



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 54970

(13) A

(51) 7 G01N3/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДВИДАЄТЬСЯ ПІД
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ
ВЛАСНИКА
ПАТЕНТУ

(54) СПОСІБ ПОБУДОВИ КРИТЕРІЇВ ДОВГОТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ЗА УМОВ СКЛАДНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

1

2

(21) 2002064597

(22) 05 06 2002

(24) 17 03 2003

(46) 17 03 2003, Бюл. № 3, 2003 р.

(72) Голуб Владислав Петрович

(73) ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ІМ. С. П. ТИМОШЕНКА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

(57) Спосіб побудови критеріїв довготривалої міцності за умов складного напруженого стану, що полягає у тому, що групу зразків матеріалу випробовують на довготривалу міцність при фіксованій температурі та одноосьовому розтягу, будують діаграму та визначають характеристики довготривалої міцності, який відрізняється тим, що для заданого складного напруженого стану визначають знаки та величину головних напружень, виходячи із семи базових інваріантів тензора напру-

жень, розраховують та будують сім еквівалентних одноосьовому розтягу діаграм довготривалої міцності, випробовують групу ідентифікуючих зразків матеріалу на довготривалу міцність при фіксованому рівні компонент тензора напружень за температури та складного напруженого стану, що співпадають із заданими, вимірюють час до руйнування, наносять на еквівалентні діаграми експериментальні дані, що отримані під час ідентифікуючого експерименту, виходячи із умови найкращої збіжності ідентифікуючого експерименту із однією із еквівалентних діаграм визначають базовий інваріант тензора напружень, що використаний для побудови цієї діаграми, і розглядають цей інваріант як критерій довготривалої міцності за умов складного напруженого стану

Винахід стосується галузі механічних випробувань матеріалів, а безпосередньо способів випробувань на довготривалу міцність за умов статичної повзучості та складного напруженого стану.

Критерії довготривалої міцності, що збудовані на підставі винаходу, можуть бути використані в дослідницькій практиці конструкторських бюро та заводських лабораторій підприємств стаціонарного та транспортного енергомашинобудування, а також під час призначення матеріалів для виготовлення відповідальних деталей, що працюють протягом довготривалого часу за умов складного напруженого стану.

Відомий спосіб побудови критеріїв довготривалої міцності за умов складного напруженого стану [1], згідно із яким серію зразків матеріалу випробовують на повзучість до руйнування за умов одновісного розтягу і декількох рівней температур та напружень, візуально за характером фрактограми зразків визначають "еквікогезійну" температуру θ_{eqc} , нижче якої руйнування інтерпретують як транскристалітне, а вище якої - як інтеркристалітне і в залежності від характеру

руйнування у якості критерію довготривалої міцності обирають великість інтенсивності нормальних напружень σ_1 для області температур нижче θ_{eqc} або великість пдростатичного тиску σ_0 для області температур вище θ_{eqc} .

Однак цей спосіб має недолік внаслідок його низької точності, оскільки апіорі вважається, що характер довготривалого руйнування залежить тільки від рівня температури і не залежить від системи напружень, що застосовані та від вигляду напруженого стану.

Відомий також, обраний як прототип, спосіб побудови критеріїв довготривалої міцності за умов складного напруженого стану [2], згідно із яким одну групу зразків матеріалу випробовують на довготривалу міцність при фіксованій температурі та одновісного розтягу, будують діаграму та визначають характеристики довготривалої міцності, а іншу групу зразків матеріалу випробовують на довготривалу міцність за тією самою температурі та декількох виглядах складного напруженого стану, будують діаграми та визначають характеристики довготривалої міцності для кожного із цих виглядів

(13) A

(11) 54970

(19) UA

складного напруженого стану, формують з інваріантів тензорів напружень, що застосовані, еквівалентне напруження σ_{eqv} виходячи з умови зведення експериментальних даних з довготривалої міцності за одноосового та складного напруження станів до єдиної діаграми і обирають це еквівалентне напруження у якості критерію довготривалої міцності за умов складного напруженого стану

Відомий спосіб має високу трудомісткість, що пов'язана із необхідністю проведення великого обсягу складних та довготривалих випробувань на довготривалу міцність із варіюванням вигляду напруженого стану та тривалості навантаження. Скорочення кількості реалізованих у випробуваннях виглядів складного напруженого стану до трьох випробувань на одновісний розтяг, одновісний стиск та чисте скручення суттєво знижує точність способу, оскільки не дозволяє враховувати вплив на структуру критерію вигляду напруженого стану

До основи винаходу поставлена задача у способі побудови критеріїв довготривалої міцності за умов складного напруженого стану шляхом проведення одного ідентифікуючого експерименту за умов складного напруженого стану, що за виглядом збігається із напруженим станом, що розглядається, побудови еквівалентних проміж одновісним розтягом та заданим складним напруженим станом діаграм довготривалої міцності і порівняння результатів поодинокого ідентифікуючого експерименту із еквівалентними діаграмами довготривалої міцності, виключити отримання єдиних діаграм довготривалої міцності і скоротити трудомісткість випробувань за умови збереження точності способу, за рахунок виключення випробувань на довготривалу міцність при довільних типах складного напруженого стану

Поставлена задача розв'язується за рахунок того, що у способі побудови критеріїв довготривалої міцності за умов складного напруженого стану, що містить випробування групи зразків матеріалу на довготривалу міцність при фіксованій температурі і одноосового розтягу, побудови діаграм та визначення характеристик довготривалої міцності, згідно із винаходом, для складного напруженого стану що заданий визначають величину та знаки головних напружень, виходячи із семи базових інваріантів тензору напружень розраховують та будують сім еквівалентних одновісному розтягу діаграм довготривалої міцності, випробовують групу ідентифікуючих зразків матеріалу на довготривалу міцність при фіксованому рівні компонент тензору напружень за температури та складного напруженого стану, що співпадають із заданими, вимірюють час до руйнування, наносять на еквівалентні діаграми експериментальні дані, що отримані під час ідентифікуючого експерименту, виходячи із умови найкращої збіжності ідентифікуючого експерименту із однією із еквівалентних діаграм довготривалої міцності будують критерій довготривалої міцності за умов складного напруженого стану, і скорочують трудомісткість способу за рахунок виключення повномасштабних випробувань на довготривалу міцність із довільними типами складного напруженого стану

Тут і далі згідно терміну "поодинокий" мають

на увазі експеримент, що проводиться при одному фіксованому рівні компонент тензору напружень, згідно терміну "ідентифікуючий" - експеримент, що встановлює еквівалентність між одновісним та складним напруженим станом, а відповідні діаграми довготривалої міцності вважаються "еквівалентними"

Здійснення поодинокого випробування на довготривалу міцність за умов складного напруженого стану, що збігається із заданим, дозволяє із високим рівнем точності ідентифікувати реакцію матеріалу на цей тип складного напруженого стану. Еквівалентні діаграми довготривалої міцності будуються на підставі семи базових інваріантів тензору напружень, що дозволяє охопити увесь спектр зміни характеру довготривалого руйнування та адекватно сформулювати структуру критерію довготривалої міцності

Спосіб, що є заявлений здійснюється таким чином

Дві групи зразків із матеріалу що досліджується випробовують на довготривалу міцність за фіксованою температурі θ . Методика випробувань та обладнання для випробувань детально описані у роботі [3]

Зразки першої групи випробовують на довготривалу міцність за умов одновісного розтягу, за результатами випробувань будують діаграму довготривалої міцності (фіг 1а, штрихова лінія) та визначають характеристики довготривалої міцності у формі набору напружень $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \dots, \sigma_{kk}$ і відповідних їм значень часу до руйнування $t_{R1}, t_{R2}, \dots, t_{Rk}$. Використовуючи набір значень σ_b і t_R для заданого складного напруженого стану розраховують та будують діаграми довготривалої міцності що еквівалентні одновісному розтягу. У якості критерію еквівалентності використовують сім базових інваріантів тензору напружень $J(\sigma_i)$, а саме максимальне нормальне напруження σ_{max}

$$J(\sigma_i) = \sigma_{max} = \sigma_1 \quad (1)$$

подвійне максимальне дотичне напруження

$$2\tau_{max} = 2\tau_{max} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

октаедричне нормальне напруження σ_{oct}

$$J(\sigma_{II}) = \sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (3)$$

октаедричне дотичне напруження τ_{oct}

$$J(\sigma_{SI}) = \tau_{oct} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (4)$$

інтенсивність нормальних напружень σ_i

$$J(\sigma_{SI}) = \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (5)$$

інтенсивність дотичних напружень s_i

$$J(\sigma_{SI}) = s_i = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (6)$$

та максимальна видовга ϵ_{max}

$$J(\sigma_{II}) = E\epsilon_{max} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (7)$$

Тут $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - головні нормальні напруження, що розраховуються для заданого напруженого стану ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), E - модуль пружності, μ - коефіцієнт Пуассона

Схема побудови еквівалентних діаграм довготривалої міцності (фіг 16, штрих пунктирні лінії) показана стрілками. Обираються два рівня напружень σ_H і σ_{Hk} ($\sigma_H \gg \sigma_{Hk}$), для яких визначаються значення часу до руйнування t_{R1} і t_{Rk} відповідно ($t_{R1} \ll t_{Rk}$). Для кожного із напружень σ_{H1} і σ_{Hk} визначають сім значень базових інваріантів тензору напружень $J(\sigma_{ij})$ згідно із формулами (1 - 7). Для кожного із величин t_{R1} і t_{Rk} наносять у площині "lg $J(\sigma_{ij})$ - lg t_R " усі розраховані значення $J(\sigma_{ij})$ і будують еквівалентні діаграми довготривалої міцності.

Зразки другої групи випробовують на довготривалу міцність за умов заданого складного напруженого стану і фіксованого рівня компонент тензору напружень. Вимірюють час до руйнування і наносять результати випробувань (фіг 16, крапки) на еквівалентні діаграми довготривалої міцності. Результати поодинокого ідентифікуючого експерименту (крапки) порівнюють із еквівалентними діаграмами довготривалої міцності (штрих пунктирні лінії), визначають той інваріант тензору напружень $J(\sigma_{ij})$, що задає еквівалентну діаграму, із якою найкраще збігається ідентифікуючий експеримент, і за формулою

$$\sigma_{eqv} = J(\sigma_{ij}) \quad (8)$$

визначають критерій довготривалого руйнування за умов складного напруженого стану.

Приклад. Розглянемо задачу побудови критерію довготривалої міцності за умов плоского напруженого стану. У якості об'єкту дослідження оберемо вуглецеву сталь Ст 20, що широко використовується для виготовлення відповідальних деталей стаціонарних енергетичних установок, зокрема для виготовлення пароперегрівачів. Робоча температура сталі Ст 20 у процесі експлуатації пароперегрівача складає 500°C. Плоский напружений стан може бути зrealізованим за рахунок навантаження тонкостінних трубчатих зразків внутрішнім тиском. Головні напруження $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, визначимо у цьому випадку за формулами [4]

$$\sigma_1 = \frac{pD_m}{2h}, \sigma_2 = \frac{pD_m}{4h}, \sigma_3 = 0, \quad (9)$$

де p - внутрішній тиск, D_m, h - середній діаметр та товщина стінки трубчатого зразка відповідно.

Результати випробувань тонкостінних трубчатих зразків із сталі Ст 20 на довготривалу міцність за умов одновісного розтягу і температури $\theta = -500^\circ\text{C}$ надані на фіг 2а. Крапками нанесені первісні експериментальні дані, а штрихова лінія відповідає апроксимації експериментальних даних із вірогідністю 50%.

Критерій еквівалентності (1) - (7) із урахуванням (9) маємо записати за формою

$$J(\sigma_{ij}) = \sigma_{\max} = \sigma_t \Rightarrow p_{eqv}^0 = \frac{1}{\lambda} \sigma_t, \quad (10)$$

$$J(\sigma_{ij}) = 2\tau_{\max} = \sigma_t \Rightarrow p_{eqv}^0 = \frac{1}{\lambda} \sigma_t, \quad (11)$$

$$J(\sigma_{ij}) = \sigma_{oct} = \sigma_t \Rightarrow p_{eqv}^0 = \frac{2}{\lambda} \sigma_t, \quad (12)$$

$$J(\sigma_{ij}) = \tau_{oct} = \sigma_t \Rightarrow p_{eqv}^0 = \frac{6}{\sqrt{6}\lambda} \sigma_t, \quad (13)$$

$$J(\sigma_{ij}) = \sigma_1 = \sigma_t \Rightarrow p_{eqv}^0 = \frac{2}{\sqrt{3}\lambda} \sigma_t, \quad (14)$$

$$J(\sigma_{ij}) = s_1 = \sigma_t \Rightarrow p_{eqv}^0 = \frac{2}{\lambda} \sigma_t, \quad (15)$$

$$J(\sigma_{ij}) = E\varepsilon_{\max} = \sigma_t \Rightarrow p_{eqv}^0 = \frac{2}{(2-\mu)\lambda} \sigma_t, \quad (16)$$

де σ_t - як і раніше, напруження, що викликає руйнування за час t_R за умов одновісного розтягу, p_{eqv}^0 - значення внутрішнього тиску, що є еквівалентна одновісному розтягу, $\lambda = D_m / 2h$ - безрозмірний геометричний параметр.

Еквівалентні діаграми довготривалої міцності тонкостінних трубчатих зразків із сталі Ст 20 за температури 500°C, що збудовані за формулами (10) - (16), надані на фіг 2б лініями. Використано наступні позначки: σ_{\max} (- -), $2\tau_{\max}$ (- -), σ_{oct} (-x-), τ_{oct} (-+-), σ_1 (-*), s_1 (-+-), $E\varepsilon_{\max}$ (-**). Під час побудови еквівалентних діаграм було використано наступні дві пари величин σ_t та t_R : $\sigma_{t1} = 150\text{МПа}$, $t_{R1} = 169$ годин та $\sigma_{t2} = 90\text{МПа}$, $t_{R2} = 4912$ годин.

У якості ідентифікуючого експерименту обрано випробування на довготривалу міцність за умов дії внутрішнього тиску із величиною $p = 22,9\text{МПа}$. За цього рівня внутрішнього тиску випробувано 3 зразки, що дозволяє врахувати статистичну природу довготривалої міцності. Вимірний час до руйнування при цьому склав 1058, 1212 і 1235 годин. Ідентифікуючий експеримент наведено на фіг 2б темними крапками.

Аналіз положення отриманих ідентифікуючих експериментальних даних стосовно еквівалентних діаграм довготривалої міцності свідчить про те, що найкраще ідентифікуючий експеримент збігається із еквівалентною діаграмою, що збудована на підставі інтенсивності дотичних напружень s_1 . Похибка збіжності не перевищує 12%. Таким чином, критерій довготривалої міцності (8) за умов плоского напруженого стану у разі дії внутрішнього тиску маємо конкретизувати у вигляді

$$J(\sigma_{ij}) = s_1 \quad (17)$$

Результати розрахунків (штрихова лінія) довготривалої міцності трубчатих зразків із сталі Ст 20 за умов внутрішнього тиску та температури $\theta = -500^\circ\text{C}$, вивчених за рівнянням (17), порівняні на фіг 2в із експериментальними даними (крапки). Похибка стосовно часу до руйнування не перевищує 18%, що із врахуванням статистичних властивостей матеріалу забезпечує необхідну точність визначення характеристик довготривалої міцності. Натомість, замість трьох рівнів компонент тензору напружень, що використовуються у разі проведення кожного із типів складного напруженого стану (як мінімум трьох) згідно прототипу, у запропонованому способі здійснюється ідентифікаційне випробування на одному рівні компонент тензору напружень за складного напруженого стану, що збігається із заданим напруженим станом. Це дозволило скоротити кількість випробувань і відповідно кількість зразків приблизно у 10 разів, а тривалість випробувань скоротити приблизно на 2 порядки.

У таблиці наведені критерії довготривалої міцності для деяких матеріалів та типів складного напруженого стану, що збудовані згідно із запро-

понованим способом. За цих умов експлуатуються відповідальні деталі енергетичного устаткування.

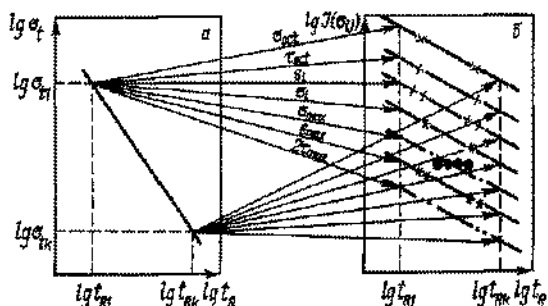
Таблиця

Матеріал	$\theta, ^\circ\text{C}$	λ	Напружений стан	$J_*(\sigma_{ij})$
Сталь Ст 20	500	10,5	внутрішній тиск	s_i
Сталь 1X18H9T	800	20,5	внутрішній тиск із розтягом	σ_i
Сталь 12X18H10T	850	11,5	внутрішній тиск із розтягом	σ_{\max}
Сталь 15X1M1Ф	570	6,0	розтяг із скрученням	σ_{\max}
Сталь X18H12T	610	6,0	розтяг із скрученням	δ_{\max}
Сталь X16H15M3Б	650	49,5	розтяг із скрученням	$2\tau_{\max}$
Сплав EI437Б	700	29,5	розтяг із скрученням	σ_{\max}

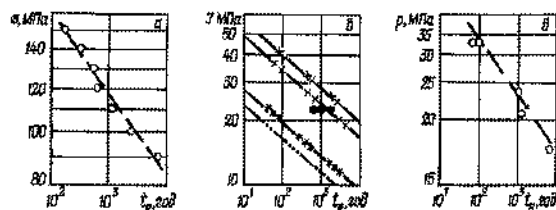
Використання запропонованого способу дозволяє зменшити трудомісткість способів побудови критеріїв довготривалої міцності за умов складного напруженого стану із збереженням необхідної точності і, як наслідок, розрахувати характеристики довготривалої міцності для складного напруженого стану за експериментальними даними, що отримані за умов одноосісного розтягу. Наведений приклад підтверджує отримання технічного результату під час реалізації способу.

Джерела інформації

- 1 Siegfried W. Failure from creep as influenced by the state of stress // Journal of Applied Mechanics - 1943 - Vol 10, N4, pp A202 - A212
- 2 Гольденблат И И, Бажанов В А, Копнов В А. Длительная прочность в машиностроении - Москва Машиностроение, 1977 - 248с
- 3 Сазонова Н Д. Испытание жаропрочных материалов на ползучесть и длительную прочность - Москва Машиностроение, 1965 - 266с
- 4 Качанов Л М. Основы механики разрушения - Москва Наука, 1974 - 312с



Фиг.1



Фиг.2