



УКРАЇНА

(19) UA (11) 42955 (13) A

(51) 7 G01N3/60

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ НА МАЛОЦИКЛОВУ ВТОМУ

(21) 2000074126

(22) 12.07.2000

(24) 15.11.2001

(33) UA

(46) 15.11.2001, Бюл. № 10, 2001 р.

(72) Трощенко Валерій Трохимович, Гопкало Олексій Петрович

(73) ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, UA

(57) Спосіб дослідження металевих матеріалів на малоциклову втому, який містить операції термо-механічного навантаження зразка з тріщиною, реєстрації параметрів дослідження, по яким визначають швидкість росту тріщини, який **відрізняється** тим, що під час операції термомеханічного на-

вантаження зразка з тріщиною його піддають циклічному нагріву відповідно до закону

$$T_f = \begin{cases} P_m(t) \\ P_m(t - \Delta t/2) \end{cases},$$

де P_m - амплітуда механічного навантаження, яку задають відповідно до закону

$$P_m = \begin{cases} kt \text{ нпу } t_i \leq t \leq t_i + \Delta t/2 \\ -k(t - t_{i+1}) \text{ нпу } t_i + \Delta t/2 \leq t \leq t_{i+1} \end{cases},$$

де t_i - поточний час циклу навантаження, k - швидкість навантаження, Δt - період циклу навантаження.

Пропонований винахід відноситься до засобів дослідження матеріалів на міцність, а більш точно - до способів для дослідження металевих матеріалів на малоциклову втомлюваність та тріщиностійкість. Винахід може знайти застосування у наукових установах та заводських лабораторіях, де проводять зазначені дослідження.

Велика кількість сучасних конструкцій експлуатується в умовах дії змінних температур та механічних навантажень. Досвід їх експлуатації показує, що граничний стан всієї конструкції або її окремих елементів настає в результаті зміни початкової геометрії (квазистатичне руйнування) або розвитку тріщин втоми. Тому актуальним є проведення досліджень, які моделюють зазначені умови експлуатації конструкції, що дозволяє досить точно визначити її ресурс.

Для прогнозування ресурсу матеріалів та деталей з них, які отримали пошкодження в умовах термомеханічного навантаження, необхідно мати відповідні критерії, які характеризують міцність та довговічність в тих чи інших умовах експлуатації. В даний момент, таких надійних критеріїв нема. Використання для цих цілей критеріїв, розроблених для ізотермічних умов циклічного механічного навантаження, дають некоректні результати, оскільки існує суттєва різниця процесів деформування та руйнування матеріалів в ізотермічних та неізотермічних умовах. У зв'язку з чим виникає необхідність в одержанні експериментальних даних про поведінку тріщин втоми в умовах термомеханічно-

го навантаження і на їх основі розробити відповідні методи оцінки довговічності конструкційних матеріалів.

В останній час для прогнозування зростання тріщини використовуються лінійно-сумарні моделі. Перші такі моделі використовували залежності зросту тріщин від часу та циклу. Загальна швидкість зростання тріщини $\left(\frac{da}{dt}\right)_{tot}$ виражалась як

сума двох компонент: механічної втоми $\left(\frac{da}{dt}\right)_m$ та

зовнішніх навантажень $\left(\frac{da}{dt}\right)_e$. Така лінійна сума

ефективно використовується для опису корозійної втоми, а також для прогнозування зростання тріщини при підвищених температурах. При використанні цього типу моделювання в умовах підвищених температур загальна швидкість зростання тріщини виражається сумою швидкостей: від втоми та статичної. Причому, швидкість від втоми одержували із високочастотних та низькочастотних випробувань і розглядали її як незалежну від температури для багатьох матеріалів.

$\left(\frac{da}{dt}\right)_{cd}$ одержана із високочастотного ізотермічного експерименту на втому при температурі, коли циклічна залежність домінує, тоді як $\left(\frac{da}{dt}\right)_{td}$ визна-

чена інтегруванням швидкості зростання тріщини при постійному навантаженні та змінній температурі, за час активної частини циклу.

Таким чином, в цій моделі були опрацьовані можливості по прогнозуванню швидкості зростання тріщини для ізотермічної втоми зі змінною частотою і температурою, для ізотермічної втоми з накладенням витримок при P_{\max} і для TMB в Ti-24Al-11Nb сплаві. В результаті повна модель має вигляд:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{tot} = \int_0^{t_{ul}} \beta(t) \frac{2}{\tau} \left(\frac{da}{dN}\right)_{ur cd} dt + \int_0^{t_{nd}} \beta(t) \left(\frac{da}{dt}\right)_{ur td} dt, \quad (1)$$

де: два вирази в правій частині рівняння - це циклічно і тимчасово залежні внески в швидкість зростання тріщини.

Дві важливі особливості цієї моделі - це те, що вона спроможна підрахувати циклічно залежну швидкість зростання тріщини як функцію температури, а друга особливість - це те, що запізнення швидкості зростання тріщини відбувається внаслідок притуплення вершини тріщини, яке відбувається через повзучість матеріалу. Можливість розрахунку запізнення швидкості зростання тріщини була досягнута введенням коефіцієнта β у вирази для циклічно і тимчасово залежних внесків загальної швидкості зростання тріщини, яку описує зазначене рівняння. Чисельне значення коефіцієнта β розраховується по експериментальним спостереженням ефекту запізнення. Коефіцієнт β знаходиться під інтегралом обох внесків у швидкість зростання тріщини, як беззупинно змінний на протязі циклу.

Найбільш близьким до пропонованого за технічною суттю є спосіб дослідження металевих матеріалів на малоциклово втому, який містить операції термомеханічного навантаження зразка з тріщиною, реєстрації параметрів дослідження, по яким визначають швидкість росту тріщини (а.с. № 691732 СРСР, МПК 2G01N3/60. Заявник - Інститут проблем міцності АН УРСР. Опубл. 15.10.1979. Бюл. № 38).

Недолік описаного способу - втрати точності експерименту, пов'язані з неможливістю моделювання параметрів реальних умов роботи металевих конструкцій або деталей машини через неможливість створення моделювання умов, при яких виникає зміна початкової геометрії (квазистатичне руйнування) або розвиток тріщин втоми.

В зв'язку з тим, що розглянуті результати експериментальних досліджень тріщиностійкості матеріалів у неізотермічних умовах малоциклового м'якого та жорсткого навантаження мають певні протиріччя, а моделі руйнування є досить складними для інженерного користування, виникає необхідність у проведенні спеціальних досліджень впливу різних експлуатаційних та технологічних факторів на закономірності деформування та руйнування матеріалів в цих умовах і на основі одержаних експериментальних результатів розробити більш простий метод для оцінки тріщиностійкості в заданих умовах.

Для цих цілей була розроблена спеціальна методика та удосконалена випробувальна установка, яка дозволяє проводити дослідження механічних властивостей різних матеріалів в умовах

малоциклового ізотермічного та неізотермічного навантаження.

В основу пропонованого винаходу поставлена задача створення такого способу дослідження металевих матеріалів на малоциклово втому та тріщиностійкості, який би дозволив відтворити у процесі експерименту такі реальні умови експлуатації, які суттєво впливають на міцність деталі або конструкції, а саме умови, при яких виникає зміна початкової геометрії (квазистатичне руйнування) або розвиток тріщин втоми. Поставлена задача вирішується за рахунок створення можливості для моделювання умов малоциклового неізотермічного навантаження. В інженерній практиці ресурс деталей та елементів конструкцій традиційно визначають з розрахункових залежностей, які враховують закономірності деформування матеріалів (накопичення ушкоджень) до виникнення тріщин утоми. При виникненні на поверхні деталі тріщини втоми подальшу оцінку залишкового ресурсу виконують за розрахунковими залежностями, які враховують швидкість розвитку тріщини втоми до критичного розміру, після чого відбувається катастрофічне руйнування. В обох випадках при розрахунках використовують емпіричні залежності, що базуються на результатах досліджень лабораторних зразків. Пропонований спосіб дозволяє проводити необхідні дослідження лабораторних зразків або елементів конструкцій, моделюючи при цьому реальні умови експлуатації (роботи елемента конструкції) до і після виникнення тріщини втоми.

Пропонований, як і відомий, спосіб дослідження металевих матеріалів на малоциклово втому, містить операції термомеханічного навантаження зразка з тріщиною, реєстрації параметрів дослідження, по яким визначають швидкість росту тріщини, а, відповідно до винаходу, під час операції термомеханічного навантаження зразка з тріщиною його піддають циклічному нагріву відповідно до закону:

$$T_f = \left\{ \begin{array}{l} P_m(t) \\ P_m\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) \end{array} \right\},$$

де: P_m - амплітуда механічного навантаження, яку задають відповідно до закону:

$$P_m = \left\{ \begin{array}{l} kt \text{ нпу } t_i \leq t \leq t_i + \frac{\Delta t}{2} \\ -k(t - t_{i+1}) \text{ нпу } t_i + \frac{\Delta t}{2} \leq t \leq t_{i+1} \end{array} \right\},$$

де: t_i - поточний час циклу навантаження, k - швидкість навантаження, Δt - період циклу навантаження.

Блок-схема установки, на якій може бути реалізований пропонований спосіб, наведена на кресленні (фіг.).

Приклад. Пропонований спосіб передбачає проведення випробувань зразків матеріалів на тріщиностійкість в ізотермічних та неізотермічних умовах при простих видах деформування (розтяг-стиску) в малоциклової області до 10^5 циклів при малоциклових термомеханічних навантаженнях в діапазоні температур 20 ... 800°C при нагріванні радіаційним методом і 20 ... 1100°C при нагріванні методом безпосереднього пропускання електричного струму. Циклічне механічне навантаження (м'яке або жорстке) здійснюється на електрогідра-

влічній машині УЕ-20 Армавірського заводу випробувальних машин, циклічне нагрівання з допомогою малогабаритної малоінерційної печі електроопору, або методом пропускання електричного струму через зразок. Охолодження звичайне шляхом передачі тепла через захвати та в атмосферу, або примусове - обдувом робочої поверхні зразка повітрям. Діапазон механічних навантажень: по зусиллям ± 200000 кН, по деформації ± 5 мм. Спостереження та вимірювання довжини тріщини втоми здійснювали за допомогою мікроскопа МБС-10.

Для проведення експериментальних досліджень було проведено модернізацію випробувальної електрогідравлічної машини УЕ-20, яка призначена для малоциклового навантаження зразків матеріалів та елементів конструкцій при кімнатній температурі по жорсткому або м'якому режимам. Модернізація машини полягала в тому, що був розроблений спеціальний блок для керування циклічним нагрівом зразка синхронно або асинхронно його механічному навантаженню. Для цього в блоці керування механічним навантаженням машини УЕ-20 сигнал управління активним захватом одночасно паралельно поступає в блок керування циклічним нагрівом зразка, який далі трансформується в сигнал управління напругою (через тиристорний блок) первинної обмотки трансформатора ОСУ-20, з другої обмотки якого напруга (2-4 В) подається або на нагрівачі печі електроопору або на кінці випробувального зразка при його нагріванні методом безпосереднього пропускання електричного струму. При проведенні випробувань реєструють величини максимальної та мінімальної температури цикла, величину діючих на зразок навантажень, переміщення берегів тріщини по лінії дії сили, а також зростання тріщини по числу циклів. Блок керування циклічним нагрівом має можливість змінювати амплітуду та фазу нагрівання зразка по відношенню до механічного навантаження. Вимірювання температури здійснювали за допомогою термоелектроперетворювача ТХА з діаметром термоелектродів 0,2 мм, які конденсаторною зваркою приварювались на робочу поверхню зразка по лінії розвитку тріщини втоми. На зазначеній вище установці випробували зразки із сталі 40Х та матеріали роликів машин безперервного розлиття заготовок Маріупольського заводу "Азовсталь" - сталі 15Х13МФл та 25Х1М1Фл (матеріал верхнього та нижнього шару біметалічного бандажу ролика вищезгаданої машини) та сталь 25Х1М1Ф - основний матеріал ролика. Під час випробувань зразки піддавали термомеханічному навантаженню і реєстрували параметри досліджень, по яким визначали швидкість росту тріщини. У продовж операції термомеханічного навантаження кожного зразка його піддавали циклічному нагріву відповідно до закону:

$$T_f = \begin{cases} P_m(t) \\ P_m\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) \end{cases}$$

де: P_m - амплітуда механічного навантаження, яку задають відповідно до закону:

$$P_m = \begin{cases} kt \text{ нпу } t_i \leq t \leq t_i + \frac{\Delta t}{2} \\ -k(t - t_{i+1}) \text{ нпу } t_i + \frac{\Delta t}{2} \leq t \leq t_{i+1} \end{cases}$$

де t_i - поточний час циклу навантаження, k - швидкість навантаження, Δt - період циклу навантаження.

Результати дослідження впливу неізотермічності навантаження на тріщиностійкість матеріалів в умовах синфазного та асинфазного термічного та механічного навантаження показують, що синфазне механічне та термічне навантаження збільшує швидкість зростання тріщини втоми майже в п'ять разів у порівнянні із асинфазним.

Таку поведінку зміни швидкості зростання тріщини можна пояснити зниженням рівня механічних характеристик, активізацією процесів повзучості, що для даного частотного режиму цілком вірогідно, а також впливом навколишнього середовища, так як процеси окислювання активізуються при високих температурах. Зміна швидкості зростання тріщини втоми контролюється температурною залежністю модуля пружності та границі текучості матеріалу, а також активністю навколишнього середовища.

Розробка моделі врахування впливу неізотермічності навантаження на закономірності розвитку тріщин втоми була виконана, виходячи з припущення, що реальні механічні умови біля вершини тріщини контролюються пластичними деформаціями, Ердоган та Робертс припустили, що закон розповсюдження тріщини при циклічному навантаженні можна записати у вигляді:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = A_1 (P_{\max})^m (\Delta P)^n, \quad (2)$$

де: ΔP і P_{\max} - згідно розмах і максимальна довжина пластичної зони при вершині тріщини по напрямку її просування.

$$P = \frac{K^2}{2\pi \sigma_{0,2}^2}, \quad (3)$$

Але потім Ердоган та Робертс звели рівняння (2) до залежності:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, K_{\max})$$

яка не дає можливості оцінювати механічні характеристики на протязі термомеханічного циклу втоми.

Тому для ТМВ була запропонована наступна залежність:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = A_2 \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{0,2}}\right)^{2m} \left(\frac{\Delta K}{\sigma_{0,2}}\right)^{2n} \Phi(\rho) \quad (4)$$

де: $\Phi(\rho)$ - функція, яка враховує зміну радіуса пригуплення вершини тріщини ρ , яке відбувається внаслідок повзучості в зоні пластичності.

Вводячи в рівняння (4) параметр асиметрії циклу $R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$, будемо мати:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = A_2 \left(1 - \frac{R \sigma_{0,2}^{\max}(T, N)}{\sigma_{0,2}^{\min}(T, N)}\right)^{2n} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{0,2}^{\max}}\right)^{2(m+n)} \Phi(\rho) \quad (5)$$

де: $\sigma_{0,2}^{\max}(T, N)$ та $\sigma_{0,2}^{\min}(T, N)$ - відповідно умовна границя плинності при максимальному та мінімальному навантаженні, яка залежить від температури та кількості циклів.

На даному кроці проходження досліджень знайти функцію $\Phi(\rho)$ не має можливості через недостатню кількість експериментальних даних. Перерахунок вже існуючих даних експериментів у припущенні, що функція $\Phi(\rho)=1$ і матеріал є циклічно стабільним, показав збільшення швидкості зросту тріщини при синфазному навантаженні в 1,5 раза порівняно з асинфазним. Але такий результат не може бути задовільним, тому що експеримент показав таке збільшення в 5 разів. Таку розбіжність можна пояснити відсутністю методики для знаходження ступеневих констант m і n (в розрахунку припускалось, що $m=n$), а також тим, що в розрахунку були задіяні тільки екстремуми залежності $\frac{K}{\sigma_{0,2}(t)}$ від t . Тому виходячи з вищесказаного було вирішено за основну прийняти наступну залежність:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = C \left[\int_0^{\tau/2} \left(\frac{2}{\tau}\right) \frac{K(t) dt}{\sigma_{0,2}(t)} \right]^n \Phi(\rho) \quad (6)$$

де: $K(t)$ - функція коефіцієнту інтенсивності напружень від часу, $\sigma_{0,2}(t)$ - функція границі плинності від часу; C і n - константи матеріалу. Границі інтегрування були вибрані згідно з гіпотезою про зріст тріщини тільки при навантажуючій частині циклу.

Для трикутної форми неізотермічного циклу функції $K(t)$ та $\sigma_{0,2}(t)$ мають вигляд:

$$K(t) = K_{\max} \left[(1-R) \left(\frac{2}{\tau} \right) t + R \right] \quad (7)$$

$$\sigma_{0,2}(t) = \sigma_{0,2}(T_{\min}) \left[\delta (1-R_{0,2}) \left(\frac{2}{\tau} \right) t + R_{0,2}^z \right] \quad (8)$$

де: $\sigma_{0,2}(T_{\min})$ - границя плинності при мінімальній температурі циклу, $R_{0,2} = \frac{\sigma_{0,2}(T_{\max})}{\sigma_{0,2}(T_{\min})}$;

$$\delta = \begin{cases} -1 - \text{при синфазному навантаженні,} \\ 1 - \text{при асинфазному навантаженні;} \end{cases}$$

$$z = \begin{cases} 0 - \text{при синфазному навантаженні,} \\ 1 - \text{при асинфазному навантаженні.} \end{cases}$$

Рівняння (6) після підстановки в нього виразів (7) і (8) та інтегрування приймає вигляд:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = C \cdot \left[\frac{K_{\max}}{\sigma_{0,2}(T_{\min})} \left(\frac{1-R}{\delta(1-R_{0,2})} + \frac{\delta(1-R_{0,2})R - R_{0,2}^z(1-R)}{(1-R_{0,2})^2} \right) \cdot \ln \left(1 - \frac{\delta(1-R_{0,2})}{R_{0,2}^z} \right) \right]^n \cdot \Phi(\rho) \quad (9)$$

Перерахунок цієї формули з тими самими припущеннями показав збільшення швидкості зросту тріщини приблизно в 11 разів. Враховуючи функцію $\Phi(\rho)$, яка залежить від повзучості і зменшує концентрацію напружень, що призводить до зменшення швидкості зросту тріщини, то можна зробити висновок, що рівняння (9) має право на існування.

Таким чином, запропонований спосіб дозволяє проводити необхідні дослідження лабораторних зразків або елементів конструкцій, моделюючи при цьому реальні умови експлуатації (роботи елементу конструкції) до і після виникнення тріщини втоми.



Фіг.

ДП "Український інститут промислової власності" (Укрпатент)
 Україна, 01133, Київ-133, бульв. Лесі Українки, 26
 (044) 295-81-42, 295-61-97

Підписано до друку _____ 2002 р. Формат 60x84 1/8.
 Обсяг _____ обл.-вид. арк. Тираж 50 прим. Зам. _____

УкрІНТЕІ, 03680, Київ-39 МСП, вул. Горького, 180.
 (044) 268-25-22