьому навантаження затиску зразка в пристрої складає 11 кН·м.

Перед початком реєстрації процесу деформування кулькою зразка в координатах навантаження F , що прикладається до кульки, – глибина продавлювання u дискового мікроразка момент дотику індентором поверхні зразка визначається окремо для кожного випробування. Похибка при визначенні моменту дотику не повинна перевищувати 1% максимального переміщення індентора при продавлюванні зразка.

Для визначення моменту дотику необхідно підвести індентор до поверхні зразка зі швидкістю не більше 0,12 мм/хв до досягнення навантаження, рівного 2 Н. У разі зміни швидкості підведення індентора її значення необхідно заносити в протокол випробування. Після досягнення навантаження 2 Н показники датчиків навантаження та переміщення приводяться до нульових.

Діаграми в координатах навантаження F , що прикладається до кульки, – глибина продавлювання u дискового мікроразка – час τ можна порівнювати тільки в тому випадку, якщо серію випробувань проведено в одному режимі. Контрольовані параметри можуть змінюватися безперервно або ступенево. Режим випробування задається у вигляді часової залежності глибини продавлювання зразка. Згідно з даними робіт [1–9] швидкість v_{ind} глибини продавлювання зразка повинна знаходитись в інтервалі 0,2...2 мм/хв. В [1] рекомендується використовувати швидкість v_{ind} , рівну 0,48 мм/хв.

Швидкість розвантаження вибирають експериментально таким чином, щоб під час зменшення прикладеного навантаження можна було записати достатню кількість даних для побудови достовірної кривої розвантаження.

Під час випробування навантаження прикладається без ударів або вібрації, установка має бути захищена від потоків повітря і температурних коливань.

Визначення границі плинності сталі 45 методом продавлювання мініатюрних дисків. На сьогодні розроблено цілий ряд методик визначення механічних властивостей матеріалів за результатами випробувань дискових мікроразків на продавлювання. Більшість із цих методик базується на кореляційних залежностях між механічними властивостями і характером діаграм деформування циліндричного зразка та дискового мікроразка. Вперше методику визначення умовної границі плинності методом продавлювання дискових мікроразків було запропоновано у роботі [2], де для легованих сталей отримано лінійну залежність між умовною границею плинності $\sigma_{0,2}$ при одновісному розтязі традиційного циліндричного зразка і навантаженням F_y дискового мікроразка в момент переходу від пружної до пружно-пластичної деформації:

$$\sigma_{0,2} = \alpha F_y / t^2, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт матеріалу, для легованих сталей $\alpha = 360$; t – товщина зразка.

Із метою зменшення розкиду значень умовної границі плинності, оціненої за результатами продавлювання дискових мікроразків, кореляційна залежність (1) неодноразово уточнювалася. Так, в [3, 4] запропоновано при визначенні для реакторних сталей використовувати коефіцієнт α , рівний 375.

У роботі [7] для визначення умовної границі плинності за результатами продавлювання таких зразків пропонується кореляційна залежність, у якій окрім напруження враховується коефіцієнт Пуассона μ :

$$\sigma_{0,2} = 1,16(1 + \mu) \frac{F_y}{t^2}. \quad (2)$$

Іншу емпіричну залежність було представлено в роботі [8], де в одержаній експериментально залежності є новий геометричний параметр – радіус кульки індентора r :

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_y - 94,37}{0,158 \cdot 2\pi r t}. \quad (3)$$

Аналогічна залежність, отримана на основі теорії пластин і оболонок, знайшла експериментальне підтвердження для низьколегованої сталі 1Cr–0,5Mo та аустенітної нержавіючої сталі 18Cr–9Ni [9]:

$$\sigma_{0,2} = \frac{3F_y(1 + \mu)}{2\pi t^2} \ln \frac{a}{r'}; \quad (4)$$

$$r' = \sqrt{1,6r^2 + t^2} - 0,675t,$$

де r' – ефективний радіус рівномірно розподіленого навантаження в центрі зразка; a – радіус отвору в нижній затискній втулці.

Опробування вищезгаданих методик визначення умовної границі плинності методом продавлювання дискових мікроразків проведено на сталі 45. Було випробувано 15 зразків діаметром 8 мм і товщиною 0,5 мм. Діаграми продавлювання зразків записували за постійної швидкості переміщення індентора (0,48 мм/хв). Радіус кульки індентора дорівнює 1,25 мм. Типову діаграму продавлювання дискового мікроразка сталі 45 наведено на рис. 5.

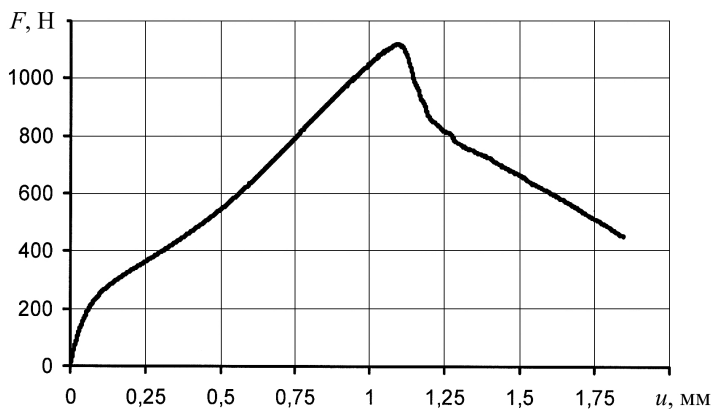


Рис. 5. Типова діаграма продавлювання дискового мікроразка сталі 45 в координатах навантаження F , що прикладається до кульки, – глибина продавлювання u мікроразка.

Випробування на розтяг проводили на установці Biss-100 згідно з ГОСТ 1497-84 [10]. Швидкість переміщення захвата складала 2 мм/хв. Досліджували циліндричні 5-кратні пропорційні зразки з робочим діаметром 5 мм. Деформацію зразка реєстрували тензорезисторним перетворювачем із базою $l_0 = 12,5$ мм. Середнє значення умовної границі плинності дорівнює 348 МПа, границі міцності – 672 МПа. За даними випробувань методом продавлювання дискового мікроразка визначали умовну границю плинності за вищезгаданими методиками. Отримані дані порівнювали з такими, що визначені за результатами випробувань на одновісний розтяг. Найкращий результат визначення границі плинності сталі 45 за діаграмами продавлювання дискового мікроразка отримано при використанні методики, запропонованої в роботі [2]. Розкид середніх значень умовної границі плинності, визначених за результатами випробувань на розтяг і шляхом продавлювання дискових мікроразків, не перевищує 2%. При використанні інших методик розкид середніх значень умовної границі плинності сягає 10% і вище.

Висновки

1. Удосконалено методику та модернізовано лабораторну установку UTM-20НТ для випробування металів методом продавлювання дискових мікроразків, а саме: розроблено новий вузол вимірювання глибини продавлювання дискового мікроразка та затискний пристрій для фіксації мікроразка на координатному столику.

2. Проведено порівняльний аналіз даних експериментів щодо визначення умовної границі плинності сталі 45 за діаграмами продавлювання дискових мікроразків за допомогою відомих методик. Визначено похибки результатів випробувань.

3. Встановлено, що найкращі результати визначення умовної границі плинності отримано за методикою [2], відхилення результатів за якою порівняно з даними випробувань на розтяг не перевищує 2%.

Резюме

Разработаны методика и экспериментальное оборудование для проведения испытаний дисковых микрообразцов. Экспериментально опробовано методику на образцах из стали 45. Проведен сравнительный анализ известных методик определения условной границы текучести по диаграммам продавливания дисковых микрообразцов.

1. *CWA 15627:2007*. Small Punch Test Method for Metallic Materials, 2007.
2. *Mao X. and Takahashi H.* Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for TEM disk small punch tests // *J. Nucl. Mater.* – 1987. – **150**. – P. 42–52.
3. *Spaetig P., Campitelli E., Bonade R., and Baluc N.* Assessment of plastic flow and fracture properties with small specimen test techniques for IMMIX-designed specimens // *Nucl. Fusion.* – 2005. – **45**. – P. 635–641.
4. *Campitelli E., Spaetig P., Bonade R., et al.* Assessment of the constitutive properties from small ball punch test // *J. Nucl. Mater.* – 2004. – **366**. – P. 366–378.
5. *Finarelli D., Roedig M., and Carsughi F.* Small punch tests on austenitic and martensitic steels irradiated in a spallation environment with 530 MeV protons // *Ibid.* – **328**. – P. 146–150.
6. *Contreras M., Rodriguez C., Belzunce F. J., and Betegon C.* Use of small punch test to determine the ductile-to brittle transition temperature of structural steels // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2008. – **31**. – P. 727–737.

7. *Lacalle R., Garcia J., Álvarez J. A., and Gutiérrez-Solana F.* Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos // *Anales de Mecánica de la Fractura*. – 2009. – **26**. – P. 501–506.
8. *Wang Zhao-Xi, Shi Hui-Ji, Lu Jian, et al.* Small pinch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses // *Nucl. Eng. Design*. – 2008. – **238**. – P. 3186–3193.
9. *Eskner M. and Sandstrom R.* Mechanical property evaluation using the small punch test // *J. Test. Eval.* – 2004. – **32**. – P. 1–6.
10. *ГОСТ 1497-84.* Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.86.
11. *Харченко В. В., Рудницкий Н. П., Каток О. А. и др.* Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования // *Надежность и долговечность машин и сооружений*. – 2007. – Вып. 27. – С. 140–147.
12. *ISO 14577-1:2002.* Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters. Test Method, 2002.

Поступила 07. 02. 2014