



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 92126

(13) U

(51) МПК

G01N 3/08 (2006.01)

G01N 19/08 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: а 2012 02408

(22) Дата подання заявки: 29.02.2012

(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: 11.08.2014

(41) Публікація відомостей
про заявку: 10.09.2013, Бюл.№ 17

(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: 11.08.2014, Бюл.№ 15

(72) Винахідник(и):

Личак Олег Васильович (UA),
Голинський Іван Стахович (UA),
Муравський Леонід Ігорович (UA)

(73) Власник(и):

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Г.В.
КАРПЕНКА НАН УКРАЇНИ,
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79601 (UA)

(54) СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ РОЗКЛАДУ ПОЛЯ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В ОКОЛІ ВЕРШИНИ ТРІЩИНИ У СТЕПЕНЕВІ РЯДИ ВІЛЬЯМСА

(57) Реферат:

Спосіб підвищення точності визначення коефіцієнтів розкладу поля механічних напружень в околі вершини тріщини у степеневі ряди Вільямса полягає у використанні більшої, ніж мінімально необхідно для визначення заданого числа членів ряду, кількості точок вимірювання чи визначення поля напружень в околі вершини тріщини та використання лише даних з області пружних деформацій. Для часткової компенсації впливу на результати визначення коефіцієнтів ряду Вільямса закономірних складових похибок визначеного чи виміряного поля напружень (компонентів поля напружень) та закономірної складової похибки методу визначення коефіцієнтів ряду Вільямса відповідно підбирають величину коефіцієнта ряду Вільямса, що задає величину постійної складової виміряного чи визначеного поля напружень та перевизначають решту коефіцієнтів Вільямса при фіксованому значенні постійної складової.

UA 92126 U

Корисна модель належить до дослідження міцності та тріщиностійкості матеріалів шляхом прикладання механічних зусиль, зокрема аналізу полів механічних напружень в околі вершини тріщини в матеріалі, та може бути використана для дослідження тріщиностійкості матеріалів та конструкцій при механічних навантаженнях.

Сучасні методи дослідження міцності та тріщиностійкості матеріалів та елементів конструкцій часто базуються на представленні компонентів поля напружень в області пружних деформацій біля вершини тріщини рядами Вільямса з заданим числом перших членів. Величини коефіцієнтів цих рядів (коефіцієнтів Вільямса) дають змогу визначати такі характеристики тріщиностійкості як коефіцієнт інтенсивності напружень, густина поверхневої енергії деформації, напрямок поширення тріщини, розмір та форма пластичної зони та ряд інших [1, 2, 3]. Отже, похибки визначення коефіцієнтів рядів Вільямса визначають похибки визначення параметрів тріщиностійкості.

Відомий спосіб підвищення точності визначення заданого числа коефіцієнтів Вільямса, що полягає у розкладі визначених в околі вершини тріщини компонентів поля напружень у ряди Вільямса з числом членів, більшим ніж задане [2].

Недоліком даного способу є те, що він не усуває вплив постійної складової похибки визначення компонентів поля напружень на похибку визначення коефіцієнтів, оскільки члени вищих порядків рядів Вільямса дають вклад лише у змінну складову компонентів поля напружень. Таким чином, використання більшого числа членів рядів дає змогу мінімізувати лише випадкову складову похибки визначення коефіцієнтів рядів Вільямса для членів нижчих порядків.

Відомі способи, пристрої та системи визначення механічних напружень на основі вимірювань [4] мають постійну складову похибки вимірювань, котра не може бути повністю компенсована. Відомі способи визначення поля механічних напружень шляхом моделювання деформацій у зразках матеріалів та елементах конструкцій з тріщинами під дією механічного навантаження (наприклад, методами кінцевих елементів та іншими методами [5]) використовують для розрахунків фізичні константи матеріалів (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та ін), величини яких відомі з кінцевою похибкою. Це також приводить до появи постійних складових похибок визначених компонентів поля напружень в області пружних деформацій біля вершини тріщини.

Найбільш близькими аналогами є способи підвищення достовірності та точності визначення заданого числа коефіцієнтів розкладу у ряди Вільямса компонентів поля механічних напружень в околі вершини тріщини при дослідженнях тріщиностійкості матеріалів, що полягають у визначенні механічних напружень в багатьох точках в околі вершини тріщини в зразку матеріалу чи конструкції з напруженнями, виборі точок, у яких деформації матеріалу є пружними, визначенні заданого числа коефіцієнтів розкладу поля механічних напружень у ряди Вільямса ітераційними розрахунками методом найменших квадратів, використовуючи координати вибраних точок та величини компонентів поля напружень у них. Підвищення точності досягається шляхом використання числа точок визначених напружень більшого, ніж мінімально необхідне для визначення заданого числа членів рядів [6, 7]. Для визначення заданого числа коефіцієнтів розкладу у ряди Вільямса, як правило, використовують групу ітераційних методів найменших квадратів [6, 8, 9], у тому числі метод Ньютона-Рафсона, які мінімізують величину середнього квадрата відхилення між величинами компонентів напружень, визначеними у вибраних точках та величинами компонентів напружень у цих точках, розрахованими за формулами для рядів Вільямса з заданим числом коефіцієнтів.

Зазначені способи зменшують вплив випадкових складових похибок визначених компонентів поля напружень на точність визначення коефіцієнтів рядів Вільямса за рахунок використання значного числа точок вимірювань, однак не усувають вплив постійних складових похибок визначених компонентів поля напружень на точність визначення коефіцієнтів рядів Вільямса.

Постійні складові похибок визначення компонентів поля напружень виникають внаслідок неточності системи визначення компонентів поля напружень. Крім того, в процесі розв'язку системи нелінійних рівнянь при визначенні коефіцієнтів рядів Вільямса також можуть виникати постійні складові похибок відтворених компонентів поля напружень внаслідок роботи ітераційної процедури методу найменших квадратів [10, 11].

В основу корисної моделі поставлено задачу створення способу підвищення точності та достовірності досліджень тріщиностійкості матеріалів та елементів конструкцій шляхом зменшення впливу постійних складових похибок визначення компонентів полів напружень на точність визначення величин заданого числа коефіцієнтів розкладу визначених компонентів поля напружень у ряди Вільямса, що дозволить забезпечити вищу точність та достовірність досліджень тріщиностійкості матеріалів.

Поставлена задача вирішується за рахунок підвищення точності та достовірності досліджень тріщиностійкості матеріалів та елементів конструкцій шляхом зменшення похибки визначення величин заданого числа коефіцієнтів розкладу компонентів поля механічних напружень в околі вершини тріщини у ряди Вільямса.

5 Даний спосіб включає встановлення величини коефіцієнта ряду Вільямса, що задає постійну складову поля напружень рівною одній четвертій від середньої величини нормальної компоненти напруження, паралельної до напрямку тріщини для вибраного набору точок та визначення решти заданих коефіцієнтів рядів Вільямса при фіксованому значенні цього коефіцієнта, використовуючи координати вибраних точок з області пружних деформацій в околі

10 вершини тріщини та величини напружень у них.

Крім того, передбачає компенсацію постійних складових величин визначених у вибраних точках тих компонентів поля напружень, для котрих у рядах Вільямса відсутні члени, що задають величину постійної складової поля напружень, та визначення заданого числа коефіцієнтів рядів Вільямса з використанням координат вибраних точок та компенсованих

15 величин компонентів поля напружень у них.

Крім того, передбачає введення додаткових постійних членів у ряди Вільямса, котрі не мають постійних членів, та визначення заданого числа коефіцієнтів рядів Вільямса з урахуванням введених додаткових членів, використовуючи координати вибраних точок та величини компонентів поля напружень у них.

20 Спосіб, що заявляється, забезпечує підвищення точності та достовірності досліджень тріщиностійкості матеріалів та елементів конструкцій за рахунок часткової компенсації чи усунення впливу постійних складових похибок визначення компонентів поля напружень та ітераційної процедури методу найменших квадратів на точність визначення коефіцієнтів рядів Вільямса.

25 Запропоновані способи використовували для підвищення точності визначення перших п'яти коефіцієнтів рядів Вільямса при дослідженнях тріщиностійкості зразків матеріалу Д16Т. Балковий зразок довжиною 200 мм тип 4 (10/20) L-T (прокат) згідно з вимогами ГОСТ 25.506-85 з центральною однобічною тріщиною, довжиною 10,5 мм піддавали центральному триточковому згину. Відстань між опорними роликками становила 170 мм, навантаження складало 981 Н. 30 Методом цифрової спекл-кореляції визначили компоненти поля деформацій у 1100 точках, розташованих у межах прямокутної області спостереження розмірами 18 × 16 мм навколо вершини тріщини. Компоненти поля напружень у точках спостереження були визначені розрахунковим шляхом на основі полів деформацій, виходячи з умов плоскої деформації зразка та механічних параметрів матеріалу Д16Т (модуль пружності рівний 89 ГПа, модуль зсуву 33 ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,328). Область пружних деформацій матеріалу було задано шляхом встановлення порогу напружень рівним межі пропорційності матеріалу Д16Т, а саме 250 МПа. 35 Точки, сума нормальних напружень в яких перевищувала цей поріг, були виключені з наступного розгляду. Таким чином отримали набір з 892 точок визначених компонентів поля напружень, які належать до області пружних деформацій.

40 Величини компонентів поля напружень у вибраних точках та їх координати використовували для визначення перших п'яти коефіцієнтів ряду Вільямса методом найменших квадратів. В результаті роботи ітераційної процедури методом найменших квадратів отримали наступні величини коефіцієнтів ряду Вільямса (у порядку зростання номера коефіцієнта): $7.485 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$, 5.972 МПа , $-482.171 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$, $727.412 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1}$, $-11252.209 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1.5}$. Визначали коефіцієнт 45 інтенсивності напружень як добуток першого коефіцієнта ряду Вільямса на $\sqrt{2\pi}$. Отримали величину $18.762 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$.

Отримані дані порівнювали з теоретично розрахованими величинами коефіцієнтів ряду Вільямса для заданих розмірів зразка і величини прикладеного зусилля, наведеними у [12]. Розраховані теоретично величини коефіцієнтів ряду Вільямса рівні (у порядку зростання номера 50 коефіцієнта): $7.246 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$, 6.137 МПа , $-499.639 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$, $705.307 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1}$, $-12235.211 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1.5}$. Визначали коефіцієнт інтенсивності напружень як добуток першого коефіцієнта ряду Вільямса на $\sqrt{2\pi}$. Отримали величину $18.163 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$.

Похибки визначення коефіцієнтів ряду Вільямса без застосування способів підвищення точності склали (у порядку зростання номера коефіцієнта): 3.30 %, -2.69 %, -3.50 %, 3.13 %, - 55 9.05 %. Похибка визначення коефіцієнта інтенсивності напружень склала 3.30 %.

Встановили величину другого коефіцієнта ряду Вільямса, що задає постійну складову поля напружень рівною одній четвертій від середньої величини нормальної компоненти напруження, паралельної до напрямку тріщини (22.344 МПа) та визначили решту коефіцієнтів ряду Вільямса при фіксованому значенні другого коефіцієнта методом найменших квадратів. Отримали 60 наступні величини коефіцієнтів (у порядку зростання номера коефіцієнта): $7.426 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$, 5.586

МПа, $497.454 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$, $715.159 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1}$, $-10731.765 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1.5}$. Визначали коефіцієнт інтенсивності напружень як добуток першого коефіцієнта ряду Вільямса на 42π . Отримали величину $18.614 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$.

Похибки визначення коефіцієнтів ряду Вільямса при використанні першого способу підвищення точності склали (у порядку зростання номера коефіцієнта): 2.48 %, -8.98 %, -0.44 %, 1.40 %, -12.29 %. Похибка визначення коефіцієнта інтенсивності напружень складала 2.48 %.

Для вибраного набору точок розраховували середні значення визначених компонентів поля напружень, для котрих у ряді Вільямса відсутні члени, що задають величину постійної складової поля напружень. Ці середні значення віднімали від відповідних компонентів поля напружень у результаті чого отримали модифіковані компоненти поля напружень з постійною складовою, рівною нулю. Визначали коефіцієнти ряду Вільямса з використанням модифікованих компонентів поля напружень методом найменших квадратів. Отримали наступні величини коефіцієнтів (у порядку зростання номера коефіцієнта): $7.238 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$, 5.856 МПа , $-503.456 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$, $768.005 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1}$, $-11376.408 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1.5}$. Визначали коефіцієнт інтенсивності напружень як добуток першого коефіцієнта ряду Вільямса на $\sqrt{2\pi}$. Отримали величину $18.143 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$.

Похибки визначення коефіцієнтів ряду Вільямса при використанні другого способу підвищення точності склали (у порядку зростання номера коефіцієнта): -0.11 %, -4.58 %, 0.76 %, 8.89 %, -7.02 %. Похибка визначення коефіцієнта інтенсивності напружень складала -0.11 %.

Вводили додаткові постійні члени у ряд Вільямса для тих компонентів поля напружень, котрі не мають постійних членів та визначали методом найменших квадратів коефіцієнти ряду Вільямса з урахуванням введених додаткових членів, використовуючи компоненти поля напружень. Отримали наступні величини коефіцієнтів (у порядку зростання номера коефіцієнта): $7.363 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$, 5.916 МПа , $-492.927 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$, $748.169 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1}$, $-11252.209 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1.5}$. Визначали коефіцієнт інтенсивності напружень як добуток першого коефіцієнта ряду Вільямса на $\sqrt{2\pi}$. Отримали величину $18.456 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5}$.

Похибки визначення коефіцієнтів ряду Вільямса при використанні третього способу підвищення точності склали (у порядку зростання номера коефіцієнта): 1.62 %, -3.60 %, -1.34 %, 6.08 %, -8.03 %. Похибка визначення коефіцієнта інтенсивності напружень складала 1.62 %.

Таким чином, застосування даного способу дозволило суттєво зменшити похибку обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень, критичне значення якого задає межу тріщиностійкості матеріалу.

Підвищення точності та достовірності досліджень тріщиностійкості матеріалів та елементів конструкцій досягається за рахунок зменшення похибки визначення заданого числа коефіцієнтів рядів Вільямса внаслідок встановлення величини коефіцієнта ряду Вільямса, що визначає постійну складову поля напружень рівною одній четвертій від середньої величини нормальної компоненти механічного напруження паралельної до напрямку тріщини для вибраного набору точок з області пружних деформацій навколо вершини тріщини та визначення решти заданих коефіцієнтів рядів Вільямса при фіксованому значенні цього коефіцієнта; усуненні постійної складової для тих компонентів поля напружень, для котрих у рядах Вільямса відсутні члени, що задають величину постійної складової, та визначення заданого числа коефіцієнтів рядів Вільямса, використовуючи координати вибраних точок та модифіковані величини компонентів поля напружень у них; введення додаткових постійних членів у ряди Вільямса, що не мають постійних членів.

Джерела інформації:

1. M.L. Williams. On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack. -ASME Journal of Applied Mechanics.-1957.-24. - pp. 109-114.

2. R.K.L. Su, W.J. Feng Accurate determination of mode I and II leading coefficients of the Williams expansion by finite element analysis. - Finite Elements in Analysis and Design.-2005.-41, n. 11-12. -pp. 1175-1186.

3. Y.J. Chao, S. Liu and B.J. Broviak Brittle Fracture: Variation of Fracture Toughness with Constraint and Crack Curving under Mode I Condition. -Experimental Mechanics.-2001.-41, № 3. - pp. 232-241.

4. P.J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia Residual stress Part 1-Measurement techniques. - Materials Science and Technology.-2001.-17. - pp. 355-365.

5. Q.Z. Xiao and B.L. Karihaloo Improving the accuracy of XFEM crack tip fields using higher-order quadrature and statically admissible stress recovery. - Int. J. Numer. Meth. Engng.-2006.-66. - pp. 1378-1410.

6. M.R. Ayatollahi, M. Nejati Experimental evaluation of stress field around the sharp notches using photoelasticity. - Materials & Design.-2011.-32. - pp. 561-569.

7. P Lopez-Crespo, A Shterenlikht, E A Patterson, J R Yates, and P J Withers The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation. -J. Strain Analysis.-2008.-43. - pp. 769-780.

5 8. J.R. Lesniak, D J Bazile, B R Boyce, M J Zickel, K I Cramer, C S Welch Stress Intensity Measurement via Infrared Focal Plane. - Nontraditional Methods of Sensing Stress, Strain, and Damage in Materials and Structures, ASTM STP 1318, in George F. Lucas and David A. Stubbs Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.-1997. -pp. 208-220.

10 9. Tae-Hyun Baek and Christian P. Burger Accuracy improvement technique for measuring stress intensity factors in photoelastic experiment. - Journal of Mechanical Science and Technology.-1991.-5. - pp. 22-21.

10 10. P. LANCASTER Error Analysis for the Newton-Raphson Method. -Numerische Mathematik.-1966.-9. - pp. 55-68.

15 11. T. Yamamoto Historical developments in convergence analysis for Newton's and Newton-like methods. - Journal of Computational and Applied Mathematics.-2000.-124.-pp. 1-23.

12. B.L. Karihaloo, Q.Z. Xiao Higher order terms of the crack tip asymptotic field for a notched three-point bend beam. - International Journal of Fracture.-2001. -U2.-pp. 111-128.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

20

1. Спосіб підвищення точності визначення коефіцієнтів розкладу поля механічних напружень в околі вершини тріщини у степеневі ряди Вільямса, що полягає у використанні більшої, ніж мінімально необхідно для визначення заданого числа членів ряду, кількості точок вимірювання чи визначення поля напружень в околі вершини тріщини та використання лише даних з області пружних деформацій, який **відрізняється** тим, що для часткової компенсації впливу на результати визначення коефіцієнтів ряду Вільямса закономірних складових похибок визначеного чи виміряного поля напружень (компонентів поля напружень) та закономірної складової похибки методу визначення коефіцієнтів ряду Вільямса відповідно підбирають величину коефіцієнта ряду Вільямса, що задає величину постійної складової виміряного чи визначеного поля напружень та перевизначають решту коефіцієнтів Вільямса при фіксованому значенні постійної складової.

25

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що при навантаженнях типу поперечного зсуву, а також для тих компонентів поля напружень при навантаженні типу нормального відриву, для котрих у рядах Вільямса відсутні члени, що задають величину постійної складової поля напружень, усувають постійну складову величини виміряного чи визначеного поля напружень та визначають коефіцієнти рядів Вільямса на основі модифікованих значень полів напружень.

35

3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що вводять додаткові постійні члени не залежні від радіуса чи кута у ряди Вільямса для тих типів навантаження та компонентів поля напружень, котрі не мають таких членів та визначають коефіцієнти рядів з урахуванням введених постійних членів.

40

Комп'ютерна верстка Д. Шеверун

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601