

УДК 539.421

В. Науменко¹, докт. техн. наук; **І. Ліманський²**; **Р. Кравчук¹**

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

²Державне підприємство «АНТОНОВ»

ПЕРЕРИВЧАСТЕ РУЙНУВАННЯ ТА ХАРАКТЕРНІ СТАНИ ТРІЩИНИ

Резюме. Розроблено методику експериментального дослідження стрибкоподібного росту наскрізної тріщини в листових металах. Встановлено, що пружно-пластичне руйнування тонколистового алюмінієвого сплаву в умовах загальної текучості являє собою процес переривчастої зміни поздовжніх і поперечних розмірів порожнини тріщини. Запропонований новий підхід до опрацювання та інтерпретації даних про переривчасте руйнування зразків з центральним отвором при однобічному розтягу, що базується на аналізі діаграм зміни параметрів експерименту в часі. Розглянуто процедуру отримання мінімально необхідного набору даних, що дозволяє визначати характерні стани стрибкоподібно зростаючої тріщини. Показано, яким чином результати даної роботи можуть бути використані при оцінюванні руйнування високонавантажених деталей, що містять відносно короткі наскрізні вирізи.

Ключові слова: переривчасте руйнування, тонколистові метали, діаграми стрибкоподібного росту тріщин, залежності вимірюваних змінних від часу, характерні стани тріщини.

I. Naumenko, **V. Limansky**, **R. Kravchuk**

DISCONTINUOUS FAILURE AND CHARACTERISTIC CRACK STATES

Summary. The paper is devoted to the development of procedure for obtaining, processing and interpreting of the initial data on step-wise propagation of the through crack in the rectangular plate with a central opening under uniaxial tension. It is assumed that use of this procedure makes it possible to evaluate (separately) the local effects, which deal with to the crack propagation within the fracture development zone, and the effects, which deal with to the global plastic deformation of the specimen in question. The primary problems on the way to such procedure are the following: 1) Decision on configuration and dimensions of the specimen having an initial stress concentrator, which enables one to obtain the experimental diagrams with a sufficiently extended region of the step-wise growth of the crack; 2) Determination of the loading rate range that is consistent with quasi-static development of the specimen fracture process; 3) Determination of the minimally required set of initial data and their presentation, which simplifies the analysis of experimental data and, simultaneously, enhances their accuracy; 4) Determination of specific states for the crack tip region and justification of the field of possible practical use of the results.

It was found that the preferred configuration of the specimen for investigation on discontinuous fracture is the rectangular plate, which undergoes fracture under conditions close to those for transverse plane strain. A circular hole with a relatively smaller diameter of $2r_0$ is situated in the center of the plate with a ratio of $2H_0$ (height) to $2W_0$ (width) which equals 0,1. It is shown that with velocity of the active grip which equals or is less than 0,001 mm/sec, the experimental diagrams covering sufficiently extended regions of discontinuous fracture. The analysis of the time dependences of the registered variables demonstrates that each crack step can be described using six specific conditions for its tip region. Among them there are such conditions, which can be used in solution of two basic problems that are important from the practical point of view. The paper presents the results of tests and their ways of use in the estimation of fracture of highly loaded components with relatively short through cracks.

Key words: discontinuous failure, sheet metals, step-wise crack growth diagrams, time dependence of the measured variables, characteristic crack states.

Проблемна область дослідження. Одна з основних первинних передумов, що використовувалася розробниками стандартних методів визначення статичної тріщиностійкості листових металів [1–3], може бути сформульована таким чином.

Стабільний ріст достатньо протяжної тріщини відриву в пружно-пластичному тілі (зразку) являє собою неперервний процес, що задовольняє вимогу енергетичного балансу

$$dU = dW_{el} + dW_{pl} + d\Gamma \quad (1)$$

де dU – приріст роботи зовнішніх сил; dW_{el} та dW_{pl} – зворотна та незворотна складові приросту внутрішньої енергії зразка, відповідно; $d\Gamma$ – приріст поверхневої енергії, що ототожнюється з роботою сил зчеплення всередині зони розвитку процесу руйнування. Стандарти [1–3] в неявному вигляді використовують загальноприйнятну гіпотезу про те, що наскрізна тріщина зростає неперервно, тобто у формулі (1) виконується умова $\Delta c \rightarrow 0$, де Δc – приріст довжини тріщини.

Проте у випробуваннях зразків з листових матеріалів різної фізичної природи часто спостерігається стрибкоподібний ріст наскрізних макротріщин. Судячи з чисельності конкуруючих моделей переривчастого руйнування, відсутня прийнятна теорія фізичного явища, що розглядається. Тому в рамках даної роботи багато уваги приділено систематичному експериментальному дослідженню стрибкоподібного розвитку наскрізних тріщин в одному з типових модельних матеріалів механіки пружно-пластичного руйнування.

Аналіз результатів досліджень переривчастого руйнування. Пружно-пластичне руйнування тіла з тріщиною в загальному випадку можна представити як явище чергування двох процесів, а саме, переривчастого видовження тріщини і переривчастого розширення її порожнини. Один з принципово важливих результатів теоретичних досліджень стрибкоподібного росту тріщин відомий під назвою енергетичний Парадокс Райса. Згідно з [4], при виконанні вищезгаданої умови неперервності процесу руйнування тіла із незміцнювального матеріалу, швидкість вивільнення пружної енергії G дорівнює нулю. В такому випадку робота зовнішніх сил U витрачається на формування і просування пластичної зони, тобто відсутнє джерело енергії, необхідної для подолання сил когезійного зчеплення Γ між частинками матеріалу всередині кінцевої області (КО) зростаючої тріщини.

Існування Парадокса Райса спочатку було підтверджено, а потім частково спростовано результатами чисельних розрахунків руйнування пластини з лінійно-зміцнювального матеріалу. Автори робіт [5,6] показали, що у випадку неперервного росту тріщини, введений ним енергетичний параметр G^{Δ} , прямує до нуля. Проте при повторному (детальнішому) розгляді цієї ж задачі [7] було встановлено, що насправді параметр G^{Δ} прямує до деякого скінченного значення швидкості вивільнення пружної енергії G .

З безлічі публікацій, присвячених розробленню теорій переривчастого руйнування, частина з яких представлена в критичному огляді [8], виділимо роботи [9–11]. Перша з них присвячена опису так званої теорії критичних відстаней (theory of critical distances). Припускається, що тріщина зростає переривчасто і що розмір стрибкоподібних приростів тріщини визначається мікроструктурою і деформаційною поведінкою матеріалу [9]. В роботі [10], очевидно вперше, встановлений зв'язок між величиною стрибкоподібного приросту тріщини Δc і відповідного йому падіння зовнішнього навантаження ΔF . І, нарешті, один з основоположників механіки переривчастого руйнування [11] запропонував модель стрибкоподібного росту тріщини, що базується на таких твердженнях. Тріщина починає поширюватися всередині зони розвитку процесу руйнування, що розташовується перед її вершиною. У випадках, коли тріщина стартує з вершини, процес руйнування повинен бути неперервним.

Розробники цих [9–11] та інших теоретичних моделей переривчастого руйнування, як правило, пропонують визначати величини стрибкоподібного приросту тріщини Δc за допомогою мікроструктурного аналізу поверхонь руйнування

випробуваного зразка. Слід зазначити, що при спробі встановити зв'язок між змінними навантаження і переміщення точок прикладання зовнішніх зусиль у роботі [10] була використана так звана діаграма двостадійного розвитку процесу руйнування. Ця діаграма, будучи загальноприйнятою, несумісна з експериментальними діаграмами стрибкоподібного росту тріщини в зразках з тонколистового алюмінієвого сплаву Д16АТ, які будуть представлені в даному повідомленні.

Мета роботи. Розробити методику визначення характерних, тобто важливих з практичної точки зору, станів наскрізної тріщини під час переривчастого руйнування зразків з листового металу в умовах загальної текучості. В майбутньому цю методику буде використано для отримання розмежувальних оцінок ефектів, що стосуються двох джерел поглинання енергії (роботи зовнішніх сил) випробуваним зразком. Це незворотні витрати енергії для утворення вільних поверхонь всередині повністю розвиненої зони процесу руйнування і витрати енергії на пластичне деформування зразка.

Задачі дослідження. Наша відмова від повсюдного використання гіпотези про неперервність процесу руйнування зумовлена прагненням розширити рамки застосування новітніх методів стандартних випробувань листових металів на тріщиностійкість [2,3]. Для цього треба розв'язати ряд методологічних задач, з яких першочерговими є задачі даного дослідження. По-перше, необхідно визначити найпридатнішу конфігурацію і розміри зовнішніх границь зразка. По-друге, треба визначити, початковому концентратору напружень якої геометрії необхідно віддати перевагу. Зрозуміло, що оптимальний набір геометричних параметрів зовнішньої і внутрішньої границі проблемної області зразка повинен забезпечувати отримання експериментальних діаграм з достатньо протяжними ділянками стрибкоподібних подовжень і самовільних зупинок тріщини. Крім того, треба обмежувати діапазон швидкостей навантаження, всередині якого процес деформування матеріалу кінцевої області тріщини можна вважати квазістатичним. Розв'язок цих задач відкриває шлях до розв'язання основної задачі даного дослідження. Такою є розроблення методики визначення характерних станів наскрізної тріщини в процесі переривчастого руйнування зразка з листового металу в умовах загальної текучості.

Модельний матеріал. Для ілюстрації запропонованих методологічних новацій ми використовуємо результати випробувань зразків (рис.1) з алюмінієвого сплаву Д16АТ товщиною $B_0=1,4\dots 1,5$ мм. Хімічний склад, структура і властивості сплаву Д16АТ майже ідентичні властивостям алюмінієвого сплаву AL2024-T3 в стані поставки. Зразки з даного сплаву і його аналогів частіше, ніж зразки з будь-яких інших металів, використовувались у відомих програмах міжлабораторних досліджень, спрямованих на апробацію методів інженерного оцінювання руйнування.

Під час випробувань стандартних зразків шириною $2W_0=12$ мм, вирізаних під різними кутами θ до напрямку прокатки, були визначені характеристики сплаву Д16АТ у лабораторних умовах. Для цього матеріалу властива помітна площинна анізотропія. Для поперечних ($\theta=90^\circ$) і поздовжніх ($\theta=0$) зразків ми отримали усереднені характеристики механічної поведінки сплаву Д16АТ у лабораторних умовах: $E=68$ і 67 ГПа, $\sigma_{02}=299$ і 338 МПа і $\sigma_B=446$ і 467 МПа відповідно. Наведені дані стосуються тільки випадку росту тріщини вздовж напрямку прокатки заготовок зі сплаву Д16АТ.

Базовий зразок. В експериментальних дослідженнях руйнування листових металів десятиліттями широко використовується зразок М(Т) з проблемною областю ABCD (рис.1а), що задовольняє розмірну вимогу ($2H_0 \geq 3W_0$). Стереотип пріоритетності випробувань зразка М(Т) властивий практично всім національним і міжнародним стандартам, призначеним для визначення характеристики K_c листових металів. Понад те, розробники новітніх нормативних документів [2] та [3] вважають конфігурацію зразка М(Т) переважною, тобто однією з найпридатніших для визначення критичної величини ψ_c кута $CTOA-\psi$ розкриття вершини зростаючої тріщини.

На наш погляд, більш відповідним зразком є прямокутна пластина, в центрі якої міститься мала недосконалість. Уявлення про малі структурні, фізичні та геометричні недосконалості зазвичай використовують у дослідженнях, присвячених побудові так званих граничних діаграм формозміни листових металів (Forming Limit Diagrams). Як показано в роботах [12–18], для наших цілей найбільш відповідним є геометрична недосконалість у вигляді наскрізного кругового отвору (рис.1б).

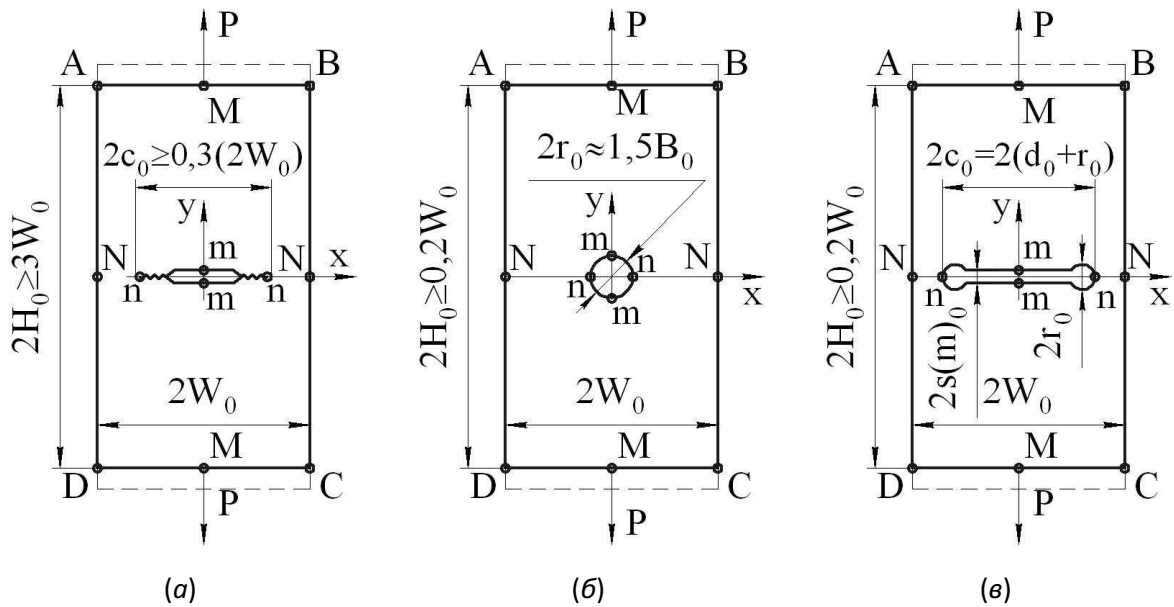


Рисунок 1. Зразки з тонколистових металічних матеріалів, що руйнувалися при квазістатичному прикладанні розтягуючого навантаження P в умовах близьких до плоского напруженого стану: а, б, в – відповідно зразки $M(T)$, $MR(T)$, $MDR(T)$

Figure 1. Specimens from sheet metallic materials, which undergo fracture under quasi-static tensile loading P under conditions close to plane stress state: a, b, c are the specimens $M(T)$, $MR(T)$, $MDR(T)$, respectively

Для забезпечення взаємоузгодженості процедури випробувань лабораторних зразків з процедурою наступних інженерних розрахунків тієї чи іншої деталі в [12–14] введено поняття *зразок базової конфігурації* (рис.1б). Припускається, що радіус кривини r_0 вільних поверхонь в околі точок n ініціювання процесу руйнування (рис.1б і 1в) завжди один і той же. Він не змінюється при зміні форми і розмірів зразка, а також при зміні протяжності $2d_0$ достатньо вузького вирізу ($s(m)_0 \leq 0,2r_0$ на рис.1в). Для зразків, що мають так звані припустимі розміри, раніше було запропоновано [15–18] використовувати, у першому наближенні такі розмірні вимоги: $(W_0)^* = 40B_0$ та $(r_0)^* = 0,7B_0$.

Оцінювання тріщиностійкості листового металу передбачає проведення випробувань зразків $MR(T)$ з різними розмірами $2H_0$ і $2W_0$. Найменша величина відношення цих розмірів ($H_0/W_0 = 0,1$ на рис.1б), забезпечує виконання в центральній частині гладкого зразка ($2H_0 = 5B_0$ і $2r_0 = 0$) умов поперечної плоскої деформації [19]. Для такого зразка усереднена величина $\bar{\varepsilon}_i$ еквівалентна деформації ε_i в момент ініціювання процесу руйнування в околі його центральної точки набуває гранично низького значення. Це значення відповідає локальному мінімуму на узагальненій залежності $\bar{\varepsilon}_i$ від усередненої величини \bar{h} показника тривісності напружень $h = \sigma_m / \sigma_e$, де σ_m – гідростатичне напруження; σ_e – еквівалентне напруження [20, 21].

Результатам випробувань зразків $MR(T)$ зі співвідношенням розмірів проблемної області ($H_0/W_0 = 0,1$) приписане значення стандартних характеристик

тріщиностійкості випробовуваного матеріалу. Їх величини відповідають еталонному рівню глобальної скутості деформацій. У цьому випадку для пластини з точковою недосконалістю ($2r_0=0$) усередненою мірою локальної скутості слугує рівність $\bar{h}=1/3$ [19–21]. Показник скутості деформацій \bar{h} для більшості тонкостінних конструкцій змінюється в діапазоні від $1/3$ до $2/3$. Такі конструкції зазвичай працюють в умовах одновісного та (або) двовісного розтягу, коли виконується вимога ($0 \leq k \leq 1$).

Для розв'язання першої з перерахованих вище задач були проведені порівняльні дослідження руйнування зразків (рис.1), що мають однакову ширину $2W_0$ і різні геометричні параметри початкового вирізу. Виявилось, що перспективною альтернативою зразку М(Т) є зразок MR(Т) з еталонним рівнем скутості деформацій. Він дозволяє: 1) реалізувати процес упорядкованої переривчастості росту тріщини; 2) звести до низького рівня ефекти втрати стійкості й швидкості росту тріщини при дослідженні руйнування листових металів; 3) змінювати рівень скутості деформацій шляхом зміни співвідношень розмірів $2H_0$ і $2W_0$; 4) забезпечити незмінність мікромеханізмів руйнування, починаючи із зародження природної тріщини та завершуючи моментом розділення зразка на частини; 5) однозначно ідентифікувати момент зародження тріщини простим та універсальним способом.

Процедура випробувань. Розтягуюче навантаження прикладалося до зразків шляхом контролю переміщення штока гідроциліндра випробувальної машини зі сталою швидкістю. Швидкість руху активного захвату (штока) машини при випробуванні зразків шириною $2W_0=120$ мм змінювалася від 0,001 до 1 мм/сек. При малих швидкостях переміщення захвату (0,01 і 0,001 мм/сек) усі командні процеси (перемикання швидкості навантаження, пауза під час навантаження і зміна напрямку руху активного захвату) здійснювалась як в автоматичному режимі, так і з пульта ручного керування.

Під час випробувань вимірювали і синхронно реєстрували наступні параметри: поточний час експерименту, t ; розтягуюче навантаження, P ; зміщення штока гідроциліндра навантажуючого пристрою, $2v(L)$ або зміщення защемлених границь зразка вздовж осі Oy , $2v(M)$; зміщення точок N уздовж осі Ox , $2u(N)$; зміщення точок m уздовж осі Oy , $2v(m)$ і зміщення точок n уздовж осі Ox , $2u(n)$. Крім того, у випробуваннях без використання плит для уникнення прогину, неперервно реєстрували переміщення $w(m)$ точок m уздовж нормалі до площини xOy (рис.1).

Усі ці величини зазвичай вимірювали з частотою 5 Гц , а в деяких випадках з частотою 100 Гц . Одночасно проводили відеозйомку профілю отвору і профілю тріщини цифровою відеокамерою з роздільною здатністю 8 Мріх з частотою 5 Гц . При випробуванні видовжених зразків ($2H_0 \geq 2W_0$) використовували в окремих випадках протипрогині плити, що обмежують зміщення $w(x,y)$ поверхонь зразка в поперечному до площини xOy напрямку.

Експериментальні діаграми. Типові діаграми деформування і руйнування зразків зі сплаву Д16АТ при контролі активного захвату випробувальної машини за переміщенням наведені на рис.2 і 3, а. Для зразків MR(Т) і зразків MDR(Т) висхідні та складні гілки діаграми розділені точкою s_0 ініціювання стрибкоподібного росту тріщини (рис.3а). Вона умовно співпадає з точкою максимального навантаження, що гранично спрощує методику визначення моменту переходу від формування зони розвитку процесу руйнування до утворення вільних поверхонь тріщини всередині цієї зони.

В складній гілці діаграми закарбована вся інформація про перебіг розвитку тріщини у випробовуваному зразку. Її вигляді залежить від: ширини пластини $2W_0$; відносної довжини тріщини c/W_0 ; відношення висоти пластини до її ширини H_0/W_0 ; пружної піддатливості силового ланцюга навантажуючого пристрою; режиму навантаження (контроль за переміщенням або контроль за зусиллям); частоти реєстрації поточних значень навантаження, переміщень та приростів тріщини;

швидкості переміщення активного захвату випробувальної машини, а також від відстані між точками вимірювання переміщень і кінцевою областю тріщини.

Вплив швидкості навантаження. Для серії ідентичних зразків з одного і того ж матеріалу шляхом варіювання великою кількістю згаданих змінних можна отримувати як гладкі діаграми, так і діаграми з виразними скачками. Для прикладу, на рис.4 показані діаграми навантаження P – зміщення берегів тріщини $2v(m)$ для серії однакових зразків зі сплаву Д16АТ (рис.1б), випробуваних на одновісний розтяг з різними швидкостями переміщення активного захвату навантажувального пристрою [14]. Як бачимо, відсутність стрибкоподібних змін величин P і $2v(m)$ для двох відносно високих швидкостей навантаження не є доказом того, що випробовуваному матеріалу властивий механізм неперервного розвитку процесу руйнування.

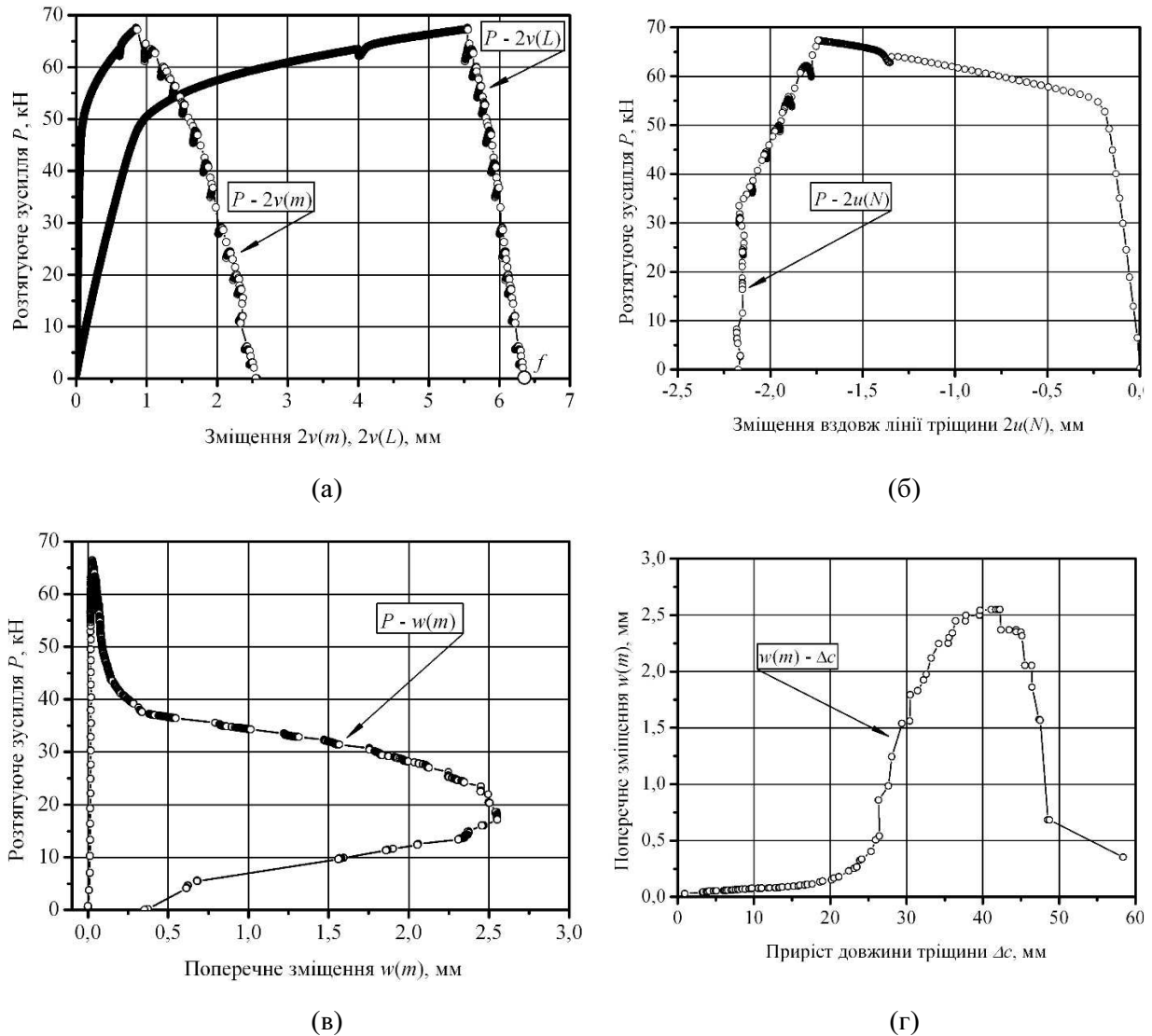


Рисунок 2. Типові діаграми деформування й руйнування зразка MR(T) шириною $2W_0=120$ мм і висотою $2H_0=120$ мм, у центрі якого міститься отвір діаметром $2r_0=2$ мм

Figure 2. Typical stress-strain and fracture diagrams of the specimen MR(T) of $2W_0=120$ mm in width and of $2H_0=120$ mm in height with a hole of $2r_0=2$ mm in diameter in its center

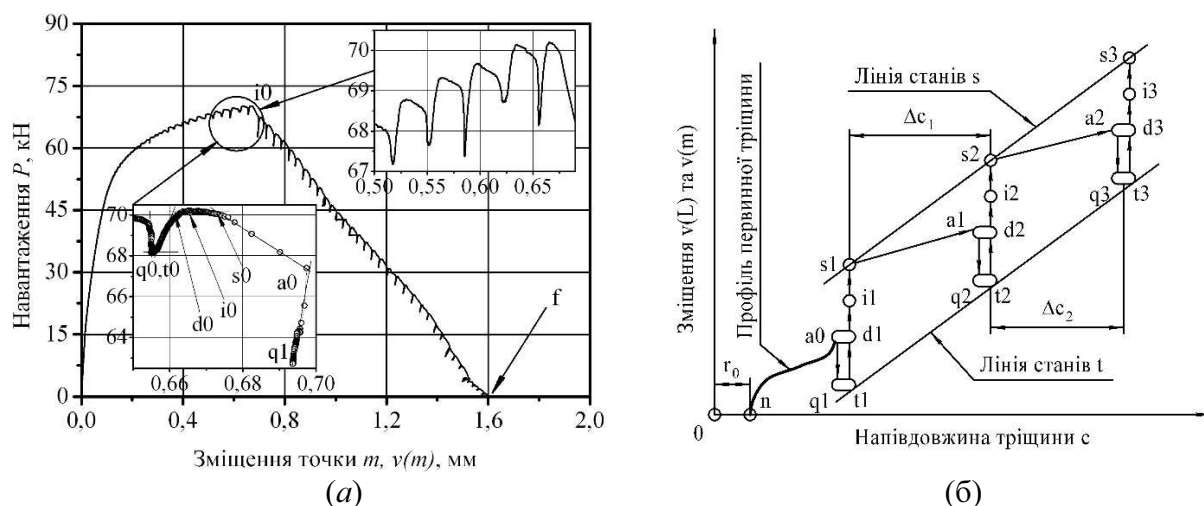


Рисунок 3. Діаграма випробувань стандартного зразка MR(T), що має розміри $2W_0=120$ мм, $2H_0=12$ мм, $2r_0=2$ мм, (а) й ідеалізована траєкторія стрибкоподібних змін розташування вершини початкової тріщини в площині v - c при фіксованому розташуванні крайньої точки n на її профілі (б): схематично показані перші три цикли самодовільної зупинки тріщини (точки a), закриття її берегів (a - q), постійності геометрії тріщини (q - t), розкриття (t - s) і росту (s - a) тріщини

Figure 3. Test diagram for standard specimen MR(T), $2W_0=120$ mm, $2H_0=12$ mm, $2r_0=2$ mm, (a) and idealized trajectory of step-wise repositioning of initial crack tip in the plane v - c at the fixed position of the extreme point n on its profile (b): first three cycles of spontaneous crack arrest (point a), closure of its faces (a - q), consistency of the crack geometry (q - t), opening (t - s) and growth of the crack (s - a)

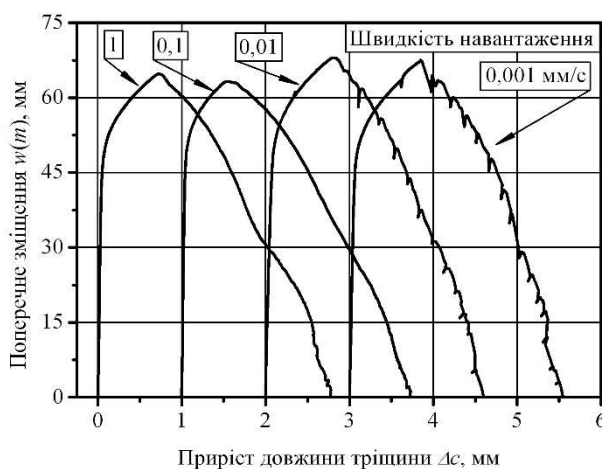


Рисунок 4. Порівняння експериментальних діаграм для чотирьох однакових зразків MR(T) шириною $2W_0 = 120$ мм і висотою $2H_0 = 120$ мм з отвором $2r_0 = 2$ мм. Під час випробувань частота реєстрації первинних даних була однакова – 5 Гц

Figure 4. Comparison of the experimental diagrams for four identical specimens MR(T) of $2W_0 = 120$ mm in width and of $2H_0 = 120$ mm in height with a hole of $2r_0 = 2$ mm. The frequency of registration of the initial data was identical during testing – 5 HZ

Для реєстрації під час навантаження довжини тріщини $2c$ стандарти [2,3] рекомендують використовувати цифрову фотозйомку, одним з варіантів якої є інтервальна фотозйомка з частотою 1 кадр за 5 секунд [22]. При навантаженні зразків MR(T) зі швидкістю 0,001 мм/сек часовий інтервал з моменту старту тріщини і до розділення зразка на частини дорівнює 984 сек. Це дозволяє при вищевказаній частоті фотозйомки отримати приблизно 196 фотознімків тріщини (рис.5г). Збільшення

швидкості навантаження суттєво зменшує кількість фотознімків тріщини, в чому можна переконатися, порівнюючи дані на рис.5а, 5б і 5в. Зрозуміло, що вибір оптимальної швидкості навантаження повинен бути узгоджений як з технічними можливостями випробувальної машини, так і з можливостями реєструючої апаратури.

Залежності параметрів механічної поведінки зразка від часу. Традиційний підхід до аналізу експериментальних даних базується на розгляді діаграм $P-2v(L)$, $P-2v(m)$, $P-2u(N)$, $P-w(m)$, $P-\Delta c$ (рис.2–5), що суттєво ускладнює аналіз стрибкоподібного росту тріщини. В загальному випадку на таких діаграмах практично неможливо достатньо точно ідентифікувати характерні стани тріщини q , t , d , i , s , a (рис.3а), що стосуються окремо кожного стрибка тріщини. Цим станам (подіям) відповідають певні набори зареєстрованих параметрів, тобто величин навантаження P , переміщень $v(L)$, $v(m)$, довжини тріщини c і поточного часу rt (*running time*).

Для визначення розташування характерних точок q , t , d , i , s , a на експериментальних діаграмах можна скористатися так званою «часовою розгорткою». Вона являє собою комбіновану діаграму, що характеризує зміни вимірних під час випробувань механічних параметрів (P , $v(L)$, $v(m)$, c), залежно від часу навантаження rt (рис.6). Часова розгортка будується з використанням шаблону «Stack» програми аналізу даних «OriginPro 9.0». Така форма представлення експериментальних даних зручна тим, що всі діаграми, що входять в розгортку, залежать від змін одного і того ж параметра, тобто від часу rt . Завдяки цьому суттєво спрощується процедура визначення величин P , $v(L)$, $v(m)$, c в ті чи інші моменти часу rt .

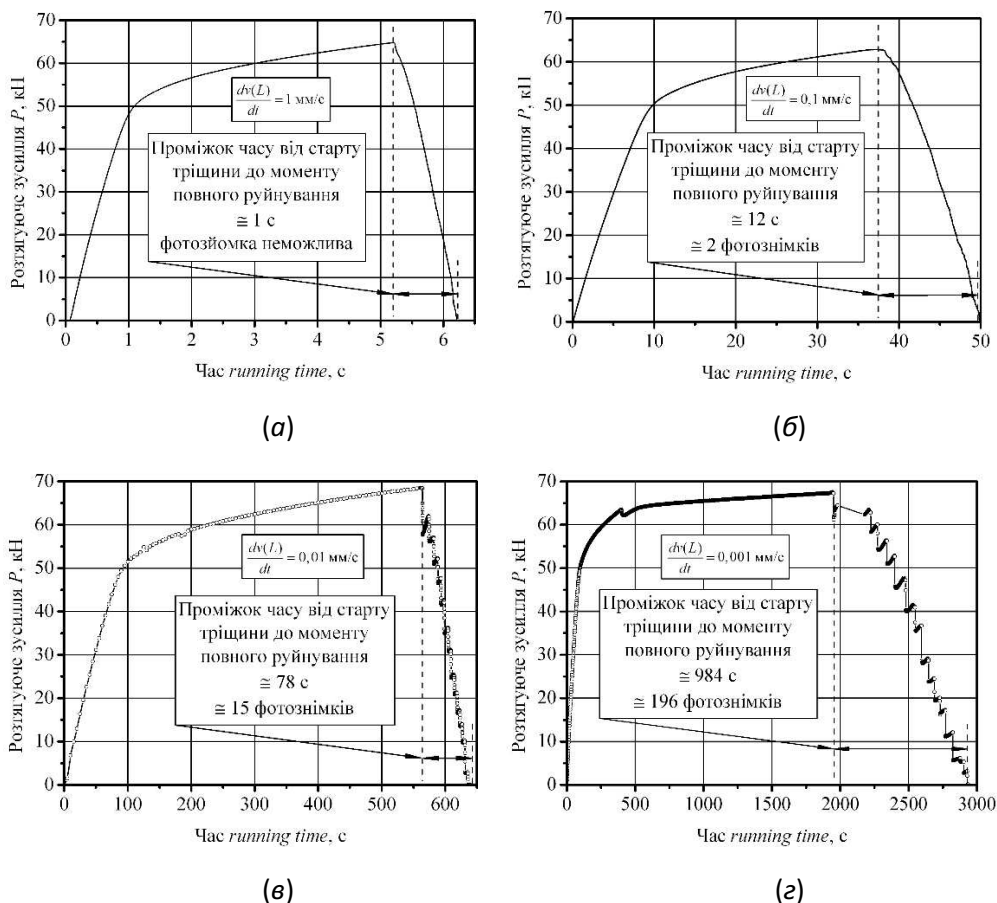


Рисунок 5. Діаграми зміни розтягуючого зусилля P в часі (*running time*) в залежності від швидкості руху активного захвату машини, отримані для серії однакових зразків MR(T) шириною $2W_0=120$ мм, висотою $2H_0=120$ мм з отвором діаметром $2r_0=2$ мм

Figure 5. Diagrams of variation of tensile load P in time depending on the velocity of the machine active grip obtained for identical specimens MR(T) of $2W_0=120$ mm and $2H_0=120$ mm with a hole of $2r_0=2$ mm in diameter

Характерні стани тріщини. Впорядковані ділянки зростання й падіння навантаження на спадній гілці діаграми відображають циклічні зміни геометрії порожнини отвору і двох тріщин, що виходять за його контур. Кожен цикл складається з шести стадій (рис.3): ($q-t$) – часовий інтервал незмінності контуру вказаної порожнини; ($t-d$) – збільшення поперечних розмірів порожнини внаслідок накопичення локалізованих пластичних деформацій; ($d-i$) – стрибкоподібне просування смуг пластичності всередині зон локалізованих деформацій; ($i-s$) – формування гранично ослаблених поверхонь, тобто повністю розвинених зон процесу руйнування; ($s-a$) – зняття сил когезійного зчеплення між поверхнями зон процесу руйнування, що ототожнюється з утворенням тріщин; ($a-q$) – закриття порожнини отвору і тріщин унаслідок самовільного розвантаження зразка.

Закриття берегів тріщини на стадії ($a-q$) знижує розтягуючі напруження в кінцевих областях тріщини, що зупинилась (рис.7б) до деякого характерного рівня. Далі на стадії ($q-t$) усі параметри, що реєструються, (P , $v(L)$, $v(m)$, c) залишаються незмінними (рис.7а). Отже, можна припустити, що в кожному циклі стрибкоподібного просування тріщини напружено-деформований стан матеріалу в околі вершини тріщини, що зупинилася, повинно бути одним і тим же. Цей часовий інтервал завершується в момент t початку збільшення зміщення активного захвату машини.

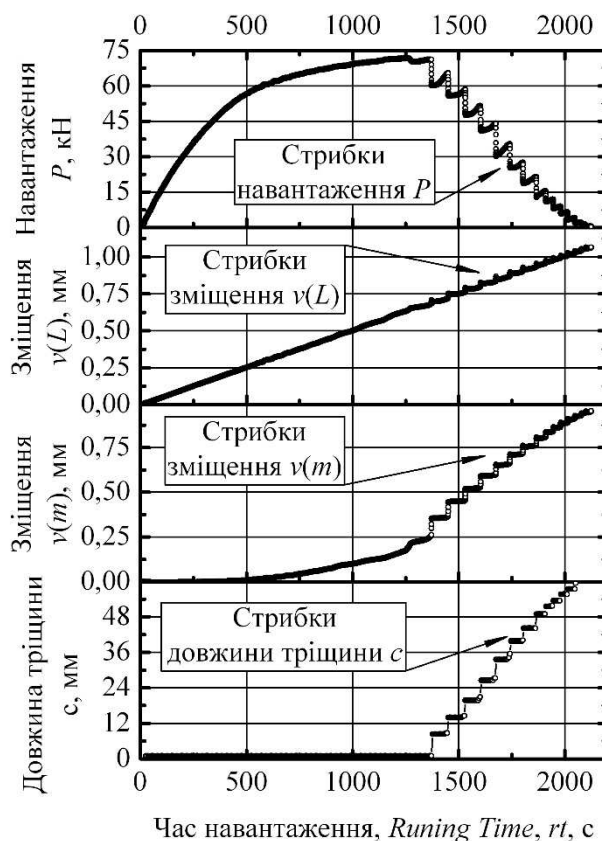


Рисунок 6. Діаграма часової розгортки параметрів P , $v(L)$, $v(m)$ і c від часу навантаження rt , отримана під час випробувань зразка MR(T) з розмірами проблемної області $2W_0=2H_0=120$ мм, в центрі якої міститься отвір діаметром $2r_0=2$ мм

Рисунок 6. Time-base diagram for parameters P , $v(L)$, $v(m)$ and c depending on the time of loading rt obtained during testing of the specimen MR(T) with dimensions of the problem domain $2W_0=2H_0=120$ mm and a hole of $2r_0=2$ mm in diameter in its center

Збільшення навантаження P при фіксованому розташуванні вершин тріщин (стадії ($t-d$), ($d-i$), ($i-s$), див. рис.3б) збільшує поперечні розміри порожнини тріщини.

Як наслідок, перед її вершинами формуються повністю розвинені зони процесу руйнування. Протяжність цих зон співпадає з протяжністю стрибкоподібного просування тріщини на стадії ($s-a$). Слід зазначити, що формування зон процесу руйнування супроводжується просуванням локалізованих шийок. Просування вершин шийок неможливо однозначно відрізнити від просування вершин тріщини. Тому видовження шийок, що спостерігається на стадії ($d-i-s$), умовно зображені на рис.7 як прирости тріщини.

Найбільший інтерес з наукової і практичної точок зору являють характерні стани тріщини, що стосуються стадій ($q-t$) і ($s-a$). Раніше [23] було показано, яким чином за допомогою аналізу стрибкоподібного росту тріщини можна за діаграмами $P-v(m)$ і $P-v(L)$ визначити деформаційні й енергетичні характеристики тріщиностійкості листового металу. Нижче стисло розглянуто проблему руйнування високонавантажених деталей з відносно короткими початковими вирізами. В таких деталях тріщини зароджуються і ростуть, як правило, після досягнення в їх робочому перерізі умов повної текучості.

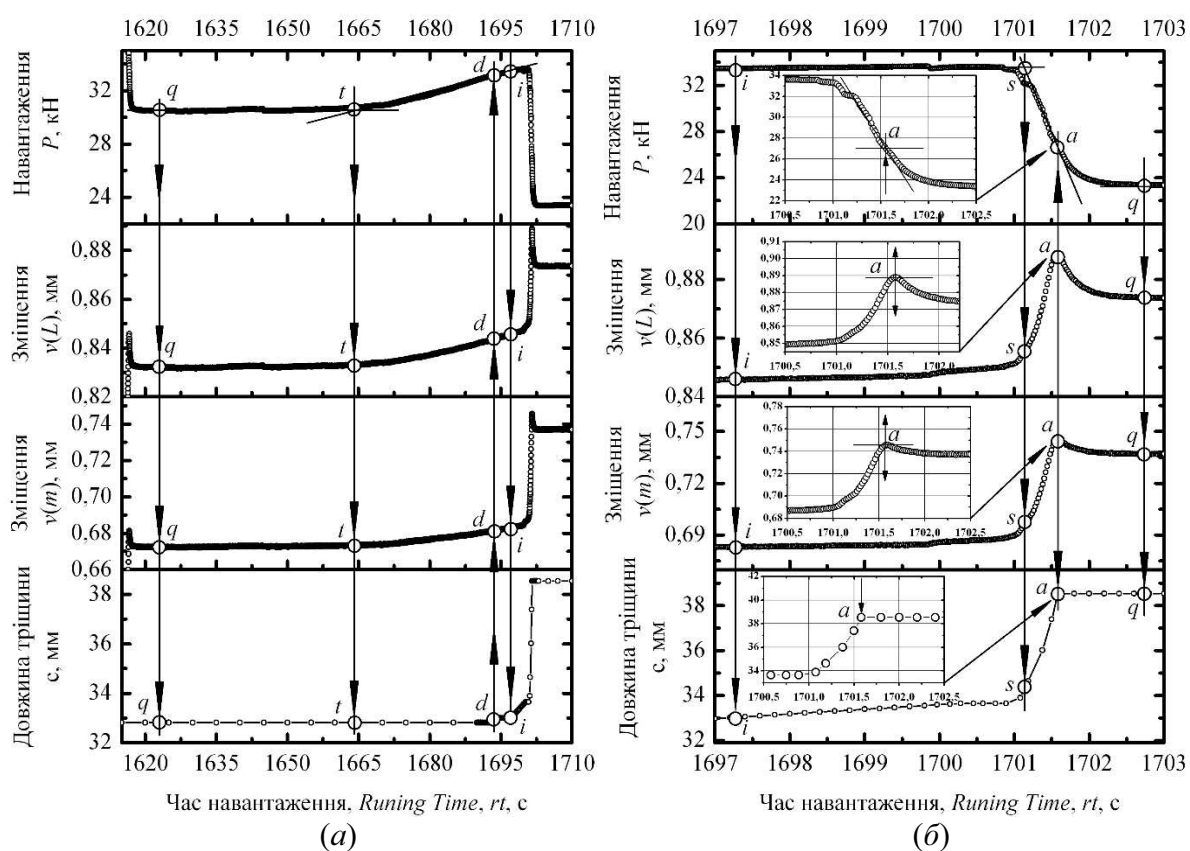


Рисунок 7. Часова розгортка одного циклу стрибкоподібного росту тріщини в зразку MR(T) з розмірами проблемної області $2W_0=120$ мм і $2H_0=12$ мм, в центрі якої міститься отвір діаметром $2r_0=2$ мм

Figure 7. Time-base for one cycle of the step-wise crack growth in the specimen MR(T) with dimensions of the problem domain $2W_0=120$ mm, $2H_0=12$ mm and a hole of $2r_0=2$ mm in diameter in its center

У рамках традиційного підходу до визначення граничного навантаження в тонкостінних деталях з наскрізними тріщинами максимальне (руйнуюче) навантаження в загальному вигляді описують виразом

$$F_{\max} = \sigma_M \times g(\text{геометрія деталі}) \times f(\text{геометрія дефекту}). \quad (2)$$

Тут σ_M – характеристика матеріалу, яку прийнято ототожнювати з результатами стандартних випробувань одновісним розтягом. Зокрема з границею текучості σ_{02} ,

границею міцності σ_b або з так званим напруженням течії $\sigma_f = 0,5 \times (\sigma_{02} + \sigma_b)$. Функції g (геометрія деталі) і f (геометрія дефекту) описують вплив на граничне навантаження відповідно геометрії деталі й геометрії дефекту. Тепер ці функції у більшості випадків визначають із використанням чисельних розрахунків [24,25].

Вищезгаданому характерному рівню розтягуючих напружень у кінцевих областях стаціонарної тріщини відповідає характерний рівень усереднених напружень σ_{Nt} у робочому перерізі зразка MR(T) (рис.8). Останні, в міру видовження тріщини в діапазоні ($c \geq 0,5W_0$), планомірно зменшуються внаслідок підсилення взаємодії вершин тріщини з вільними від зовнішніх навантажень поверхнями зразка. Ми вважаємо, що в якості силового критерію руйнування можна використовувати рівність $\sigma_N = \sigma_{Nt}^*$, що забезпечує відсутність росту тріщини при еталонному рівні скрутості пластичних деформацій. Критичне напруження σ_{Nt}^* визначається за величинами напружень σ_N , що стосуються діапазону відносно коротких тріщин ($c \leq 0,5W_0$). В даному дослідженні встановлено, що для модельного матеріалу характеристика $\sigma_{Nt}^* = 350$ МПа (рис.8).

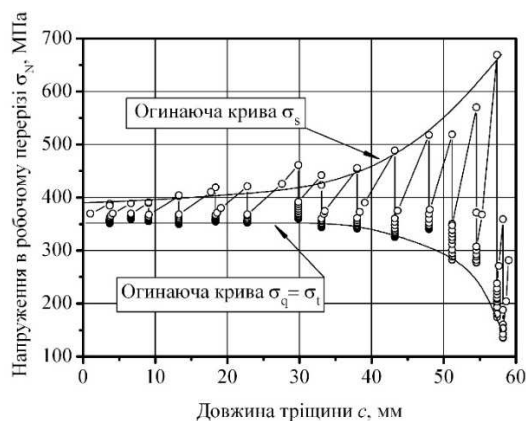


Рисунок 8. Залежність напружень σ_N від довжини тріщини в стандартному зразку MR(T) з тонколистового алюмінієвого сплаву Д16АТ

Figure 8. Dependence of stresses σ_N on the crack length in the standard specimen MR(T) manufactured from thin-sheet aluminum alloy D16AT

В світлі викладеного доцільно використовувати в критеріальному виразі (2) умову $\sigma_M = \sigma_{Nt}^*$. Ця рівність гарантує відсутність росту тріщин у робочому перерізі деталі в екстремально несприятливих умовах, близьких до умов поперечної плоскої деформації. Слід зазначити, що рівність $\sigma_M = \sigma_{Nt}^*$ дозволяє, користуючись величинами граничного навантаження F_{max} , визначити характерні значення J -інтегралу [24].

Висновки. Розроблена методика отримання, опрацювання та інтерпретації первинних даних переривчастого руйнування прямокутної пластини з центральним отвором за однісного розтягу. Обґрунтований вибір оптимальної конфігурації і розмірів пластини, а також прийнятної діапазону швидкостей навантаження, що забезпечують отримання упорядкованих, і водночас достатньо протяжних ділянок стрибкоподібного просування тріщини у випробовуваному зразку. Визначені характерні стани тріщини, що зародилася та просувається за незмінного мікромеханізму утворення вільних поверхонь в умовах загальної текучості. Показано, яким чином результати даного дослідження можуть бути використані при оцінюванні руйнування високонавантажених деталей з відносно короткими початковими вирізами.

Conclusions. The procedure for obtaining, processing and interpretation of initial data on discontinuous fracture of the rectangular plate with a central hole under uniaxial tension was developed. The decision on optimal configuration and dimensions of the plate, as well as acceptable range of loading rates, which provides obtaining of arranged and sufficiently extended regions of step-wise propagation of the crack in the tested specimen,

was substantiated. Specific conditions of the crack, which was initiated and propagated under constant micromechanism of formation of free surfaces and total yield condition, were determined. The ways of use of the present results in the estimation of highly-loaded components with relatively short initial openings are shown.

Список використаної літератури

1. E561–92a. Standard practice for R–curve determination // ASTM. – 1992. – 13 p.
2. E2472–06e1. Standard test method for determination of resistance to stable crack extension under low–constraint conditions // ASTM. – 2011. – 26 p.
3. ISO 22889, Metallic materials – Method of test for the determination of resistance to stable crack extension using specimens of low constraint // ISO Standard, 2007. – 30 p.
4. Rice, J.R. An examination of the fracture mechanics energy balance from the point of view of continuum mechanics [Text] / J.R. Rice // Proc. 1st Intern. Conf. Fracture, Sendai, Japan. – 1966. – 1. – P.309–340.
5. Kfourri, A.P. Crack separation energy rate for crack advance in elastic–plastic fracture mechanics [Text] / A.P. Kfourri, K.J. Miller // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1976. – 190. – P.571–584.
6. Kfourri, A.P. Elastic–plastic separation energy rate for crack advance in finite growth steps [Text] / A.P. Kfourri, J.R. Rice // in Fracture 1977. – D.M.R. Taplin. – vol.1. – Univ. Waterloo Press. – P.43–59.
7. Wadier, Y. Reconsidering the paradox of Rice for a linear strain hardening material [Text] / Y. Wadier // Intern. J. Fracture. – 2004. – 127. – P.L125–L132.
8. Neimitz, A. Jump–like crack growth models or theory of critical distances: Are they correct? [Text] / A. Neimitz //ESIS Newsletter#4. – 2008. – P.20–26.
9. Taylor, D. The theory of critical distances [Text] / D. Taylor // Eng. Fract. Mech. – 2008. – 75. – P.1696–1705.
10. Neimitz, A. The jump–like crack growth model, the estimation of fracture energy and JR curve [Text] / A. Neimitz // Eng. Fract. Mech. – 2008.–75. – P.236–252.
11. Kfourri, A.P. Characteristic crack–tip distances in fracture criteria: Is crack propagation discontinuous? [Text] / A.P. Kfourri // Eng. Fract. Mech. – 2008. – 75. – P.1815–1828.
12. Naumenko, V.P. Displacement–based assessment of ductile tearing under low–constraint conditions [Text] / V.P. Naumenko, S.V. Lenzion, I.V. Limansky // The Open Mechanical Engineering Journal. – 2008. – 2. – P.40–59.
13. Naumenko, V.P. Energy–based assessment of ductile tearing in a thin sheet aluminium alloy [Text] / V.P. Naumenko, I.V. Limansky // Procedia Engineering. – 2009. – 1. – issue 1. – P.63–66.
14. Naumenko, V.P. Through–life assessment of ductile tearing under low–constraint conditions [Text] / V.P. Naumenko // Proc. of 12th International Conference on Fracture. – Ottawa. – 2009. – 10 pages.
15. Naumenko, V.P. Incorporation of length scales in plane stress fracture analysis [Text] / V.P. Naumenko // Proc. of the ECF16 Fracture of Nano and Engineering Mat. and Struct. Ed. E.E. Gdoutos, Alexandropoulos, Greece. – 2006.
16. Naumenko, V.P. Sensitivity of crack nucleation parameters to the geometric imperfection [Text] / V.P. Naumenko, Yu. D. Skrypyk // Proc. ECF16 Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures, E. E. Gdoutos, Ed. Alexandropoulos, Greece. – 2006.
17. Naumenko, V.P. Comprehensive Assessment of a Naturally Forming Tear Crack in Thin–Sheet Aluminium Alloy [Text] / V.P. Naumenko, S.V. Lenzion // Proceedings of the ESIA8 Conf. on Through–life Management of Structures, Manchester, UK. – 2006.
18. Naumenko, V.P. Ductile tearing in narrow and wide strips of thin–sheet aluminium alloy [Text] / V.P. Naumenko, S.V. Lenzion, Yu. D. Skrypyk // Proc. ESIA8 Through–life Management of Struct. Comp., Manchester, – 2006. – 10 pages.
19. Bao, Y. Dependence of ductile crack formation in tensile tests on stress triaxiality, stress and strain ratios [Text] / Y. Bao // Eng. Fract. Mech. – 2005. – 72. – P.505–522.
20. Wierzbicki, T. Calibration and evaluation of seven fracture models [Text] / T. Wierzbicki, Y. Bao, Y–W. Lee, Y. Bai // Intern. J. Mech. Sciences. – 2005. – 47. – P.719–743.
21. Beese, A. Partially coupled anisotropic fracture model of aluminum sheets [Text] / A. Beese, M. Luo, Y. Bai, T. Wierzbicki // Eng. Fract. Mech. – 2010. – 77. – P.1128–1152.
22. Canon PowerShot G7. Руководство пользователя // CEL–SG2EA200 – 2006. – 170 с.
23. Науменко, В.П. Сопротивление разрушению листовых металлов и тонкостенных конструкций. Сообщение 2. Задачи исследования, предпосылки и основополагающие новшества [Текст] / В.П. Науменко, И.В. Лиманский // Пробл. прочности. – 2014.– №6. – С.25–49.
24. Kim, Y.–J. Relevance of plastic limit loads to reference stress approach for surface cracked cylinder problems [Text] / Y.–J. Kim, D.–J. Shim // Int. J. Press. Vess. Piping. –2005. – 82. – P.687–699.
25. Zerbst, U. Proposed extension of the SINTAP/FITNET thin wall option based on a simple method for reference load determination [Text] / U. Zerbst, A. Pempe, I. Scheider, R.A. Ainsworth, W. Schonfeld // Engineering Fracture Mechanics. – 2009.–76. – P.74–87.

Отримано 02.10.2014