

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ДО ПОБУДОВИ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ

Ю. В. МОЛЬКОВ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Побудовано умовну та істинну діаграми деформування сталі 65Г за стандартною методикою та з допомогою методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Показано добру збіжність отриманих результатів. Встановлено, що локальна деформація, виміряна методом ЦКЗ на малих базах вимірювання, може суттєво перевищувати критичне істинне видовження матеріалу. Запропоновано критерій вибору оптимальної бази вимірювання деформації для побудови діаграм деформування.

Ключові слова: *діаграма деформування, вуглецева сталь, істинні напруження та видовження, цифрова кореляція зображень, розподіл деформації, база вимірювання, локальна деформація.*

Діаграми деформування [1–3] будують для визначення механічних характеристик матеріалів. Це – експериментальні залежності силових параметрів (зусилля навантаження зразка P , умовне σ чи істинне S напруження) від деформаційних (абсолютне Δl чи відносне δ видовження, відносне звуження ψ , істинне видовження e). Діаграми, побудовані в координатах $S - \psi$, $S - e$, називають істинними, оскільки параметр S враховує зміну площі перерізу зразка під навантаженням: $S = P/F_i$, де F_i – змінна площа перерізу зразка в місці утворення “шийки”. Очевидно, що така діаграма найбільш повно характеризує поведінку пластичного матеріалу під час його деформування за границею течіння. Однак її побудова пов’язана з деякими технічними труднощами, зокрема, з невизначеністю місця утворення шийки на стандартизованих зразках з постійним перерізом робочої частини. Вимірюючи звуження, на зразку встановлюють декілька двоконсольних тензOMETричних давачів переміщень з певним кроком, сподіваючись, що “шийка” утвориться у місці встановлення одного із них, або використовують один давач, який перевстановлюють вручну за появи видимої “шийки” [4]. Можна також застосовувати оптичні прилади, чи відеозйомку, однак тоді для обробки результатів потрібен час.

Тепер для вимірювання переміщень і деформацій широко використовують метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [5–8]. Суть його полягає в обробці низки цифрових зображень відповідно підготовленої поверхні деформівного тіла, отриманих під час його навантаження, з метою відслідковування переміщень множини точок цієї поверхні і подальшого розрахунку деформацій. Метод високоінформативний, оскільки дає можливість отримати поле переміщень і деформацій по всій поверхні зразка, як і за використання скінченно-елементних моделей. Для його реалізації існує комерційне програмне забезпечення, зокрема, ARAMIS німецької компанії GOM Company та VIC-2D американської компанії Correlated Solutions [9], а також некомерційне MOIRE, розроблене в Католицькому університеті Америки [10, 11], яке і застосовували під час дослідження.

Методом ЦКЗ визначали видовження зразка, його звуження в “шийці”, локальну деформацію в центрі “шийки”, за якими будували діаграми деформування, а також отримали розподіл локальної деформації по всій поверхні зразка. Стави-

ли мету – побудувати умовні та істинні діаграми деформування матеріалу з використанням методу ЦКЗ, порівняти їх з одержаними традиційним способом, а також обґрунтувати вибір оптимальної бази вимірювання деформацій методом ЦКЗ.

Зразки, обладнання та методика досліджень. Використали стандартні п'ятикратні плоскі зразки [5] прямокутного перерізу 5×2 mm, виготовлені з листової сталі 65Г у стані постачання із напрямом волокон вальцювання уздовж зразка (рис. 1). На їх поверхні згідно із рекомендаціями виробника програмного забезпечення [9–11] еластичною аерозольною фарбою створювали неповторюваний ізотропний контрастний крапковий малюнок (чорні крапки на білому фоні), необхідний для коректного застосування методу ЦКЗ.



Рис. 1. Зразок для механічних випробувань із нанесеним на поверхні крапковим малюнком для застосування методу ЦКЗ (ділянку поверхні збільшено).

Fig. 1. Specimen for mechanical testing with speckle pattern on its surface for digital image correlation (DIC) technique realization (the site of the surface magnified).

Зразки розтягували аж до руйнування на механічній розривній машині FP-100 за швидкості переміщення рухомої траверси 2 mm/min у лабораторних умовах, реєструючи рівень навантаження динамометром машини та видовження робочої частини зразка тензометричним давачем переміщення. Сигнали динамометра і давача записували у комп'ютер за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і відповідного програмного забезпечення. Зображення для обробки методом ЦКЗ отримували цифровою дзеркальною фотокамерою Olympus E-300, жорстко закріпленою до нерухомої траверси машини. Зображення мали роздільну здатність 2 MP (1600×1200) і кодувались у форматі *.tiff.

Під час експерименту серійно фотографували поверхню зразка, причому перший кадр відповідав моменту початку навантаження, а частота зйомки 1 fps рівна частоті реєстрації зусилля навантаження АЦП. Так вдалося з достатньою точністю встановити для кожного кадру зусилля у момент його отримання. Загалом за час навантаження зразка зроблено приблизно 350 кадрів, що уможливило побудову достатньо гладкої кривої.

Результати та їх обговорення. Перерахувавши значення зусилля навантаження P та абсолютного видовження зразка Δl в умовні напруження σ та відносне видовження δ , побудували класичну умовну діаграму деформування σ – δ [1, 2] (рис. 2, крива 1). Програмне забезпечення для реалізації методу ЦКЗ містить опцію “віртуальний екстензометр”, яка дає змогу безпосередньо вимірювати відносну деформацію на базі між двома довільними точками, як і двоконсольним давачем переміщень (рис. 3a). За значеннями деформації, виміряної віртуальним екстензометром на базі робочої зони зразка, яка фактично є його відносним видовженням δ , побудували ще одну умовну діаграму (рис. 2, крива 2), яка практично збігається з одержаною за даними двоконсольного давача переміщень (крива 1). Невелика розбіжність на момент руйнування (не більш як $0,010 \div 0,015$ одиниць деформації), пов'язана, імовірно, із нелінійністю давача переміщень.

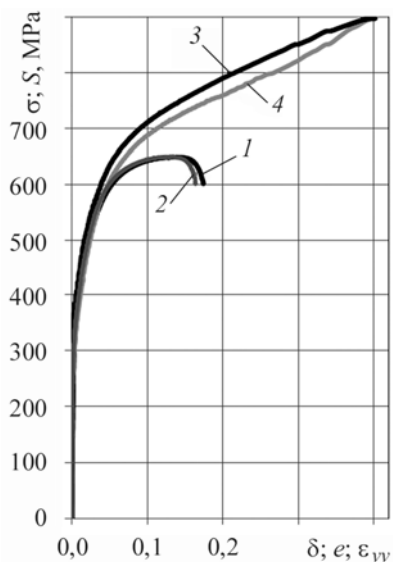
Для побудови істинної діаграми деформування необхідно знати проміжну площу перерізу зразка в місці утворення “шийки”. Для цього за даними ЦКЗ визначили проміжні значення переміщень двох точок, розміщених на протилежних краях досліджуваної грані зразка у площині “шийки” (рис. 3b), і одержали проміжні значення ширини зразка b_i . Припускаючи, що деформування зразка у всіх напрямках однорідне, його товщина a_i змінюється пропорційно ширині b_i , а фор-

ма його перерізу на всіх стадіях деформування прямокутна, отримали проміжні значення площі $F_i = a_i \cdot b_i$, а відтак, і відносного звуження $\psi_i = (F_0 - F_i)/F_0$, де F_0 – початкова площа перерізу зразка.

Відповідне істинне напруження в площині “шийки” $S_i = P_i / F_i$, а істинне видовження $e_i = \ln(1/(1 - \psi_i))$. За масивами значень S_i і e_i побудовано істинну діаграму деформування (рис. 2, крива 3).

Рис. 2. Діаграми деформування сталі 65Г:
1 – умовна σ - δ ; 2 – умовна, побудована за даними ЦКЗ; 3 – істинна S - e ; 4 – локальної деформації S - ε_{yy} в “шийці” зразка на базі 15р (0,660 mm) за даними ЦКЗ.

Fig. 2. Deformation curves of 65G steel:
1 – conditional σ - δ ; 2 – conditional, built by DIC data; 3 – true (effective) S - e ; 4 – local deformation S - ε_{yy} in the “neck” of the specimen by DIC data using spacing 15p (0.660 mm).



Застосовуючи метод ЦКЗ вживають поняття кроку вимірювання – відстані між будь-якими двома точками цифрового зображення, переміщення яких відслідковує програма. Цей крок, по суті, є базою вимірювання деформації. Мінімальний крок становить 1р (1 піксель) використовуваного цифрового зображення. Тобто, що більші роздільна здатність цифрової камери і оптичне збільшення її об’єктива, то меншою може бути база вимірювання деформації. В цьому випадку база 1р, а отже, мінімальна база вимірювання деформації становила 0,044 mm. Побудовано (рис. 4) діаграми локальної деформації, виміряної в точці “шийки” зразка, де вона була максимальною на момент руйнування (рис. 3с). По осі ординат відкладено домінуючу тут компоненту деформації ε_{yy} (тобто в напрямку дії прикладеної до зразка сили). Використали бази (кроки) вимірювання 2р; 5р; 10р; 12р та 15р, що відповідає 0,088; 0,220; 0,440; 0,528 та 0,660 mm. Очевидно, що локальна деформація залежить від бази її вимірювання. Значення, виміряні на різних базах, суттєво різняться після точки, що відповідає границі міцності σ_B на умовній діаграмі деформування, тобто після моменту появи “шийки” і локалізації там деформації, і ця різниця максимальна на момент розриву зразка. Зокрема, на достатньо малих базах критична деформація ε_{yyc} на момент руйнування може значно перевищувати критичне істинне видовження e_c , не кажучи вже про відносне δ . Проте на достатньо великих базах критичні значення цих величин збігаються (див. рис. 2, криві 3 і 4). Тому під час побудови діаграм деформування є сенс приймати базу вимірювання такою, щоб виконувалось співвідношення $\varepsilon_{yyc} = e_c$.

Таку діаграму доцільно використовувати для ранжування матеріалів за їх механічними характеристиками чи оцінки впливу термообробки на параметри окремого матеріалу, а також визначення напружень за відомими деформаціями чи роботи, затраченої на руйнування матеріалу.

Рис. 5. ілюструє розподіл локальної деформації по ширині зразка в площині “шийки” (див. рис. 3с) на момент руйнування для різних баз вимірювання. Як бачимо, малим базам (криві 1, 2) властива неоднорідність деформації з максимумом у деякій точці, де і починається руйнування. Для більших, зокрема для бази 15р (0,66 mm), для якої виконується наведене вище співвідношення, такої нерівномірності не виявлено, тобто виміряна деформація усереднена.

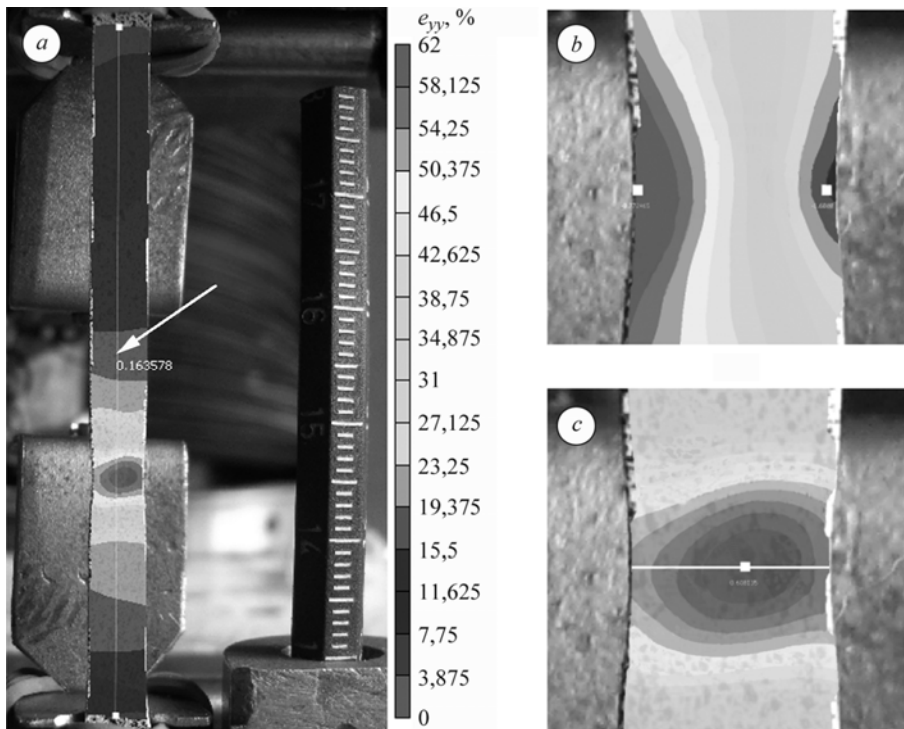


Рис. 3. Вимірювання деформацій та переміщень методом ЦКЗ: *a* – розподіл локальної деформації ϵ_{yy} (база вимірювання $5p$ ($0,220$ mm)) на поверхні робочої частини зразка і вимірювання відносного видовження віртуальним екстензометром (вказано стрілкою); *b* – вимірювання зміни ширини зразка за переміщенням точок (світлі квадратики); *c* – точка вимірювання локальної деформації в “шийці” зразка (світлий квадратик; див. рис. 2) і лінія визначення розподілу деформації (див. рис. 4).

Fig. 3. Measurement of deformations and displacements using DIC method: *a* – local deformation ϵ_{yy} distribution (spacing $5p$ (0.220 mm)) on the surface of the specimen and measuring elongation using virtual extensometer (marked by an arrow); *b* – measuring of specimen width change by displacement of edge points (white points); *c* – point of maximal deformation at the “neck” of the specimen which local deformation curves (white point; see Fig. 2) were built and the line of determination of deformation distribution (see Fig. 4).

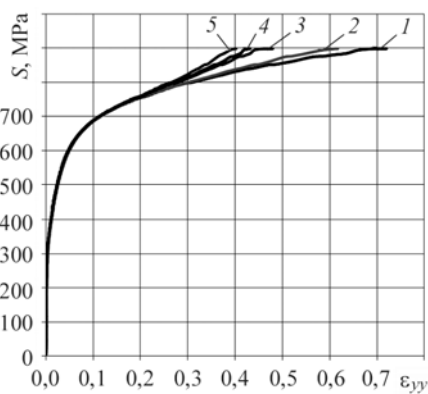
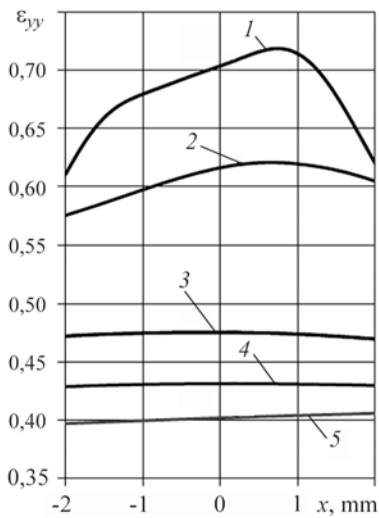


Рис. 4. Діаграми локальної деформації $S - \epsilon_{yy}$ у “шийці” зразка, визначеної методом ЦКЗ за різних баз вимірювання: *1* – $2p$ ($0,088$ mm); *2* – $5p$ ($0,220$ mm); *3* – $10p$ ($0,440$ mm); *4* – $12p$ ($0,528$ mm); *5* – $15p$ ($0,660$ mm).

Fig. 4. Local deformation curves in the “neck” of the specimen, obtained at the different spacing by DIC technique: *1* – $2p$ (0.088 mm); *2* – $5p$ (0.220 mm); *3* – $10p$ (0.440 mm); *4* – $12p$ (0.528 mm); *5* – $15p$ (0.660 mm).

Для оцінки несучої здатності елементів конструкцій важливо проаналізувати розподіл деформації поблизу дефектів (тріщин) та інших концентраторів напружень. Тоді використовувати великі бази вимірювання недоцільно, оскільки через усереднення деформації неможливо встановити області її локалізації на поверхні елемента конструкції. Тут потрібні мінімальні бази вимірювання деформації, які



тільки може забезпечити оптична система для отримання зображень.

Рис. 5. Криві розподілу локальної деформації ε_{yy} у площині “шийки” зразка для різних баз вимірювання: 1 – 2р (0,088 mm); 2 – 5р (0,220 mm); 3 – 10р (0,440 mm); 4 – 12р (0,528 mm); 5 – 15р (0,660 mm).

Fig. 5. Local deformation ε_{yy} distribution curves at the cross section of the “neck” of the specimen, obtained using different measurement spacing: 1 – 2p (0.088 mm); 2 – 5p (0.220 mm); 3 – 10p (0.440 mm); 4 – 12p (0.528 mm); 5 – 15p (0.660 mm).

ВИСНОВКИ

Побудовано умовну та істинну діаграми деформування сталі 65Г з використанням даних, отриманих методом цифрової кореляції зображень, які практично збігаються із одержаними класичним способом. Одержали діаграми локальної деформації в центрі “шийки” зразка на різних базах вимірювання. Встановлено, що локальна деформація, виміряна на малих базах, може перевищувати істинне видовження e . Запропоновано критерій вибору оптимальної бази вимірювання деформації методом ЦКЗ, за якої критична локальна деформація збігається з критичним істинним видовженням e_c .

РЕЗЮМЕ. Построены условная и истинная диаграммы деформирования стали 65Г по стандартной методике и с использованием метода цифровой корреляции изображений (ЦКИ). Выявлено хорошее совпадение результатов. Установлено, что локальная деформация, измеренная методом ЦКИ на малых базах измерения, существенно превышает критическое истинное удлинение материала. Предложен критерий выбора оптимальной базы измерения деформации для построения диаграмм деформирования.

SUMMARY. The conditional and the true (effective) deformation curves of 65Г spring carbon steel is plotted using standard approach and digital image correlation technique (DIC). A good correlation between the results is shown. It is established that the local deformation measured by DIC technique using the small spacing can be significantly bigger than the effective elongation of the material. The criterion to choose an appropriate spacing for deformation curves plotting is proposed.

1. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов: в 2-х ч. Ч. 1: Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
2. Берштейн М. Л., Займовский В. А. Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 472 с.
3. ГОСТ 1497-84 /СТ СЭВ 471-77. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 40 с.
4. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
5. ГОСТ 11701-84 /СТ СЭВ 471-77. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.
6. Chu T., Ranson W., and Sutton M. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // *Exper. Mech.* – 1985. – **25**, № 3. – P. 232–244.
7. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis / M. A. Sutton, M. Cheng, W. H Peters et al. // *Image and Vision Computing.* – 1986. – **4**, № 3. – P. 143–150.
8. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review / B. Pan, K. M. Qian, H. M. Xie, and A. Asundi // *Measurement Scie. & Technology.* – 2009. – **20**, № 6. – P. 062001–062007.
9. VIC-2D Image Analysis software, Correlated Solutions, incorporated, West Columbia, SC 29169.
10. Wang Z. On the accuracy and speed enhancement of digital image correlation technique // *J. of Exper. Mech.* – 2011. – **26**, № 5. – P. 632–638.
11. Accuracy enhancement of digital image correlation with B-spline interpolation / L. Luu, Z. Wang, M. Vo, T. Hoang, and J. Ma // *Optics Letters.* – 2011. – **36**, № 16. – P. 3070–3072.

Одержано 20.10.2012