

УДК 539.53:620.178.15

В.В. Харченко, чл.-кор. НАН України
О.А. Каток, канд. техн. наук
А.Г. Макаєв
І.С. Кондратенко

*Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України
Тимирязєвська, 2, м. Київ, Україна. 01014*

ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ ДИСКОВОГО МІКРОЗРАЗКА НА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 45

Розроблено скінченно–елементну модель для розрахунку деформування сталюю кулькою дискового мікророззка. На основі результатів чисельного моделювання оцінено вплив геометрії зразка на результати визначення характеристик міцності методом продавлювання дискового мікро зразка

Ключові слова: метод продавлювання дискового мікро зразка, чисельне моделювання, характеристики міцності

Вступ. Можливість продовжити ресурс та забезпечити надійність експлуатації відповідального обладнання в значній мірі залежить від значення поточних механічних характеристик конструкційних матеріалів. Застосування класичних методів механічних випробувань на розтяг в ряді випадків неможливо без пошкодження (руйнування) конструкцій, так як для проведення випробувань необхідно виготовляти зразки. Тому в ряді випадків доцільно застосовувати непрямі методи визначення механічних характеристик.

Серед непрямих методів визначення характеристик механічних властивостей металів важливе місце займає відомий своїми перевагами і перспективною методом продавлювання дискового мікророззка, що отримав в англійській літературі назву Small Punch Test або SP-test [1-3]. Метод базується на реєстрації процесу деформування сталюю кулькою дискового мікророззка, який жорстко затиснутий в спеціальному пристрої. Реєстрація процесу відбувається у координатах «навантаження F , що прикладається до кульки – глибина продавлювання u дискового мікророззка».

На сьогодні метод знаходиться на стадії розвитку. Європейським комітетом зі стандартизації розроблено довідковий документ CWA 15627.2007 [4]. Проте підвищення точності визначення характеристик механічних властивостей металів, як і раніше, залишається надзвичайно важливою і актуальною задачею механіки матеріалів.

В рамках цієї роботи розроблено скінченно-елементну модель для чисельного моделювання процесу деформування сталюю кулькою диско-

вого мікророзрка з метою оцінки впливу геометрії зразка на визначення характеристик міцності методом продавлювання дискового мікророзрка.

Розрахункова модель для моделювання процесу деформування кулькою дискового мікророзрка. Чисельне моделювання процесу деформування сталлюю кулькою дискового мікророзрка проводили з використанням програмного комплексу, що базується на методі скінчених елементів. Внаслідок осової симетрії розглядали вісесиметричну контактну задачу в пружно-пластичній постановці.

Геометричні параметри моделі вибрано з урахуванням особливостей конструкції вузла вимірювання глибини продавлювання дискового мікророзрка лабораторної установки UTM-20 НТ [5] і представлено на рис. 1.

У розрахунках використовували пружно-пластичну модель матеріалу з урахуванням процесу пошкодження і руйнування матеріалу. У якості модельного матеріалу вибрано сталь 45 в стані поставки з характеристиками $\sigma_s=677,6 \text{ Н/мм}^2$; $\sigma_{0,2}=348 \text{ Н/мм}^2$; $E=199600 \text{ Н/мм}^2$. Індентор моделювали пружним тілом: матеріал кульки - сталь ШХ15; матеріал оправи – сталь 40Х13. Верхню й нижню затискні матриці моделювали ідеально жорсткими тілами. Процес пошкодження і руйнування матеріалу враховували за допомогою моделі GTN (Gurson–Tvergaard–Needleman) [6]. Модель GTN описує поведінку в'язкого пористого матеріалу і враховує як утворення й ріст пор, так і механізм в'язкого руйнування, викликаний їх злиттям.

На рис. 2 наведено розрахункову схему з фрагментами скінчено-елементного розбиття в області контакту дискового мікророзрка і індентора. Індентор й зразок моделювали вісесиметричними чотирикутними елементами.

Переміщення зразка в осьовому і в радіальному напрямках обмежували, як показано на рис. 2. Навантажування оправи індентора здійснювали шляхом завдання переміщення на верхньому торці оправи в осьовому напрямку

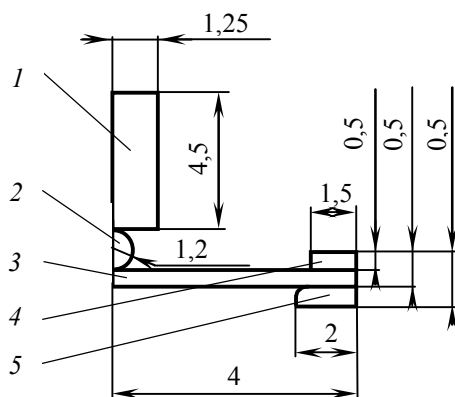


Рис. 1. Геометричні параметри розрахункової моделі чисельного моделювання процесу деформування сталлюю кулькою дискового мікророзрка: 1 – пуансон оправи індентора; 2 – кулька; 3 – зразок; 4 і 5 – верхня і нижня затискні матриці

(по осі Y). Для моделювання взаємодії було створено дві контактні пари: пуансон оправи індентора - кулька й кулька - зразок. При моделюванні взаємодії контактної пари коефіцієнт тертя приймали 0,18, згідно [7].

Для оцінки точності результатів чисельного моделювання процесу деформування кулькою дискового мікророзрка було розглянуто розрахункові

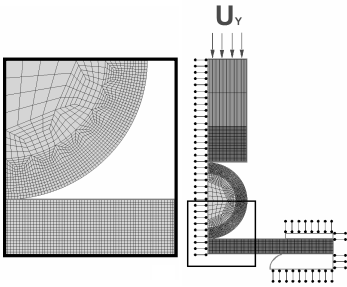


Рис. 2. Розрахункова схема для моделювання процесу деформування сталюю кулькою дискового мікророзрка й фрагменти скінчено-елементного розбиття в області контакту зразка і кульки

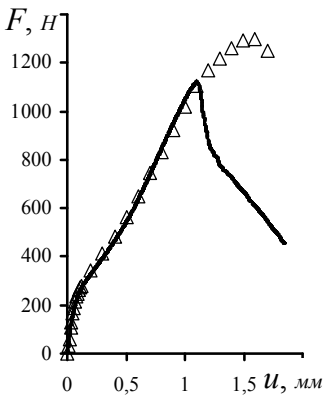


Рисунок 3. Діаграми продавлювання дискового мікророзрка сталі 45 в координатах «навантаження F – глибина продавлювання u » побудовані за результатами експериментальних даних (суцільна лінія) і чисельного моделювання (Δ)

схеми з різними розмірами скінчених елементів (СЕ) в області контакту зразка: 0,1 мм; 0,05 мм; 0,025 мм і 0,01 мм. Близькі результати залежностей навантаження від глибини продавлювання дискового мікророзрка отримано для скінченно-елементних сіток із розмірами СЕ у зоні продавлювання 0,025 мм і 0,01 мм. Тому в подальших розрахунках використано розрахункову схему з розмірами (СЕ) в області контакту зразка 0,025 мм.

Створену розрахункову модель перевіряли шляхом порівняння експериментальних діаграм продавлювання дискового мікророзрка в координатах «навантаження F – глибина продавлювання u » записаних на установці УТМ-20 НТ, з діаграмами, побудованими за результатами чисельного моделювання. Зіставлення цих діаграм для сталі 45 показано на рис. 3.

Розрахункова діаграма деформування кулькою дискового мікророзрка і результати експериментів, отриманих на лабораторній установці УТМ-20 НТ на стадіях пружного деформування дискового мікророзрка співпадають. На стадіях пружно-пластичного деформування та мембранного витягування дискового мікророзрка відхилення значень навантажень не перевищує 3%. Максимальне відхилення розрахункових і експериментальних даних спостері-

гається при зародженні основної тріщини в зразку. Це можна пояснити відмінністю між розрахунковим та реальним процесами пошкодження матеріалу та розвитком тріщини (рис. 4). В процесі моделювання пошкодження розвивається симетрично відносно центру зразка, тоді як в експерименті симетричність розвитку тріщини не спостерігається.

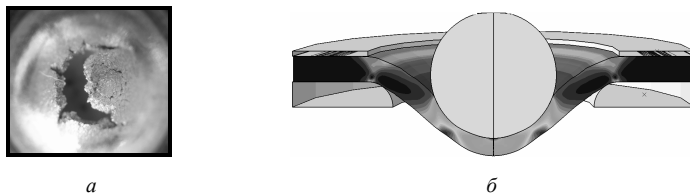


Рис. 4. Порівняння експериментальної (а) та розрахункової (б) картин розвитку пошкодження та тріщини в дисковому мікророзривку

Вплив геометрії дискового мікророзривку на результати розрахунку характеристик міцності. При виготовленні зразків для випробувань методом продавлювання дискового мікророзривку граничне відхилення по товщині може сягати $\pm 0,01$ мм. З метою дослідження геометрії дискового мікророзривку на визначення характеристик механічних властивостей сталі 45 проведено скінченно елементне моделювання із товщиною зразків 0,49 мм; 0,495 мм; 0,5 мм; 0,505 мм і 0,51 мм.

На рис. 5 представлено розрахункові діаграми деформування дискових мікророзривків товщиною 0,49 мм; 0,495 мм; 0,5 мм; 0,505 мм і 0,51 мм сталлюю кулькою діаметром 2,5 мм в координатах «Навантаження – глибина продавлювання». Рисунок наочно демонструє, що вигляд діаграм залежить не тільки від властивостей матеріалу, а й від розмірів випробуваного зразка. При відхиленні по товщині зразка в межах $\pm 0,005$ мм це менш помітно, тоді як при відхиленні по товщині в межах $\pm 0,01$ мм розкид діаграм при

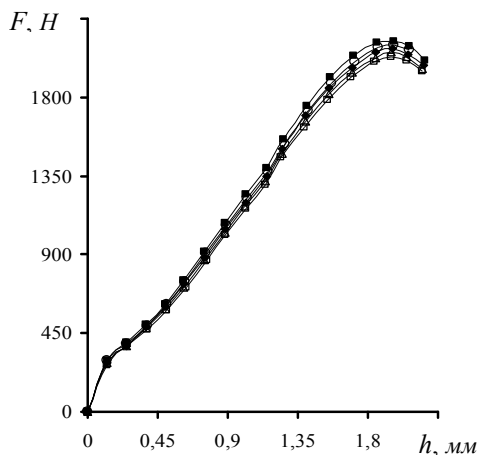


Рис. 5. Розрахункові діаграми деформування дискових мікророзривків товщиною 0,49 мм (■); 0,495 (○); 0,5 (◆); 0,505 (Δ) і 0,51 мм (□) сталлюю кулькою діаметром 2,5 мм координатах «Навантаження F – глибина продавлювання h »

максимальному навантаженні сягає 3,5 %.

Щоб позбавитися впливу геометрії зразка при визначенні характеристик механічних властивостей на практиці застосовують кореляційні залежності [3, 4], де в знаменнику присутня товщина зразка:

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

де α – коефіцієнт кореляції; F_y – навантаження у дисковому мікроразку в момент переходу від пружної до пружно-пластичної деформації; t – товщини зразка.

$$\sigma_e = \beta_1 \cdot \frac{F_{max}}{t^2} + \beta_2, \quad (2)$$

β_1 і β_2 – коефіцієнти кореляції; F_{max} – максимального навантаження у дисковому мікроразку перед руйнуванням; t – товщини зразка.

Результати визначення границі плинності і границі міцності сталі 45 за параметрами розрахункових діаграм деформування дискових мікроразків різної товщини із застосуванням кореляційних залежностей (1, 2) представлено в табл. 1 і табл. 2 відповідно. При визначенні характеристик міцності значення коефіцієнтів кореляції між характеристиками механічних властивостей, визначених із результатів випробувань зразків на одинісний розтяг і параметрами діаграми деформування дискових мікроразків взяті із робіт [2, 3].

Із даних, наведених в табл. 1 і 2, витікає, що розкид значень границі плинності і границі міцності, які визначені за параметрами розрахункових діаграм продавлювання дискових мікроразків різної товщини складає 1,3 % і 0,3 % відповідно. Слід відзначити, що точність оцінки характеристик міцності залежить від апроксимації діаграм деформування при визначенні параметрів F_y та F_{max} .

Таблиця 1

Розрахункові результати визначення границі плинності $\sigma_{0,2}$ сталі 45, за параметрами діаграми деформування дискових мікроразків різної товщини

№ п/п	Товщина мікроразка, мм	Коефіцієнт кореляції α [2]	F_y/t^2 , МПа	Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа
1	0,49	0,36	867,5	312,3
2	0,495		869,2	312,9
3	0,5		869,6	313,0
4	0,505		874,4	314,8
5	0,51		879,2	316,5

Таблиця 2

Розрахункові результати визначення границі міцності σ_0 сталі 45, за параметрами діаграми деформування дискових мікрорізків різної товщини

№ п/п	Товщина мікрорізка, мм	Коефіцієнт кореляції α [2]		F_y/t^2 , МПа	Границя міцності σ_0 , МПа
		β_1	β_2		
1	0,49	77	218	2028,4	536,7
2	0,495			2057	538,0
3	0,5			2080,1	538,3
4	0,505			2098,4	538,0
5	0,51			2123	538,5

Висновок. Розроблено скінчено-елементну модель для розрахунку деформування сталлюю кулькою дискового мікрорізка. Результати чисельного моделювання підтвержені експериментальними діаграмами деформування дискових мікрорізків в координатах «Навантаження – глибина продавлювання», які отримано на установці UTM-20 НТ. На основі результатів чисельного моделювання досліджено вплив геометрії дискового мікрорізка на оцінку характеристик міцності. Показано, що при виготовленні дискових мікрорізків із відхиленням по їх товщині в межах від 0,49 до 0,51 мм може призвести до збільшення похибки результатів визначення границі міцності за параметрами діаграми деформування дискових мікрорізків до 1,3 %, границі плинності – 0,3 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Campitelli N.* Assessment of mechanical properties in unirradiated and irradiated zircalloys and steels with non – standart tests and finite element calculations // Dissertation. – Lausanne, 2005.- P. 5 – 110.
2. *Mao X., Takahashi H.* Development of a further-miniaturized specimen of 3mm diameter for TEM disk small punch tests // Journal of Nuclear Materials. – 1987. – 150. – P. 42 – 52.
3. *Rodríguez C., García J., Cabezas E., Cárdenas F., Belzunze J., Betegón C.* Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test. // Welding Journal. – 2009. vol. 88. – P. 188-192.
4. CWA 15627:2007. Small Punch Test Method for Metallic Materials.
5. *Харченко В.В., Рудницький Н.П., Каток О.А., Неговський А.Н., Дроздов А.В., Кутняк В.В.* Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 28. – С. 140 – 147.
6. *Bernaer G., Brocks W.* Micro- mechanical modeling of ductile damage and tearing – results of a European numerical round robin // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2002 – Vol. 25. – P.363 – 384.

7. *Nayebi A., Abdi R. El, Bartier O., Mauvoisin G.* New procedure to determine steel mechanical parameters from the spherical indentation technique // *Mechanics of materials* – 2002. – 34. – P. 243 – 254.

REFERENCES

1. *Campitelli N.* Assessment of mechanical properties in unirradiated and irradiated zirconium alloys and steels with non – standard tests and finite element calculations // *Dissertation*. – Lausanne, 2005.- P. 5 – 110.
2. *Mao X., Takahashi H.* Development of a further-miniaturized specimen of 3mm diameter for TEM disk small punch tests // *Journal of Nuclear Materials*. – 1987. – 150. – P. 42 – 52.
3. *Rodríguez C., García J., Cabezas E., Cárdenas F., Belzunce J., Betegón C.* Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test. // *Welding Journal*. – 2009. vol. 88. – P. 188-192.
4. CWA 15627:2007. Small Punch Test Method for Metallic Materials.
5. *Kharchenko V.V., Rudnitskii N.P., Katok O.A., Negovsky A.N., Drozdov A.V., and Kutnyak V.V.* Ustanovka dlya opredeleniya mekhanicheskikh kharakteristik konstruksionnykh materialov me-todom instrumentirovannogo indentirovaniya // *Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i sooruzheniy*. – 2007. – Vyp. 28. – С. 140 – 147.
6. *Bernauer G., Brocks W.* Micro- mechanical modeling of ductile damage and tearing – results of a European numerical round robin // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2002 – Vol. 25. – P.363 – 384.
7. *Nayebi A., Abdi R. El, Bartier O., Mauvoisin G.* New procedure to determine steel mechanical parameters from the spherical indentation technique // *Mechanics of materials* – 2002. – 34. – P. 243 – 254.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2014 р.

Харченко В.В., Каток О.А., Макаев А.Г., Кондратенко И.С.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДИСКОВОГО МИКРООБРАЗЦА НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 45.

Разработано конечно–элементную модель для расчета деформирования стальным шариком дискового микрообразца. На основе результатов численного моделирования оценено влияние геометрии образца на результаты определения характеристик прочности методом продавливания дискового микрообразца.

Ключевые слова: Метод продавливания дискового микрообразца, численное моделирование, характеристики прочности.

Kharchenko V.V., Katok O.A., Makaev A.H., Kondratenko I.S.

INFLUENCE OF THE DISK-SHAPED MICROSPECIMEN GEOMETRY ON THE CHARACTERIZATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 45

The finite element model is developed for calculating the deformation of the disk-shaped microspecimen using a steel ball (the small ball punch test). Based on the results of the numerical simulation, the influence of the specimen geometry on the calculation of the strength characteristics is evaluated by the small punch test method.

Key words: Small Punch Test, numerical simulation, strength characteristics.