

УДК 539.3:4

І. Ліманський¹; Р. Кравчук²

¹Державне підприємство «АНТОНОВ»

²Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАВАНТАЖЕННЯ ЗРАЗКА У МОМЕНТИ ФІКСАЦІЇ ВІДЕОКАДРІВ ПРОФІЛЮ ТРІЩИНИ

Резюме. Цифрова відеозйомка, яка дозволяє здійснювати прямі вимірювання геометричних параметрів профілю тріщини широко застосовується в експериментальній механіці руйнування. Проте часто, особливо при вивченні швидкоплинних нестационарних процесів руйнування, за відсутності апаратного зв'язку відеокамери з випробувальною машиною виникає проблема встановлення значень, які мали параметри навантаження зразка у моменти фіксації відеокадрів профілю тріщини. Для вирішення цієї проблеми розроблено й перевірено відповідну методику.

Ключові слова: механіка руйнування, тріщина, експеримент, відеозйомка, параметри навантаження.

I. Limansky, R. Kravchuk

THE PROCEDURE OF THE SPECIMEN LOADING PARAMETERS IN FIXING VIDEO FRAME OF CRACK PROFILE

Summary. Digital videography, which makes it possible to accomplish direct measurements of geometric parameters of the crack profile in real time, finds wide use in experimental fracture mechanics. Practical implementation of videography in conducting experiments frequently faced difficulties due to the lack of synchronization between the processes of recording of the specimen loading parameters and videography. To solve this problem, a procedure for synchronization between the recording of the specimen loading parameters with an extending crack and videography of the crack profile using the testing machine controller together with digital CMOS-videocamera has been developed and approved. For mutual compliance of the loading and videography processes it is required to use some process, which is simultaneously recorded by means of controller and videocamera, as a binding element. For two registration systems this process occurs at initial instants of time $(t_0)_{mach}$ and $(t_0)_{video}$. For any video frame at the instant time t_{video} time interval since the beginning

of videography is determined as $\Delta t = t_{video} - (t_0)_{video}$. The loading parameters at this instant time is determined as

$t_{mach} = (t_0)_{mach} + \Delta t$. The instant of turn-off time for laser marker governed by digital controller output is used as such process. Thin-sheet metallic specimens have been tested for verification of synchronization. Measurements of the crack length are concurrently performed using the procedures of digital optical macrovideography and digital microvideography. The results of measurements of the crack length in accordance with both procedures are in a good agreement with each other.

Key words: fracture mechanics, crack, experiment, videography, loading parameters.

Постановка проблеми. Відеозйомка як засіб реєстрації змінних геометричних параметрів досліджуваних об'єктів відома досить давно і на даний момент широко застосовується при вирішенні різноманітних задач інженерної практики. Особливе місце вона займає в експериментах при вивченні процесів руйнування тіл з тріщинами, оскільки дає можливість здійснювати прямі вимірювання геометричних параметрів профілю тріщини, які, як прийнято вважати, можуть слугувати кількісною мірою її характерних станів та використовуватись при формулюванні критеріїв руйнування.

Кадри відеозйомки дозволяють визначати й відстежувати зміну довжини тріщини, розкриття й кута розкриття її вершини, взаємних переміщень берегів тріщини.

Водночас практична реалізація можливостей відеозйомки при проведенні експериментальних досліджень руйнування, особливо при вивченні швидкоплинних нестационарних процесів руйнування, часто пов'язана з певними труднощами. За відсутності апаратного зв'язку відеокамери з випробувальною машиною виникає проблема встановлення значень, які мали параметри навантаження зразка у моменти фіксації відеокадрів профілю тріщини.

Аналіз недавніх досягнень та публікацій. Не зважаючи на широке використання відеозйомки при проведенні експериментальних досліджень процесів руйнування тіл з тріщинами, відповідні публікації не містять детальних описів технічних особливостей реалізації відеозйомки. Автори публікацій [2–4] обмежуються відомостями про роздільну здатність відеоапаратури, в роботі [5] повідомляється тільки про те, що керування реєструючою апаратурою, в тому числі й цифровою відеокамерою, здійснювалося за допомогою комп'ютерної програми.

Ціль роботи. Розробка методики встановлення значень параметрів навантаження зразка, які відповідають моментам фіксації кадрів відеозйомки при проведенні експериментальних досліджень швидкоплинних процесів руйнування тіл з тріщинами – методики синхронізації процесів реєстрації параметрів навантаження і відеозйомки.

Методика синхронізації процесів реєстрації параметрів навантаження і відеозйомки. Сучасні випробувальні машини, які працюють під цифровим керуванням, забезпечують періодичну реєстрацію параметрів навантаження зразка у вигляді записів, що містять час реєстрації в системі відліку часу випробувальної машини, і значення параметрів навантаження, виміряних у момент реєстрації. Цифрові відеокамери у полі кожного відеокадра фіксують час його зйомки, але виміряний у своїй системі відліку часу. Оскільки, за відсутності апаратного зв'язку відеокамери з випробувальною машиною, початок відліку часу засобами випробувальні машини не збігається з початком відліку часу засобами відеокамери, то зафіксований час зйомки відеокадра і час реєстрації параметрів навантаження відрізняються між собою.

Для розв'язання задачі синхронізації процесів (узгодження результатів) навантаження і відеозйомки пропонується одночасно реєструвати засобами випробувальної машини і відеокамерою деяку зв'язуючу подію. Позначимо час настання такої події, зафіксований засобами випробувальної машини і відеокамерою відповідно, $t_0^{маш}$ і $t_0^{відео}$. Приймаючи, що результати вимірювання рівних проміжків часу засобами випробувальної машини і відеокамерою відрізняються несуттєво, можна вважати, що кадру, зафіксованому відеокамерою в момент часу $t^{відео}$, який настав після

моменту настання зв'язуючої події через проміжок часу $\Delta t = t^{відео} - t_0^{відео}$, відповідають

значення параметрів навантаження, виміряні в момент часу в системі відліку часу випробувальної машини $t^{маш} = t_0^{маш} + \Delta t$. У загальному випадку параметри навантаження зразка не вимірюються і не фіксуються випробувальною машиною саме у момент часу $t^{маш}$. Тому значення, які мали параметри навантаження зразка у моменти фіксації відеокадрів, мають встановлюватися шляхом інтерполяції на підставі значень цих параметрів, зареєстрованих випробувальною машиною у моменти часу, що передували та/або йшли за моментом часу $t^{маш}$.

Запропонована методика синхронізації процесів навантаження зразка і його відеозйомки перевірена при експериментальному дослідженні закономірностей

швидкоплинного процесу стрибкоподібного росту тріщини в процесі розтягу зразка з тонколистового металу.

Навантаження зразка і реєстрація параметрів навантаження. Для проведення випробувань використовувався зразок MR(T) з листового прокату алюмінієвого сплаву Д16АТ товщиною $B=1,5$ мм, шириною $2W_0=120$ мм і висотою $2H_0=12$ мм, що містить центральний отвір діаметром $2r_0=2$ мм, див. рис.1а. Розтягуюче навантаження прикладалося до зразка шляхом переміщення активного захвату сервогідравлічної випробувальної машини УИМ-25 з постійною швидкістю $0,001$ мм/сек.

Засобами цифрового контролера *MTS FlexGT 493.10/793.00* [6,7] вимірювались і водночас реєструвались такі параметри: час вимірювання та реєстрації t ; розтягуюче навантаження P ; зміщення штока гідроциліндра пристрою навантаження $2v(L)$ і зміщення $v(m)$ точок m центрального отвору. Діаграми навантаження $P-v(L)$ і $P-v(m)$ зображені на рис.1б.

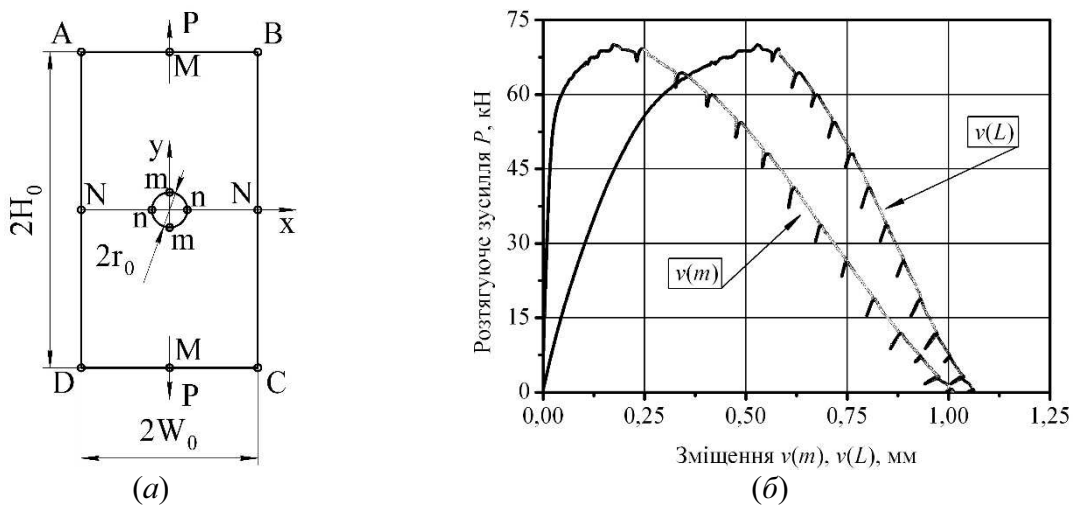


Рисунок 1. Зразок MR(T) (а) і діаграми навантаження $P-v(L)$ і $P-v(m)$ (б)

Figure 1. The sample MR(T) (a) and loading diagrams $P-v(L)$ and $P-v(m)$ (b)

Цифрова відео- та фотозйомка. Для вимірювання довжини тріщини $2c$ проводили цифрову мікровідеозйомку за допомогою стереоскопічного тринокулярного мікроскопа *Konus Crystal Pro* (1) та CMOS – відеокамери *Levenhuk C800 NG* (2), яку встановлювали на місце одного з окулярів мікроскопа (рис.2а) і під'єднували до керуючого комп'ютера через порт USB 2.0. Кадрова частота відеозйомки становила 1,9 кадра за секунду, розмір кадрів 3264×2448 pix.

В один із окулярів мікроскопа *Konus Crystal Pro* встановлювали лазерну указку *LaserMarker* (3), що керувалась цифровим виходом *Digital Output* контролера *MTS Flex GT* [4] і являла собою досить помітну світлову пляму в полі зору відеокамери. Для позиціювання відеокамери відносно зразка на поверхню зразка були нанесені вертикальні мітки – маркери (7), з кроком 5 мм. Центр відеокадру визначався положенням центрального маркера (8) (рис.2б). Для калібрування масштабу відеокамери використовувалась калібрувальна лінійка *Sigeta TS-M1* з ціною поділки 0,01 мм. Отримана в результаті калібрування масштабна лінійка (5), величина збільшення мікроскопа (4) і поточний час зйомки (6) фіксувались в нижньому правому куті відеокадру (рис.2б, в). Запис відеофайлу проводився з використанням кодека *XVID* у форматі *.avi* з подальшим перетворенням відеофільму в серію кадрів програмою *Virtual Dub 1.10.4*. Керування відеокамерою проводилося за допомогою програми *Levenhuk ToupView*.

З метою перевірки результатів вимірювання довжини тріщини також виконувалась цифрова оптична макрозйомка з використанням фотокамери *Canon PowerShot 7* у режимі інтервальної фотозйомки з частотою 1 кадр у 5 секунд [8].

Синхронізація. В якості зв'язуючої події використовувалось зникнення світлової плями від лазерної указки, що керується цифровим виходом *Digital Output* контролера випробувальної машини. Після запуску відеокамери в полі відеокадру реєструвався поточний час зйомки в системі відліку часу відеокамери. Запуск випробувальної машини здійснювався після запуску відеозйомки.

Процедура керування випробувальною машиною складалася з двох частин, що виконувались послідовно. Перша частина, що виконувалась відразу після запуску машини, одночасно запускала процес реєстрації параметрів навантаження, включаючи реєстрацію часу навантаження t , і через цифровий вихід *Digital Output* вмикала лазерну указку, що призводило до появи в полі відеокадру світлової плями. Через деякий час сигнал цифрового виходу *Digital Output* програмно вимикався й у цей момент світлова пляма в полі відеокадру зникала. Час здійснення відеокадру з відсутньою світловою плямою, зафіксований у полі кадру в системі відліку часу відеокамери (рис.2 поз.6) приймався як t_0^{video} . Друга частина процедури керування випробувальною машиною, що містила власне процес навантаження зразка, починала виконуватись одразу після відключення сигналу цифрового виходу *Digital Output*. Момент відключення сигналу реєструвався й надалі розглядався як час початку навантаження зразка в системі відліку часу контролера випробувальної машини, t_0^{mach} .

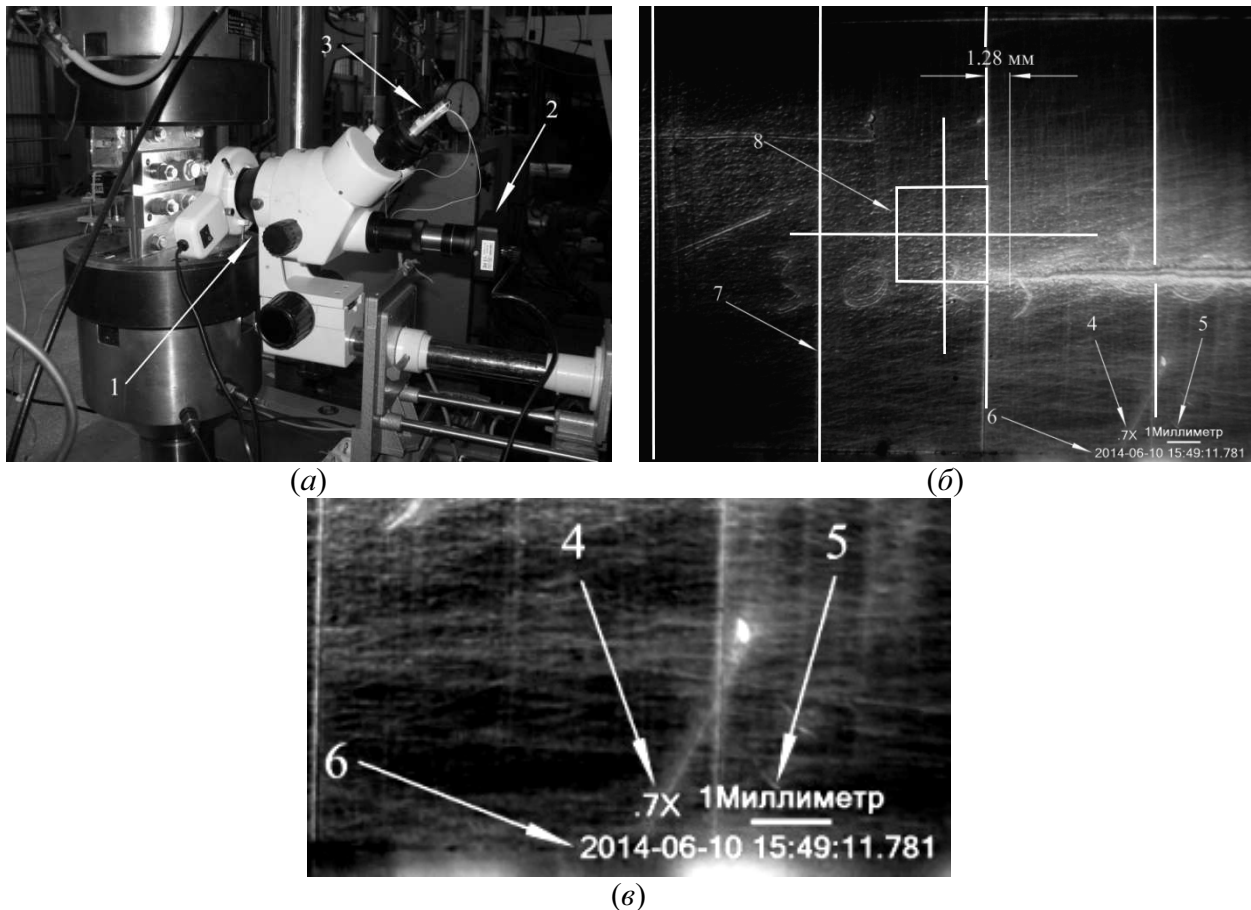


Рисунок 2. Обладнання для цифрової мікрівідеозйомки (а), відеокадр(б) і фрагмент відеокадру (в) в околі вершини тріщини

Figure 2. Equipment for digital microvideography (a), video frame (b) and fragment of video frame (c) of the crack tip vicinity

Результати перевірки методики відеозйомки. На рис.3 наведено фрагмент діаграми часової розгортки одного циклу стрибкоподібного росту тріщини в зразку MR(T), що відображає отримані результати. Результати вимірювання довжини тріщини, отримані з допомогою мікровідеозйомки (символ o) макروفотозйомки (символ Δ) добре узгоджуються між собою. При цьому мікровідеозйомка забезпечила отримання детальнішої інформації щодо процесу росту тріщини. За запропонованою методикою визначені параметри навантаження зразка у момент фіксації відеокадру профілю тріщини у характерний момент розвитку процесу руйнування (час навантаження у системі відліку випробувальної машини, $t = 1702,457$ сек; довжина тріщини, $c = 37,84$ мм; зміщення $v(m) = 0,744$ мм; зміщення штока гідроциліндра пристрою навантаження, $v(L) = 0,878$ мм; навантаження, $P = 22,390$ кН).

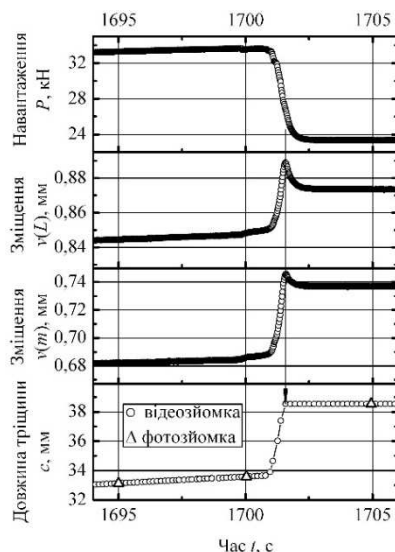


Рисунок 3. Часова розгортка одного циклу стрибкоподібного росту тріщини в зразку MR(T)

Figure 3. Time base for one cycle of the step-wise crack growth in the specimen MR (T)

Висновки. Розроблено й перевірено методику визначення параметрів навантаження зразка у моменти фіксації відеокадрів профілю тріщини.

Conclusions. The procedure for digital microvideography of the extending crack tip vicinity based on the synchronization process of recording of the specimen loading parameters and videography was developed.

Список використаної літератури

1. E2472–06e1. Standard test method for determination of resistance to stable crack extension under low-constraint conditions // ASTM. – 2011. – 26 p.
2. Burton, W. The Effect of Measurement Distance on the Experimental Characterization of Stable Tearing Behavior in Metallic Materials [Text] / W. Burton, S. Mahmoud, and K. Lease // Journal of Experimental Mechanics. – 2004. – Vol. 44, № 4. – P.425–432.
3. Heerens, J. On the determination of crack tip opening angle, CTOA, using light microscopy and 85 measurement technique [Text] / J. Heerens, M. Schodel // Eng. Frac. Mech. – 2003. – Vol. 70. – P. 417–426.
4. Darcis, Ph.P. Crack tip opening angle optical measurement methods in five pipeline steels [Text] / Ph.P. Darcis, C.N. McCowan, H. Windhoff, J.D. McColskey, T.A. Siewert, // Eng. Fract. Mech. – 2008. – Vol.75. – P.2453–2468.
5. Sakhalkar, A. Crack tip opening angle measurement methods and crack tunnelling in 2024-T351 aluminium alloy / A. Sakhalkar, E. Frink, S. Mahmoud, K. Lease // Strain: An International Journal for Experimental Mechanics [Электронный ресурс]. – 2011. – Vol. 47., S1 – e130 – e141. – Режим доступа: doi: 10.1111/j.1475-1305.2008.00579.x.
6. Model 793.10. MultiPurpose Test Ware. User manual // MTS 100-068-915G. – 2004. – 502 p.
7. Model 493.10/793.00 Controller Service. User manual // MTS 100-068-901E. – 2003. – 324 p.
8. Canon PowerShot G7. Руководство пользователя // CEL-SG2EA200 – 2006. – 170 c.

Отримано 01.10.2014