

ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ БІЛЯ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ¹, Ю. В. МОЛЬКОВ¹, П. С. КУНЬ¹,
Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ¹, М. ВОЙТОВИЧ²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Технологічно-гуманітарний університет, Радом, Польща

Проаналізовано особливості визначення локальної деформації матеріалу в околі концентраторів напружень різного радіусу з використанням методу цифрової кореляції зображень. Встановлено залежності критичної локальної деформації від розміру бази її визначення для гладкого зразка, зразків з концентраторами напружень та втомною тріщиною. Наведено рекомендації щодо вибору оптимальної бази визначення локальної деформації. Побудовано діаграми деформування сталі 65Г у координатах “істинні напруження–локальна деформація”.

Ключові слова: локальна деформація, концентрація напружень, цифрова кореляція зображень, база визначення деформації, розподіл деформації, істинна діаграма деформування, пластичне деформування, вуглецева сталь.

Забезпечення надійності та довговічності машин і споруд базується, перш за все, на об'єктивній оцінці механічних характеристик конструкційних матеріалів, тобто їх здатності чинити опір деформуванню і руйнуванню в заданих умовах експлуатації. Об'єктивну інформацію про властивості матеріалу можна отримати на підставі залежностей напружень від деформацій, тобто діаграм деформування. Точність встановлених залежностей визначає достовірність інженерних розрахунків на міцність та надійність елементів конструкцій. Відомо, що в об'ємах матеріалу, де є внутрішні дефекти та концентратори (тріщини), локальні напруження навіть за допустимих зовнішніх навантажень можуть перевищувати границю пружності і, як наслідок, виникають незворотні (пластичні) деформації.

Встановити напружено-деформований стан в околі концентраторів за значних пластичних деформацій досить складно. В межах механіки руйнування запропоновано теоретичні та експериментальні підходи, які дають змогу прямо чи опосередковано вирішити цю задачу [1–4]. Нижче запропоновано метод встановлення залежності між напруженнями та деформаціями, який ґрунтується на високоточному визначенні локальної деформації методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ).

Метод ЦКЗ (DIC – digital image correlation) тепер широко застосовують у експериментальній механіці матеріалів для вимірювання переміщень і деформацій [5–8]. Метод полягає в обробці за певним алгоритмом послідовності цифрових зображень поверхні деформованого тіла, отриманих під час його навантаження, для відслідковування переміщень множини точок цієї поверхні і подальшого розрахунку деформацій. Суть методу можна описати так. За допомогою цифрової камери отримують пару чорно-білих цифрових зображень поверхні зразка, перше з яких вихідне (рис. 1а) отримане до деформування, а друге – після нього (рис. 1б). На поверхні зразка створено анізотропний неповторюваний крапковий малюнок

за допомогою еластичної аерозольної фарби або іншим способом. Задача полягає у вимірюванні вертикального v та горизонтального u переміщень двох довільних точок A і B , розташованих на поверхні зразка поблизу концентратора напружень, а також у визначенні відносної деформації ε на базі b між цими двома точками. Кожній із цих точок відповідає піксель даного цифрового зображення, отже, задача полягає у знаходженні на зображенні zdeформованої поверхні пікселі, що відповідають точкам A і B . Оскільки інформації про відтінок кожного з пікселів недостатньо для однозначної ідентифікації їх на зображенні zdeформованої поверхні (на зображенні може бути багато пікселів такого відтінку), то навколо кожного пікселя вибирається ділянка прямокутної чи іншої форми, в межах якої розподіл відтінків пікселів з великою імовірністю буде неповторним. Ця ділянка служить маркером для відслідковування переміщення точки, яка розміщена у її центрі. Далі, за відповідним алгоритмом, закладеним у програмне забезпечення ЦКЗ, на зображенні zdeформованої поверхні відшукується ділянка з таким самим розподілом відтінків пікселів. Таким чином, визначають координати точок A і B на зображенні, отриманому після деформування зразка, і компоненти їх переміщення u і v відносно початкових положень на вихідному зображенні. Приріст відстані між точками Δb , віднесений до початкової відстані b (базис) на вихідному зображенні, відповідає відносній деформації ε ($\varepsilon = \Delta b/b$).

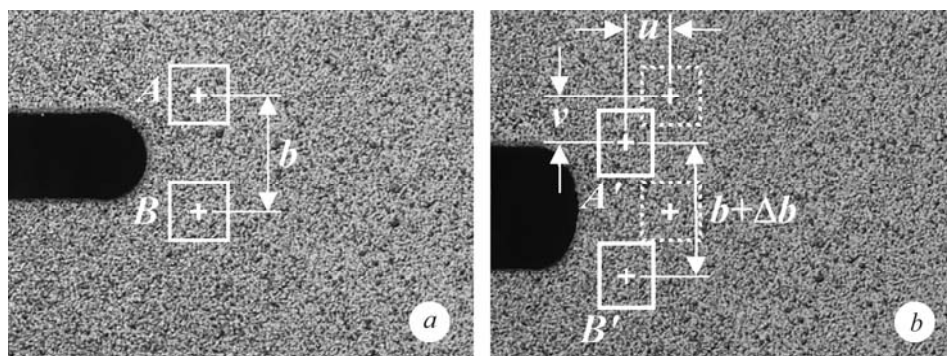


Рис. 1. Зображення недеформованої (а) та деформованої (b) поверхонь в околі концентратора напружень.

Fig. 1. Images of the non-deformed (a) and deformed (b) surface in the vicinity of stress concentrator.

Алгоритм ЦКЗ дає змогу вимірювати переміщення кожного пікселя зображення або з певним кроком. Цей крок, по суті, є базою визначення локальної деформації. Мінімальний крок вимірювання – 1 pixel, тобто вимірюють переміщення кожних двох сусідніх пікселів зображення. Тому, що більшими є роздільна здатність цифрової камери і оптичне збільшення її об'єктива, то меншою може бути база визначення деформації. Таким чином, діапазон зміни розміру бази за використання методу ЦКЗ може бути дуже широким, оскільки він залежить лише від масштабу зображень.

Для визначення локальної деформації вибір оптимальної бази є надзвичайно важливим, особливо для пластичних конструкційних матеріалів. Оскільки в околі концентраторів напружень завжди існує значний градієнт деформації в межах зони високих пластичних деформацій, то очевидно, що використання баз більших або рівних за розміром цій зоні дасть лише усереднену деформацію. Зоною високих пластичних деформацій H_B тут вважаємо область, у якій напруження перевищують умовну границю міцності σ_B . Так, використання розміру бази рівного розміру зони H_B гладкого зразка для визначення деформації перед вершиною тріщи-

ни дасть занижену величину, оскільки в межах такої бази буде знаходитись матеріал на різних стадіях деформування, а деформація буде усереднена в межах бази (рис. 2). Використання надто малої бази, сумірної з структурними елементами полікристалічного матеріалу, дасть великий статистичний розкид значень деформації залежно від місця вимірювання, тобто від того, який структурний елемент (зерно, межа між зернами тощо) під час вимірювання знаходиться в межах бази.

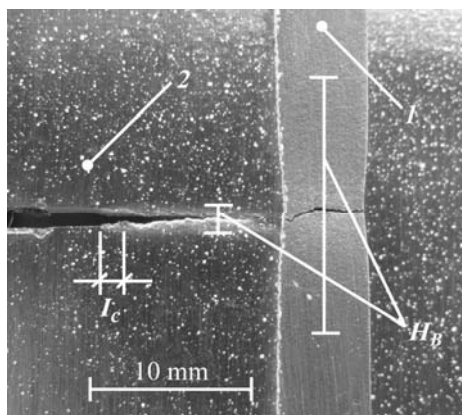


Рис. 2. Розмір зони високих пластичних деформацій H_B гладкого зразка (1) і зразка з втомною тріщиною (2); l_c – довжина пластичної зони у вершині наведеної втомною тріщини.

Fig. 2. Size of the zones of high plastic strain H_B in a smooth specimen (1) and a specimen with fatigue crack (2); l_c – length of the plastic zone at the tip of initial fatigue crack.

Таким чином, база визначення локальної деформації повинна задовольняти низку вимог, а саме: бути, з одного боку, достатньо малою для забезпечення визначення деформації в околі концентраторів напружень, а з іншого – достатньо великою для уникнення впливу мікроструктури матеріалу. Використання бази, що задовольняє ці вимоги, дає можливість побудувати діаграми деформування, інваріантні відносно геометрії зразків та умов їх навантаження. Такі діаграми необхідні, щоб коректно визначити напруження за відомими деформаціями поблизу дефектів у елементах конструкцій для оцінки їх залишкової міцності.

Мета роботи – обґрунтувати вибір розміру бази визначення локальної деформації матеріалу для побудови діаграм деформування та встановлення істинних напружень біля концентраторів.

Зразки, обладнання та методика досліджень. Для випробувань використовували стандартні п'ятикратні зразки [9, 10] прямокутного перерізу 5×2 mm (рис. 3a), плоскі зразки шириною 35 mm з боковими надрізами різного радіусу заокруглення (рис. 3b) та шириною 120 mm з центральним концентратором напружень (надрізом) і утвореною від його вершини втомною тріщиною (рис. 3c). Всі зразки виготовлені з гарячекатаного листа сталі 65Г товщиною 2 mm так, щоб напрям текстури вальцювання був перпендикулярним до осі прикладання зовнішнього навантаження.

Сталь 65Г обрали як модельний матеріал з таких міркувань:

- структура листової сталі 65Г у стані постачання є достатньо однорідна, оскільки складається з дрібнодисперсного перліту і не має чітко виражених зерен (рис. 4), тому під час визначення локальної деформації можна знехтувати анізотропією матеріалу;

- текстура поверхні гарячекатаного листа сталі 65Г придатна для застосування методу ЦКЗ без штучного створення крапкового малюнку за допомогою аерозольної фарби, що підвищує точність вимірювання переміщень.

Для листової сталі 65Г визначили механічні характеристики згідно зі стандартом [10] і побудували умовну та істинну діаграми деформування за відомими методиками [11, 12] (рис. 5).

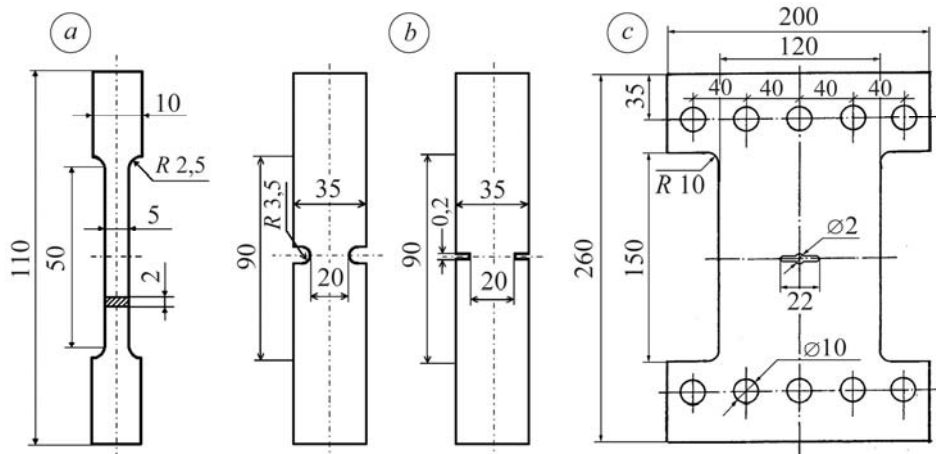
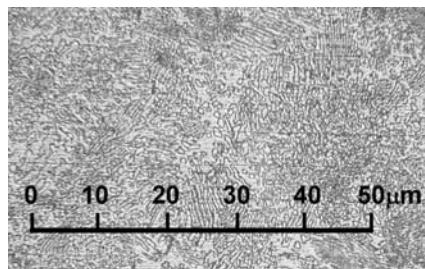


Рис. 3. Плоский гладкий зразок для визначення механічних характеристик (а), плоскі зразки з боковими надрізами різного радіусу (b) та з центральним концентратором напружень для визначення характеристик тріщиностійкості (с).

Fig. 3. A plane smooth specimen for mechanical data determination (a), plane specimens with side notches of different radii (b) and with a central notch for crack growth resistance determination (c).

Рис. 4. Мікроструктура листової сталі 65Г у стані постачання.

Fig. 4. Microstructure of 65Г sheet steel in the as-received state.

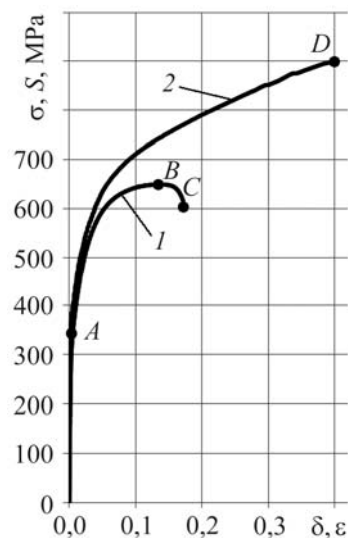


Оптична система для отримання зображень складається з цифрової дзеркальної фотокамери Olympus E-300 з роздільною здатністю 8 Мр (3264×2448) і мікроскопа МБС-10, жорстко закріпленого до нерухої траверси випробувальної машини. Масштаб отриманих зображень 400 pixel/mm, що забезпечує діапазон баз визначення деформації від 2,5 μm до 6,12 mm.

Рис. 5. Діаграми деформування листової сталі 65Г у стані постачання: 1 – умовна σ - δ ; 2 – істинна S - ϵ .

Fig. 5. Stress-strain curves of 65Г steel: 1 – curve σ - δ ; 2 – true curve S - ϵ .

Зразки розтягували до руйнування на механічній розривній машині FP-100 за швидкості переміщення рухої траверси 2 mm/min у стандартних лабораторних умовах. У плоских зразках з центральним надрізом наводили втомні тріщини згідно з вимогами [13] за асиметрії циклічного навантаження $R = 0,3$ і максимального зусилля циклу $P_{\max} = 0,4P_c$ (де P_c – статичне руйнівне навантаження). Під час випробувань реєстрували рівень навантаження динамо-



метром машини, сигнали якого записували у комп'ютер за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і відповідного програмного забезпечення.

Під час експерименту серійно фотографували ділянку поверхні зразка, причому перший кадр відповідав моменту початку навантаження, а частота зйомки (1 fps) рівна частоті реєстрації зусилля навантаження за допомогою АЦП. Така частота зйомки дає можливість з достатньою точністю встановити для кожного зображення навантаження, прикладене до зразка у момент його реєстрації, а також є достатньою для фіксування зображення у момент, близький до руйнування зразка.

Результати та їх обговорення. Щоб встановити оптимальну базу визначення локальної деформації, будували діаграми деформування матеріалу в області H_B гладкого зразка з використанням баз від $2,5 \mu\text{m}$ до $660 \mu\text{m}$ (рис. 6).

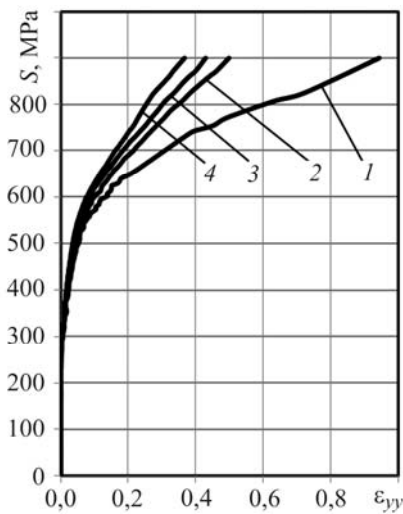


Рис. 6. Діаграми деформування сталі 65Г, отримані з використанням різних баз визначення деформації:
1 – база $2,5 \mu\text{m}$; 2 – $7,5$;
3 – 15 ; 4 – $660 \mu\text{m}$.

Fig. 6. Deformation curves of 65G steel obtained using different measurement spacing:
1 – spacing $2.5 \mu\text{m}$; 2 – 7.5 ;
3 – 15 ; 4 – $660 \mu\text{m}$.

Точки відбору даних обирали в області максимальної деформації поблизу центра шийки зразка (рис. 7а).

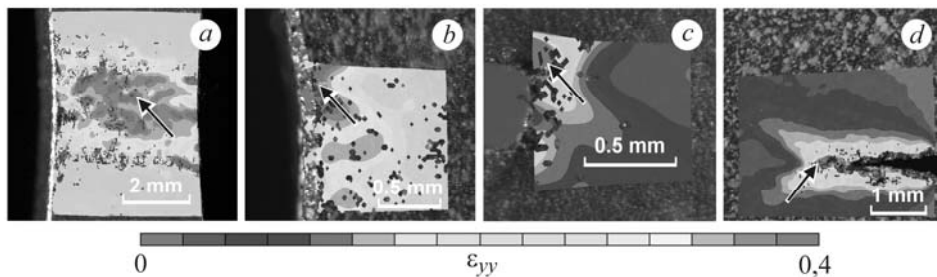


Рис. 7. Розподіл локальної деформації ϵ_{yy} (база визначення $15 \mu\text{m}$) на момент початку руйнування в шийці гладкого зразка (а), біля надрізу з радіусом $3,5 \text{mm}$ (b), з радіусом $0,1 \text{mm}$ (c), перед вершиною наведеної втомної тріщини (d). Стрілками вказано точки максимальної деформації.

Fig. 7. Local strain ϵ_{yy} distribution (measurement spacing $15 \mu\text{m}$) at the moment of fracture beginning in the neck of the smooth specimen (a), at the tip of a notch of radius 3.5mm (b), at the tip of a notch of radius 0.1mm (c), at the initial fatigue crack tip (d).

Arrows show the points of maximal local strain.

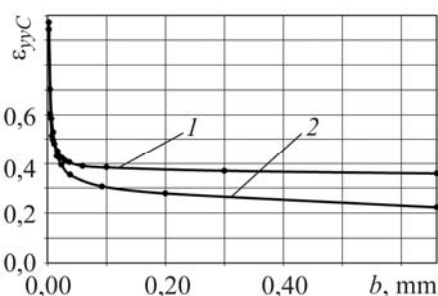
Як бачимо, вплив розміру бази на деформацію стає помітним, коли напруження наближається до умовної границі міцності (точка B на рис. 5). Це пов'язано з тим, що саме у цей момент пластичне деформування зразка перестає бути рівномірним по його довжині і локалізується в області шийки.

Найбільший вплив розміру бази b на деформацію спостерігають у момент, близький до руйнування зразка, тобто для критичних її значень (точки C і D на рис. 5). На пружній ділянці діаграми (точка A на рис. 5) і на ділянці малих пластичних деформацій впливу розміру бази на деформацію не спостерігають.

Аналіз залежностей критичних значень локальної деформації від бази b для гладкого зразка і зразка з гострим надрізом (рис. 8, криві 1 і 2) показує, що існує точка, після якої ці дві криві практично збігаються. Ця точка відповідає базі $20\ \mu\text{m}$. Таким чином, для баз, менших за $20\ \mu\text{m}$, значення критичної деформації, визначеної у шийці гладкого зразка і перед вершиною гострого надрізу, є однакові. Це означає, що критична локальна деформація, отримана з використанням баз меншого розміру, є характеристикою матеріалу, незалежною від геометрії зразка (радіусу концентратора напружень).

Рис. 8. Залежності критичної локальної деформації від бази її визначення для сталі 65Г: 1 – у шийці гладкого зразка; 2 – перед вершиною гострого надрізу.

Fig. 8. Dependences of the critical local strain on the strain measurement spacing: 1 – at the neck of a smooth specimen; 2 – at the tip of a sharp notch.



Оскільки використання надто малих баз потребує високої роздільної здатності системи для реєстрації зображень і значно збільшує час розрахунку поля переміщень та деформацій програмним забезпеченням ЦКЗ, то можна сказати, що достатнім для точного аналізу напружено-деформованого стану та побудови істинних діаграм деформування матеріалів, близьких за характеристиками пластичності до сталі 65Г є діапазон баз $10 \dots 20\ \mu\text{m}$. За оптимальний розмір бази прийняли $15\ \mu\text{m}$, з огляду на те, що критичне значення локальної деформації для цієї бази найближче до істинного видовження сталі 65Г ($\epsilon = 0,43$), визначеного за формулою $\epsilon = \ln(1/(1 - \psi))$ [11, 12], де ψ – відносне звуження зразка (див. рис. 5 і рис. 6). На рис. 9 показано діаграму локального деформування сталі 65Г, отриману з використанням бази $15\ \mu\text{m}$, яка практично збігається з істинною діаграмою деформування, побудованою за стандартною методикою (див. рис. 5, крива 2).

Коректність обраного розміру бази підтверджується результатами визначення критичної деформації ϵ_{yyC} в околі концентраторів напружень різних типів. Відстань від точки вимірювання до краю концентратора чи вершини тріщини становила $10 \pm 20\ \mu\text{m}$ (див. рис. 7). Результати для зразка з втомною тріщиною наведені для моменту, коли тріщина під статичним навантаженням виходить за межі залишкової пластичної зони l_C (див. рис. 2). Для гладкого зразка деформація ϵ_{yyC} рівна $0,4293$, для зразка з радіусом концентратора $3,5\ \text{mm}$ – $0,4135$, з радіусом $0,1\ \text{mm}$ – $0,4096$ і для зразка з втомною тріщиною – $0,4127$. Таким чином, для всіх розглянутих випадків критична деформація відрізняється не більш як на 4% від вимірюваної величини.

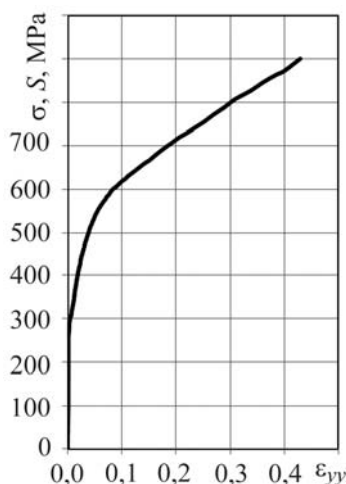


Рис. 9. Діаграма локального деформування сталі 65Г (база $15\ \mu\text{m}$).

Fig. 9. Local deformation curve of 65G steel (spacing $15\ \mu\text{m}$).

ВИСНОВКИ

Проаналізовано вплив на критичну локальну деформацію сталі 65Г розміру бази її визначення за різних випадків концентрації напружень. Обґрунтовано вибір її оптимального розміру (15 μm) і побудовано істинну діаграму деформування. Встановлено, що критична локальна деформація на оптимальній базі однакова в шийці гладкого зразка, біля вершин надрізів з радіусами 0,1 і 3,5 mm та тріщини, тобто є інваріантною характеристикою матеріалу.

РЕЗЮМЕ. Проанализированы особенности определения локальной деформации материала возле концентраторов напряжений разных радиусов с использованием метода цифровой корреляции изображений. Установлены зависимости критической локальной деформации от базы ее определения для гладкого образца, образцов с концентраторами напряжений и усталостной трещиной. Приведены рекомендации по выбору оптимального размера базы для определения локальной деформации. Построены диаграммы деформирования стали 65Г в координатах “истинные напряжения–локальная деформация”.

SUMMARY. The peculiarities of local displacement and strain measurement near the stress concentrators of different radii are analyzed by the digital image correlation technique (DIC). The dependences between the critical local strain and strain measurement spacing are obtained for cases of smooth specimen, specimens with stress concentrators and fatigue crack. The recommendations for choosing the appropriate local strain measurement spacing are given. The deformation curves of 65Г steel in coordinates “local strain–effective stress” are build.

1. Ковчик С. Е., Морозов Е. М. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Т. 4: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения. – К.: Наук. думка, 1988. – 436 с.
2. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
3. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. В 2-х т. Т. 1: Физико-механические основы пластической деформации. – М.: Металлургиздат, 1961. – 376 с.
4. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
5. Chu T., Ranson W., and Sutton M. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // *Experimental Mechanics*. – 1985. – 25(3). – P. 232–244.
6. 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.
7. 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 Science & Technology*. – 2009. – 20(6). – P. 062001–062007.
8. Мольков Ю. В. Застосування методу цифрової кореляції зображень до побудови діаграм деформування // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2012. – 48, № 6. – С. 136–140.
(Mol'kov Yu. V. Application of the method of digital image correlation to the construction of stress–strain diagrams // *Materials Science*. – 2013. – 48, № 6. – P. 832–837.)
9. ГОСТ 1497-84 /СТ СЭВ 471-77. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 40 с.
10. ГОСТ 11701-84 /СТ СЭВ 471-77. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.
11. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В 2-х ч. Ч. 1: Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
12. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 472 с.
13. Методы механических испытаний металлов, определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении // *Методические указания*. – М.: Междунар. центр науч. и техн. информации, 1993. – 54 с.

Одержано 16.07.2013