

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ У ЗРАЗКАХ МЕТАЛУ З ТРІЩИНАМИ

Запропоновано методику розрахунку параметрів, які характеризують зміни поверхневої енергії у зразках металу з двосторонніми вирізами, враховуючи розмірний ефект міцності.

Method of calculation of parameters which characterized the changes of surface energy in metal specimens with cracks is proposed with taking into account the size effect of strength.

Зразок металу моделюємо напівбезмежним середовищем ($x > 0$) у декартових координатах x , y , z . Нехай область $x < 0$ займає сухе повітря.

Для тіла (зразка), що знаходиться у повітрі, поверхневий натяг σ_s і поверхневу енергію $W = W_e + \xi \cdot W_p$ подамо аналогічно як у роботі [1].

Співвідношення (1-4) із роботи [1] створюють систему чотирьох рівнянь і з їх допомогою визначимо зміни поверхневої енергії в зразках металів з тріщинами.

Механічні напруження σ_x , σ_y поблизу поверхні тіла знаходимо з використанням граничних умов [1]:

$$\varphi = -\Phi_0, \sigma_x = -(\varepsilon_0/2) \cdot (\partial\psi/\partial x)^2 \text{ при } x=0.$$

Тут Φ_0 - модифікований хімічний потенціал електронів провідності, а φ характеризує його зміну.

Відомо [1], що для зразків металу виконується

$$W_\zeta = W_\eta \cdot (G_\zeta/G_\eta)^{2/3} = W_\eta \cdot (\sigma_{v\zeta}/\sigma_{v\eta})^{2/3}, \quad (1)$$

де G_ζ і G_η мікротвердості матеріалу в двох різних станах, яким відповідають індекси ζ , η . Для станів ζ , η відповідні значення поверхневої енергії є W_ζ і W_η , а також значення границь міцності - $\sigma_{v\zeta}$, $\sigma_{v\eta}$.

Для обґрунтування (1) розглянемо зміну поверхневої енергії у зразках сталі 22К, які піддаються розтягу вздовж осі y в напрямку довжини l_d . Зразки шириною $2H$ і товщиною $2b$ мають два бокові надрізи глибиною l_T , розміщені один проти другого [2]. Отже, площа нетто-перерізу $S = 2b(2H - 2l_T)$. З урахуванням того, що $b = 0,4H$, $l_T = H/4$, $l_d \gg b$ [2], критерій міцності [3] можна подати у вигляді

$$\sigma_p = A/l_T^2 + 2E\sqrt{k_p + \Psi_p(1/(1,6l_T) + 1/(3l_T - r_y))}. \quad (2)$$

Тут σ_p - границя міцності на розтяг зразка заданих розмірів, A , k_p і Ψ_p - фізичні характеристики матеріалу, r_y - поправка на пластичність (розмір пластичної зони у вершині тріщини) [2,3]. У співвідношенні (2) враховано довжину тріщини l_y з поправкою на пластичність

$$l_y = l_T + r_y, \quad r_y = E \cdot \gamma_p / (3\pi\sigma_T^2), \quad \gamma_p = \gamma_{II} + W, \quad (3)$$

де γ_p - ефективна поверхнева енергія у вершині тріщини [3], γ_{II} - пластична складова γ_p , σ_T - границя текучості на розтяг. У виразі (2) перша складова характеризує внесок об'єму (точніше, деформованої площі нетто-перерізу S), друга - поверхневої фази. Для сталі 22К на основі експериментальних даних [4] встановлено, що впливом A/l_T^2 на σ_p можна знехтувати в широкому діапазоні $T = 150 \div 320$ К температур і наближено виконується умова $\gamma_p \approx \gamma_{II}$.

Поправку r_y треба враховувати в області високих температур. Розрахунки з використанням (2) показали, що якщо r_y не врахувати для зразків, які деформуються при температурах $T_a = 295$ К, $T_b = 260$ К, $T_c = 225$ К, то тоді наближені значення енергетичних характеристик поверхні $\Psi_p(\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c)$, будуть більші за уточнені значення $\Psi_{pa}, \Psi_{pb}, \Psi_{pc}$ в 2,5, 1,43 і 1,09 рази відповідно температурам T_a, T_b, T_c .

Конкретні значення енергетичних характеристик поверхні Ψ_p для двох діапазонів розмірів

Таблиця 1. Розрахункові енергетичні характеристики поверхні Ψ_p для сталі 22К з тріщинами розмірами l_T .

T, K	$\Psi_{p1}, Дж/м^2$ ($l_{T1}=[50 \div 20 \text{ мм}]$)	$\Psi_{p2}, Дж/м^2$ ($l_{T2}=[20 \div 5 \text{ мм}]$)
313	6495	1591
233	6544	2041
183	4852	2062
163	2476	1255

тріщини $l_{T1}=50 \div 20$ мм і $l_{T2}=20 \div 5$ мм в діапазоні температур $T=313 \div 163$ К наведено в таблиці 1.

Звернемо особливу увагу на варіант розмірного ефекту розтягнутих стержнів з тріщинами при температурі $T_m=163$ К тому, що в цьому випадку для зразка, якому відповідає $l_T=50$ мм, виконується умова рівності границь міцності і текучості [4] $\sigma_p=\sigma_T=390$ МПа. Для інших розмірів l_T використаємо експериментальні дані σ_p [4], а значення σ_T розрахуємо з допомогою відомих співвідношень [5]

$$\begin{aligned} \sigma_y(x,0) &= \sigma_x(x,0) = \\ &= 2\sigma_T \arctg \{ (a^2 - c^2) / (c^2 - x^2) \}^{0.5} / \pi \text{ для } |x| \leq c, \\ \sigma_y(x,0) &= \sigma_x(x,0) = \sigma_T \text{ для } c \leq |x| \leq a. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут початок координат розміщено посередині зразка між вирізами; $x = \pm a$ - координати вершин тріщин, $r_y = a - c$ - розмір пластичної області.

Беручи до уваги відомі значення поверхневого натягу [6], поверхневої енергії [7] і коефіцієнта зміни $\Delta\sigma_s/\Delta T$ [6] для сталі при кімнатній температурі

$$\begin{aligned} W &= 2 \text{ Дж/м}^2, \quad \sigma_s = 2,125 \text{ Н/м}, \\ \beta_T &= \Delta\sigma_s/\Delta T = \Delta W/\Delta T = 0,0015 \text{ Дж}/(\text{К}\cdot\text{м}^2), \end{aligned} \quad (5)$$

отримаємо такі значення фізичних характеристик матеріалу, які входять у співвідношення (1-4) роботи [1]:

$$\begin{aligned} t &= 3,17 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}, \quad b = -0,316 \text{ В}^{-1}, \\ \xi &= 10,8, \quad \Phi_0 = -1,91 \text{ В}. \end{aligned} \quad (6)$$

На основі системи рівнянь (1-4) з роботи [1], а також співвідношень у працях [2,5], використовуючи числові характеристики (5), (6) і дані експерименту [4], визначено зміну ефективної поверхневої енергії γ_p , границі текучості у вершині тріщини σ_T , поверхневої енергії у вершині тріщини W_T , а також поверхневої енергії W_g зразка далеко від тріщини.

Встановлено, що для $l_{T1}=50 \div 20$ мм ($T_m=163$ К)

$$\begin{aligned} \gamma_p &= 4911 \div 3445 \text{ Дж/м}^2, \quad \sigma_T = 390 \div 517 \text{ МПа}, \\ W_T &= 5,79 \div 6,98 \text{ Дж/м}^2, \quad W_g = 0,77 \div 1,48 \text{ Дж/м}^2, \end{aligned}$$

$$\Delta_T = 1,247 \div 1,369, \quad \Delta_g = 2,873 \div 1,967. \quad (7)$$

Для $l_{T1}=20 \div 5$ мм ($T_m=163$ К) аналогічно:

$$\begin{aligned} \gamma_p &= 3445 \div 2012 \text{ Дж/м}^2, \quad \sigma_T = 517 \div 794 \text{ МПа}, \\ W_T &= 6,98 \div 9,28 \text{ Дж/м}^2, \quad W_g = 1,48 \div 3,02 \text{ Дж/м}^2, \\ \Delta_T &= 1,369 \div 1,585, \quad \Delta_g = 1,967 \div 1,474. \end{aligned} \quad (8)$$

Тут $\Delta_T = (\Delta W_T/W_T)/(\Delta\sigma_{yd}/\sigma_{yd})$ - граничне значення відношення, якщо приріст $\Delta\sigma_{yd}$ прямує до нуля, $\Delta W_T/W_T$ - відносна зміна енергії у вершині тріщини, $\Delta\sigma_{yd}/\sigma_{yd}$ - відносна зміна компоненти зовнішнього навантаження. $\Delta_g = (\Delta W_g/W_g)/(\Delta\sigma_{yd}/\sigma_{yd})$ визначено аналогічно до Δ_T ($\Delta W_g/W_g$ - відносна зміна поверхневої енергії далеко від тріщини).

З допомогою отриманих результатів (7), (8) встановлено достовірність співвідношення (1) для матеріалу твердого тіла (сталі) у вершині тріщини. Крім того, на основі обчислювального експерименту виявлено, що два співвідношення

$$\Delta\sigma_s = \sigma_{s\eta} - \sigma_{s\zeta}, \quad \Delta W_s = W_\eta - W_\zeta. \quad (9)$$

можна вважати локальними критеріями міцності для механічно навантажених зразків металу, якщо характеристики поверхні $\sigma_{s\eta}$, W_η відповідають ненавантаженому стану, а $\sigma_{s\zeta}$, W_ζ - границі міцності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Юзевич В.М. Релаксація поверхневої енергії в процесі автосегрегації на поверхні металу // Науковий вісник ЧДУ. Вип.50: Фізика. - Чернівці: ЧДУ, 1999. - С.??-??.
2. Черепанов Г.П., Каплун А.Б., Пучков Ю.И. О влиянии масштабного фактора на хрупкую прочность // Проблемы прочности. - 1970. - № 7. - С.36-41.
3. Юзевич В.М. Критерії міцності контактних морських електродів // Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря / Под ред. В.Н.Еремеева. - Севастополь: МГИ НАН Украины, 1997. - С.175-176.
4. Серенсен С.В., Махутов Н.А. Механические закономерности хрупкого разрушения // Автоматическая сварка. - 1967. - № 8(173). - С.34-41.
5. Витвицкий П.М. Упругопластическая деформация и разрушение сосредоточенными силами пластинки с внешними щелями // Физ.-хим. механика материалов. - 1973. - №3. - С.75-80.
6. Eustathopoulos N., Joud J.-C. Interfacial tension and adsorption of metallic systems // Current Topics in Material Science. - 1980, - 4. - P.281-360.
7. Нотт Дж. Механика разрушения // Атомистика разрушения. Сб. статей / Под ред. А.Ю. Ишлинского. - М.: Мир, 1987. - С.145-176.