

Р. В. Кравчук

ОЦІНКА ВПЛИВУ УМОВ ЗАКРІПЛЕННЯ ДИСКОВОГО МІКРОЗРАЗКА НА ДІАГРАМУ ПРОДАВЛЮВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ

Одними з ключових параметрів, за якими здійснюють поточний контроль стану відповідального обладнання для забезпечення його надійної експлуатації, є механічні характеристики матеріалів конструкцій, зокрема, характеристики міцності. Найкоректнішим способом їх визначення є руйнівні випробування на одновісний розтяг зразків, виготовлених із досліджуваних матеріалів. Вирізка певного об'єму матеріалу, необхідного для виготовлення зразків, може бути критичною для несучої здатності конструкції. Через це розвиваються непрямі методи визначення механічних характеристик для мінімізації використовуваного для виготовлення зразків об'єму матеріалу. До них належить метод продавлювання дискових мікроразків. Оскільки цей метод не стандартизований, умови проведення випробувань дослідники обирають на власний розсуд. У цій роботі розглянуто вплив вибору одного з таких параметрів, а саме: сили затиску зразка, на результати досліджень. У якості модельного матеріалу було обрано сталь 45. Проведено чисельне моделювання як без урахування, так із урахуванням сили затиску зразка, що дорівнювала 5, 7,5 та 10 кН. При цьому значення еквівалентних напружень за Мізесом у защемленій зоні зразка не перевищувало 264 МПа. Для врахування процесу руйнування було використано модель Gurson – Tvergaard – Needleman (GTN). Задачу моделювали в динамічній постановці з використанням явної схеми інтегрування. Приведено діаграми продавлювання дискового мікроразка в координатах «навантаження» – «глибина продавлювання» за зазначених умов закріплення. За результатами досліджень встановлено, що сила затиску зразка не впливає суттєво на діаграму продавлювання, тому для зменшення часу чисельних розрахунків нею можна знехтувати. Рекомендовано під час проведення експериментальних випробувань силу затиснення зразка обирати таким чином, щоб не допустити пластичного деформування зразка в зоні защемлення.

Ключові слова: метод продавлювання дискових мікроразків, коефіцієнт тертя, дисковий мікроразок.

Вступ

Безпечна експлуатація відповідального обладнання в проектній та понадпроектній терміни є дуже важливим завданням у сучасних економічних умовах енергетичної галузі України. Одним із основних засобів забезпечення надійної експлуатації є контроль поточного стану матеріалів конструкцій та обладнання. Цей контроль здійснюється як візуальними засобами, дефектоскопією, так і за значеннями механічних характеристик матеріалів, зокрема, характеристиками міцності. Існує багато методів їх визначення. Але найкоректнішим методом є випробування на одновісний розтяг. Проте виготовлення зразків для таких випробувань потребує наявності певного об'єму металу, що у випадку обладнання, що працює, часто неможливе без порушення його цілісності та значного впливу на процес експлуатації. Виходом із цієї ситуації може бути розробка або вдосконалення непрямих методів визначення механічних характеристик, що використовують малорозмірні зразки.

Постановка завдання дослідження

Одним із методів, що дозволяє визначати механічні характеристики без завдання значної шкоди несучій здатності конструкції, є метод продавлювання дискових мікроразків [1 – 4]. Суть методу полягає в деформуванні дискового мікроразка індентором у формі кулі з реєстрацією при цьому діаграми продавлювання в координатах «навантаження» – «глибина продавлювання». Далі певні параметри цієї діаграми пов'язують із відповідними

механічними характеристиками за допомогою кореляційних співвідношень. Дисковий мікроразок певної товщини та діаметра виготовляють із мінівирізок матеріалу реальних конструкцій. Типова схема навантаження та закріплення дискового мікроразка зображена на рис. 1.

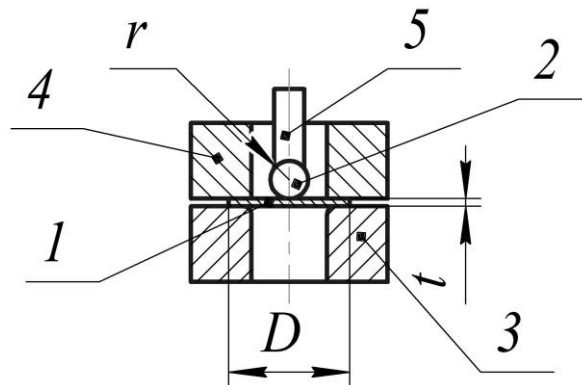


Рис. 1. Типова схема навантаження та закріплення дискового мікроразка: (1) – зразок; (2) – індентор; (3) – нижня затискна матриця; (4) – верхня затискна матриця; (5) – шток оправи індентора

На сьогодні не існує міжнародних стандартів, які чітко регламентували б проведення випробувань методом продавлювання дискового мікроразка. Основні напрацювання з розробки цього методу реалізовані лише в робочому документі з підготовки до стандартизації [5]. Через це науковці використовують у своїх дослідженнях різні геометричні параметри зразків та обладнання, а також умови проведення випробувань та закріплення зразка. Наприклад, під час проведення експериментальних випробувань використовують різні значення сили затиску зразка в експериментальному обладнанні. Автори публікації [6] затискали зразок навантаженням, яка дорівнює 7 кН. В іншому дослідженні [7] вчені використовували значення сили затиску, дорівнює 15 кН. Закріплення зразка навантаженням різної величини може впливати на діаграму продавлювання й відповідно на визначені за нею механічні характеристики.

Мета і завдання дослідження

Мета роботи – дослідити вплив умов закріплення дискового мікроразка в експериментальному обладнанні, а саме сили затиску.

Результати досліджень та їх обговорення

Дослідження впливу сили затиску дискового мікроразка між нижньою та верхніми затискними матрицями на діаграму продавлювання проводили за допомогою чисельного моделювання з використанням програмного забезпечення, що ґрунтується на методі скінченних елементів.

Завдяки осьовій симетрії моделі розглядали вісесиметричну контактну задачу в пружно-пластичній постановці. Геометричні параметри моделі, представлені на рис. 2а, вибрано з урахуванням конструкції експериментального обладнання, розробленого в Інституті проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України для проведення випробувань методом продавлювання дискового мікроразка [8]. При цьому індентор і шток його оправи (розглядали як одне ціле), а також верхню й нижню затискні матриці моделювали ідеально жорсткими тілами.

Переміщення індентора та штока його оправи обмежували в радіальному напрямку (рис. 2б). Нижню та верхню матриці розглядали в першому наближенні як жорстко защемлені.

Для моделювання взаємодії конструктивних елементів між собою було створено три контактні пари: індентор – зразок, зразок – верхня затискна матриця та зразок – нижня затискна матриця. Граничні умови контактних пар задавали в припущенні так, що сила тертя на поверхні контакту має нормальний і тангенціальний складники. Значення коефіцієнта тертя приймали рівним 0,18. Зразок моделювали вісесиметричними чотирикутними елементами. На рис. 2б наведено розрахункову схему моделі.

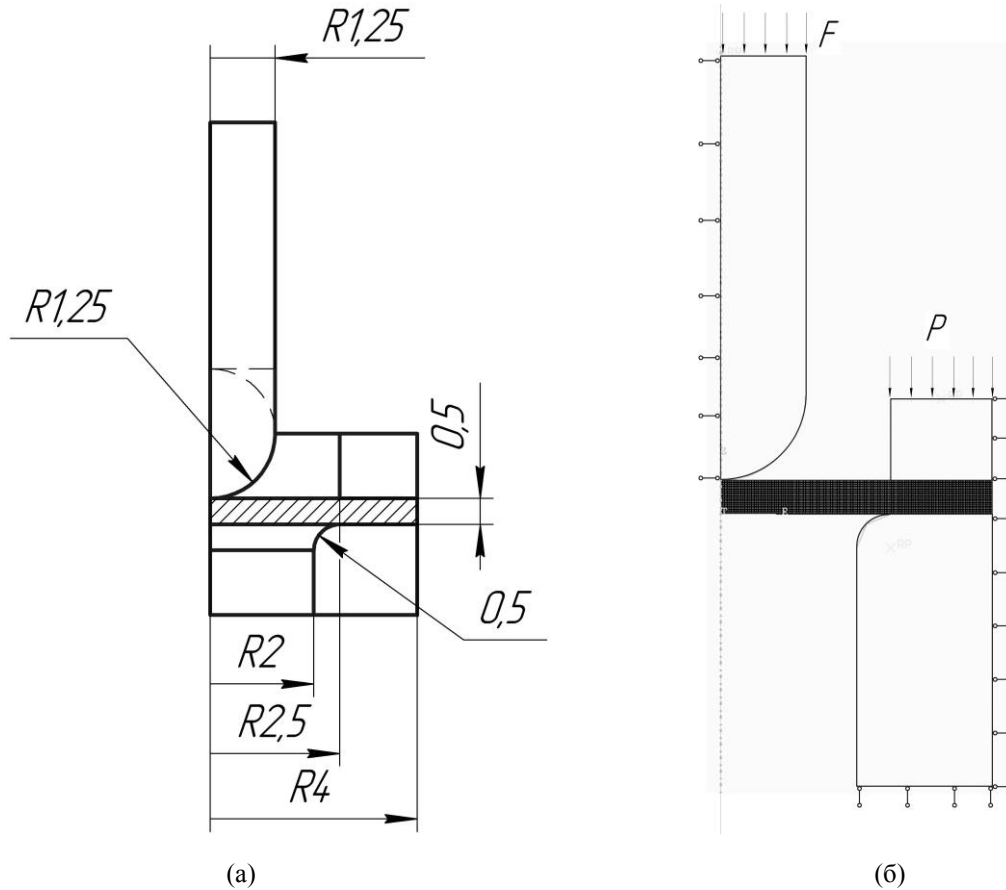


Рис. 2. Геометричні параметри моделі (а) та розрахункова схема (б) для чисельного моделювання процесу деформування дискового мікророзрка

У якості модельного матеріалу обрано сталь 45 в стані поставки з характеристиками: границя міцності $\sigma_b = 677,6$ МПа; границя текучості $\sigma_{0,2} = 353,9$ МПа; модуль Юнга $E = 199600$ МПа.

У першому наближенні матеріал моделювали без урахування процесу руйнування. Результати розрахунків при цьому суттєво відрізнялися від експериментальних (рис. 3). Для врахування процесу руйнування було використано модель Gurson – Tvergaard – Needleman (GTN) [9 – 11]. Така модель описує поведінку в'язкого пористого матеріалу й ураховує як утворення й ріст пор, так і механізм в'язкого руйнування, зумовлений їхнім злиттям.

Для оцінки впливу розмірів скінченних елементів (СЕ) на результати чисельного моделювання процесу продавлювання дискового мікророзрка було розглянуто розрахункові схеми з різними розмірами скінчених елементів: 0,08 мм; 0,04 мм; 0,02 мм і 0,01 мм. При цьому брали початкові значення параметрів моделі GTN для врахування процесу руйнування. Близькі криві «навантаження» – «глибина продавлювання» отримано для скінченно-елементних сіток із розмірами СЕ, що дорівнюють 0,02 мм і 0,01 мм, тому в подальших розрахунках використано розрахункову схему з розмірами скінчених елементів, що дорівнюють 0,02 мм. Це дозволило значно скоротити час розрахунків. Задачу при цьому

моделювали в динамічній постановці з використанням явної схеми інтегрування.

Для визначення параметрів моделі GTN проведено значну кількість розрахунків до досягнення задовільної збіжності чисельної й експериментальної діаграм продавлювання.

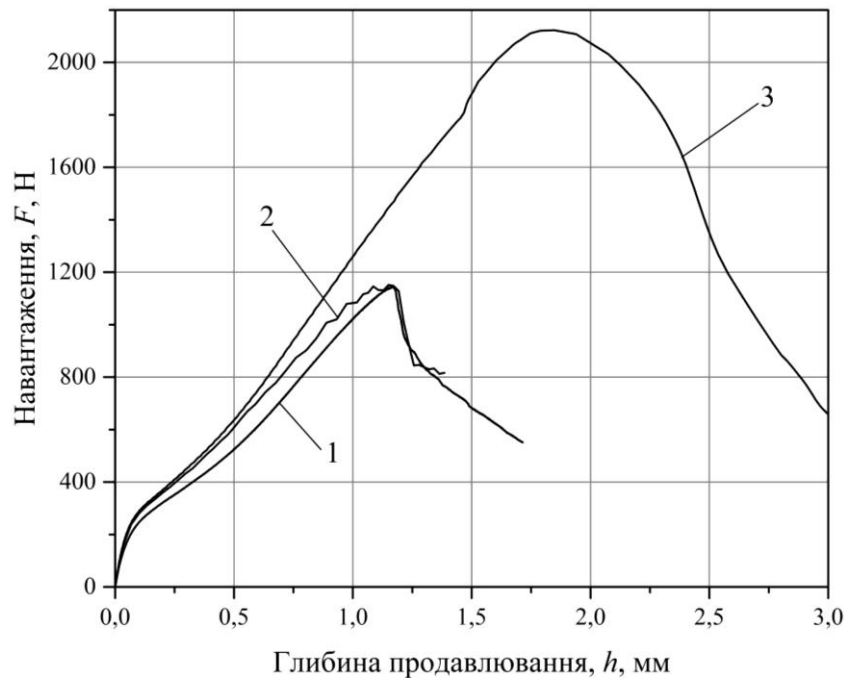


Рис. 3 Експериментальна (1) та розрахункові діаграми деформування дискових мікрорізків з урахуванням моделі GTN (2) та без (3).

Дослідження впливу умов закріплення дискового мікрорізка в експериментальному обладнанні, а саме впливу сили затиску, проводили так. До верхньої матриці приклали певне навантаження й проводили розрахунок процесу продавлювання дискового мікрорізка. На рис. 4 приведено діаграми продавлювання в координатах «навантаження» – «глибина продавлювання» як без урахування, так із урахуванням сили затиску зразка, що дорівнювала 5, 7,5 та 10 кН. За таких значень навантаження на верхню матрицю рівень еквівалентних напружень за Мізесом у защемленій зоні зразка не перевищував 264 МПа. Як видно з отриманих результатів, сила затиску зразка не впливає суттєво на діаграму продавлювання, тому для зменшення часу та спрощення чисельних розрахунків нею можна знехтувати. Проте під час проведення експериментальних випробувань силу затиснення зразка слід обирати таким чином, щоб не допустити пластичного деформування зразка в зоні защемлення, урахуваючи геометричні параметри експериментального обладнання та зразка.

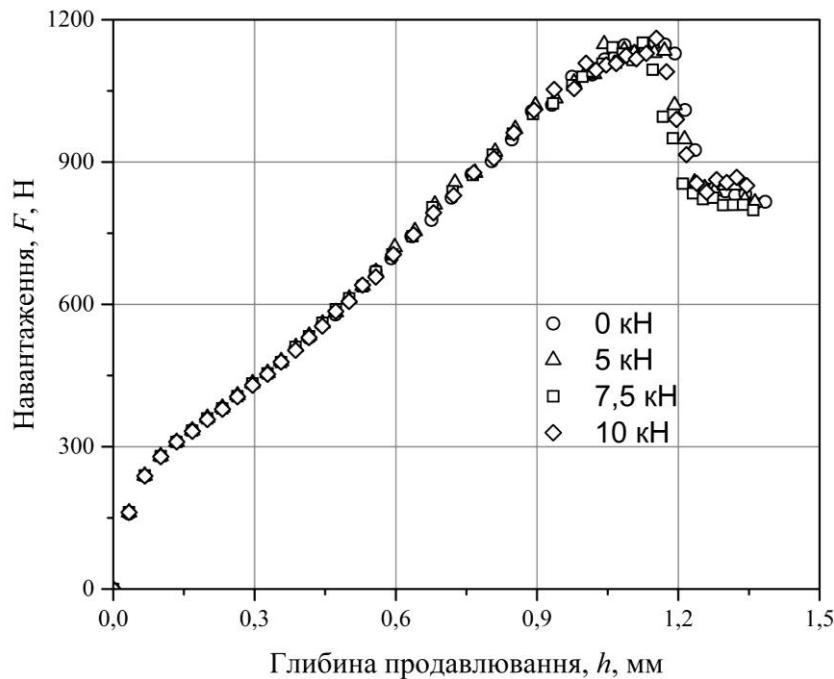


Рис. 4. Діаграми деформування дискового мікрозразка із сталі 45 за різних зусиль затиску зразка

Висновки

Досліджено вплив умов закріплення дискового мікрозразка в експериментальному обладнанні, а саме вплив сили затиску. За результатами досліджень, встановлено, що сила затиску зразка не впливає суттєво на діаграму продавливання, тому для зменшення часу та спрощення чисельних розрахунків нею можна знехтувати. При цьому, обираючи величину сили затиску зразка в експериментальному устаткуванні, слід не допускати пластичного деформування зразка в зоні защемлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Calaf-Chica J. A New Prediction Method for the Ultimate Tensile Strength of Steel Alloys with Small Punch Test / J. Calaf-Chica, P. M. Bravo, C. M. Preciado // *Materials*. – 2018. – Vol. 11(9), № 1491. – P. 1491.
2. Assessment of the constitutive properties from small ball punch test: experiment and modeling / E. N. Campitelli, P. Spatig, R. Bonade [et al.] // *Journal of Nuclear Materials*. – 2004. – Vol. 335, № 3. – P. 366 – 378.
3. Finarelli D. Small punch tests on austenitic and martensitic steels irradiated in a spallation environment with 530 MeV protons / D. Finarelli, M. Roedig, F. Carsughi // *Journal of Nuclear Materials*. – 2004. – Vol. 328, № 2 – 3. – P. 146 – 150.
4. Evaluation of ultimate tensile strength using Miniature Disk Bend Test / K. Kumar, A. Pooleery, K. Madhusoodanan [et al.] // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 461. – P. 100 – 111.
5. Small Punch Test Method for Metallic Materials [Electronic resource] : CWA 15627:2007 / CEN Workshop Agreement, 2007. – Access mode: https://0c68bbcf-a-62cb3a1a-s-sites.googlegroups.com/site/presmirtmst/proceedings-papers-presented/CENworkshopagreementofSmallpunchTestmethodformetallicmaterials.pdf?attachauth=ANoY7cp8AMDilu8xwQBy8GhK6VAxxR24-bFRIAExES4KpOhbq_TTjq0UMHC9Nna3yhP3ALqo_X7qPDRBrrsvBGZJjr4AgjWC8rUPqmdiyXoM4vzrYbfvz-hN7Hoyp7np1Zu31hsqgn9XISA1WO51t2ztg_ScoDxJVkAJ9yz95wrFDIP5OEqDyzUggIJfrE1pVrPUT9Jizo5bXXXXK5xOeIMRH9I1pZIXfv_NLkd9XJLaJ-UGBLWX8Nc_TJFypCBibmI_YZgGeUhCZ57T8aCmKD3uWsaoReN-NK8jkPgo3GhtYzed10gQLbhnTCsw9cmmPULBu7zp37kqx&attredirects=0.
6. Klevtsov I. Measurement of the tensile and yield strength of boiler steels by small punch and tensile test methods / I. Klevtsov, A. Dedov, A. Molodtsov // *Estonian Journal of Engineering*. – 2004. – Vol. 15, № 2. – P. 99 – 107.
7. Janča A. Small punch test evaluation methods for material characterisation / A. Janča, J. Siegl, P. Haušild // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – Vol. 481. – P. 201 – 213.
8. A Setup for Complex Investigation of Mechanical Characteristics of Structural Materials for NPP Equipment / O. A. Katok, R. V. Kravchuk, V. V. Kharchenko [et al.] // *Strength of Materials*. – 2019. – Vol. 51. – P. 317 – 325.

9. Gurson A. L. Continuum Theorie of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth : Part I–Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media / A. L. Gurson // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1977. – Vol. 99, №. 1. – P. 2 – 15.

10. Needleman A. Limits to Ductility Set by Plastic Flow Localization / A. Needleman, J. R. Rice // Symposium on Mechanics of Sheet Metal Forming, Warren, USA. – 1977. – P. 237 – 267.

11. Tvergaard V. Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar / V. Tvergaard, A. Needleman // Acta Metallurgica. – 1984. – Vol. 32, №. 1. – P. 157 – 169.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2020 р.

Стаття пройшла рецензування 28.03.2020 р.

Кравчук Роман Васильович – молодший науковий співробітник лабораторії міцності обладнання АЕС та об'єктів підвищеної небезпеки, e-mail: kravchuk.r@ipp.kiev.ua.

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України.