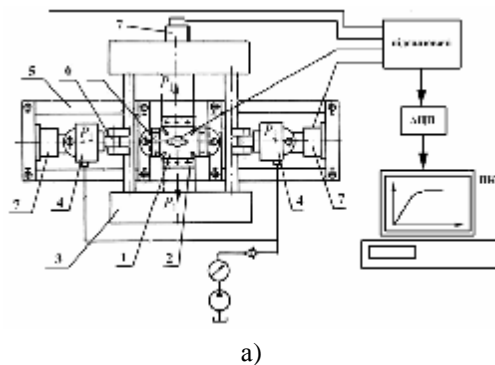


Рис. 1. Зразки для одновісного (а) і двовісного (б) навантаження



а)



б)

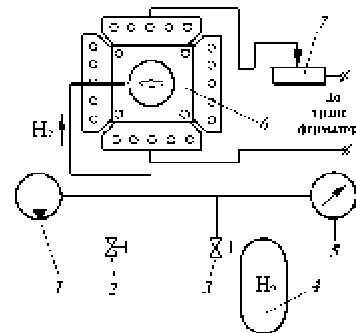
Рис. 2. Установка для двовісного розтягування зразків

через шток 6, динамометри 7, захоплювачі 8 розтягують зразок силою  $P_2$ , перпендикулярно до дії сили  $P_1$ .

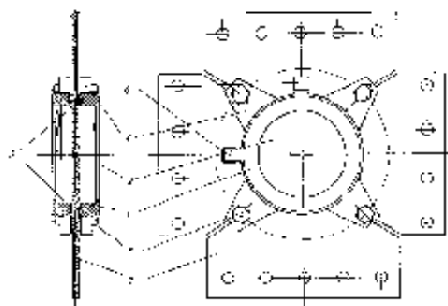
Для дослідження впливу водню на характеристики матеріалу розроблено камеру, яка складається з двох половин, монтується безпосередньо на зразку, закріпленому у захоплювачах випробувальної машини, що спрощує її конструкцію та дає можливість уникнути проміжних ланок, через які навантажуються зразок. За такого способу кріплення підвищується жорсткість навантаження, а також мінімізується віддаль від поверхні дослідного зразка до оглядового скла камери для застосування методу спекл-кореляції.

Істотною перевагою цієї конструкції є те, що вона використовує мінімальний об'єм водню, а це підвищує рівень безпеки при проведенні досліджень.

У кожному з частин камери вмонтовано оглядове скло для дослідження двох поверхонь хрестоподібного зразка. Камера, без будь-яких конструктивних змін, може бути застосована для досліджень плоских листових зразків відповідних розмірів за одновісного розтягу.



а)



б)

Рис. 3. Система наводнення (а) та камера для дослідження зразків (б)

Основними елементами камери (рис. 3) є два корпуси (половини) 1, в які вмонтовано оглядове скло 2. До корпусів приварено кронштейни 4, а також штуцери 6 для приєднання трубопроводів подачі газу. Корпуси камери ставлять з двох сторін на зразок 7 і, за допомогою болтів 5, стягують між собою, одночасно притискаючи до зразка через еластичне ущільнення 2. Таким чином утворюють герметичний об'єм, в який через штуцери 6 подається водень. Еластичне ущільнення, деформуючись у процесі навантаження, компенсує переміщення захватних частин зразка. Цим забезпечують мінімальні переміщення корпуса камери відносно дослідної ділянки зразка, що є важливим при застосуванні методу цифрової спекл-кореляції зображень.

Для наводнення камеру 6 встановлюють на зразку з тріщиною (див. рис. 3,а), закріпленому у захоплювачах машини. Форвакуумним насосом 1 при відкритому вентилі 2 створюють тиск  $10^2$  Па. Закривши вентиль 2 та відкривши вентиль 3, напускають з балона 4 очищений водень, створивши надлишковий тиск у камері 0,1 МПа, який фіксує манометр 5. Для інтенсивнішого наводнення зразок з камерою за допомогою трансформатора і баластного реостата нагрівають до  $200\text{ }^\circ\text{C}$  витримують 1 год згідно з [12]. Після цього охолоджують зразок з камерою до кімнатної температури і створюють втмну тріщину відповідної довжини у середовищі водню. Випробування проводять безпосередньо після вирішування тріщини, не знімаючи камеру зі зразка. Після випробувань визначають характеристики тріщиностійкості на повітрі і в середовищі газоподібного водню.

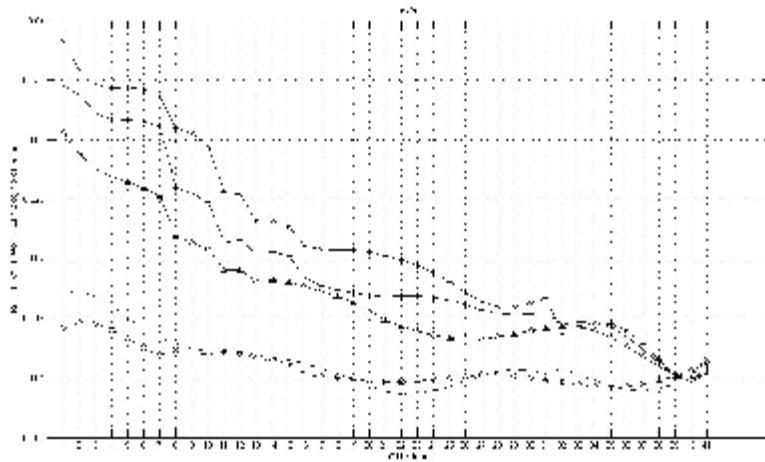


Рис. 4. Розподіл деформацій перед вершиною тріщини у пластичній зоні

У зразках з надрізом вирощують втомну тріщину відповідної довжини на машині EUS-40 за силовою схемою одновісного розтягу. Один з них випробовують на повітрі, інший — у середовищі водню за наведеною вище методикою. Під час досліджень давачами визначають переміщення берегів тріщини на базі 1,5 мм та деформації біля її вершини на віддалі 1 мм. Крім цього, застосовуючи ППЗ-камеру, фотографують ділянку пластичної зони розміром 3×4 мм біля вершини тріщини і за відповідним алгоритмом методу спекл-кореляції визначають переміщення матеріалу на цій ділянці пластичної зони, розраховують деформації і будують ізолінії переміщень на поверхні та графіки залежності деформацій на різних базах від віддалі до вершини тріщини [13] (рис. 4).

Для досліджень за двовісного навантаження хрестоподібний зразок з тріщиною встановлюють у захоплювачі машини для осьового розтягування силою  $P_1$ , перпендикулярною до тріщини (механізм нормального відриву). Синхронно зразок за допомогою додаткового пристосування розтягують силою  $P_2$ , яка діє у площині тріщини. Співвідношення  $\sigma_2/\sigma_1$  знаходиться в інтервалі [0; 1]. У процесі випробування комп'ютеризованою системою реєструють сили  $P_1$  та  $P_2$ , зміщення берегів тріщини і їхню зміну в часі на повітрі й у водні. Крім цього, за методом спекл-кореляції будують ізолінії переміщень та деформацій.

**Розрахунки та обговорення експериментальних результатів.** За результатами експериментальних досліджень сталі 08кп за одно- та двовісного навантаження на повітрі й у середовищі водню розраховували силові та деформаційні характеристики тріщиностійкості дослідного матеріалу. Характеристику силового підходу — коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_C$  розраховували за формулою [11]

$$K_C = \frac{P_C}{tb} \sqrt{\pi l} f_1(\epsilon),$$

де  $f_1(\epsilon) = \frac{1 - 0,5 \cdot \epsilon + 0,326 \cdot \epsilon^2}{\sqrt{1 - \epsilon}}$  — безрозмірна функція,

яка враховує форму і розміри зразка — нескінченної пластини (див. рис. 1,а);  $P_C$  — критичне значення сили, за

Таблиця 1

Результати досліджень зразків зі сталі 08кп за різними силовими схемами

Силовая схема навантаження	$\sigma_2/\sigma_1$	$K_C$ , МПа·м <sup>1/2</sup> (повітря/водень)	$\delta_{cr}$ , мм (повітря/водень)
Одновісне розтягування нескінченної пластини (рис. 1,а)	—	53/37	0,59/0,43
Двовісне розтягування нескінченної пластини (рис. 1,б)	0,15	52/38	0,60/0,44
	0,22	57/41	0,58/0,42
	0,30	58/42	0,58/0,42
	0,38	57/41	0,57/0,41
	0,41	59/43	0,57/0,41
	0,47	63/47	0,57/0,41
		64/48	0,56/0,40

якої тріщина починає поширюватися;  $t$  — товщина пластини;  $b$  — ширина пластини.

Для пластичних матеріалів, яким є сталь 08кп, пластичну складову розкриття вершини тріщини за максимального навантаження прийнято вважати [13] критичним розкриттям вершини тріщини, оскільки його пружна складова є набагато меншою, тобто  $\delta_c = V_{pl}$ .

Пластичну складову визначали з діаграми деформацій  $P-V$ , яку отримали, вимірюючи зміщення берегів тріщини на лінії її вершини на базі 1,5 мм. Окрім цього, критичне розкриття вершини тріщини визначали візуально на екрані монітора в момент досягнення силою  $P_1$  максимального значення. Результати розрахунку характеристик тріщиностійкості подані в табл. 1 і на рис. 5.

Під впливом водню, у процесі пружно-пластичного деформування матеріалу, пластичні властивості матеріалу знижуються — матеріал деградує. Ступінь впливу водню

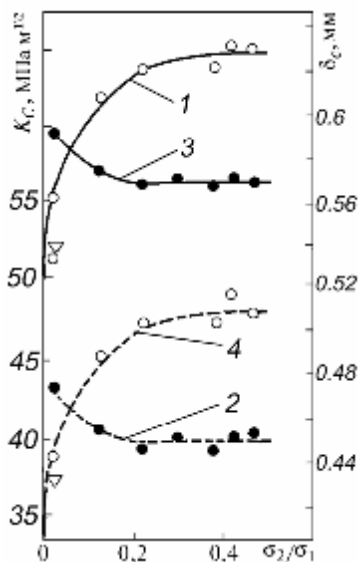


Рис. 5. Вплив водню (крива 2, 4) на характеристики тріщиностійкості ( $K_c$  — крива 1,  $d_c$  — (крива 2) сталі 08кп за одно- та двовісного навантажень

на матеріал можна оцінити за зміною характеристик тріщиностійкості.

За результатами дослідження сталі 08кп на повітрі встановлено, що зростання жорсткості напружено-деформованого стану до  $\sigma_2/\sigma_1=0,5$  за двовісного навантаження призводить до підвищення тріщиностійкості сталі на 30 % у порівнянні з одновісним навантаженням. Розкриття вершини тріщини при цьому також змінюється на 12 %.

Дія водню знижує характеристики  $K_c$  і  $d_c$  як за одновісного, так і за двовісного навантаження. Причому зі зростанням жорсткості НДС у пластичній зоні біля тріщини  $K_c$  і  $d_c$  спадає інтенсивніше.  $K_c$  і  $d_c$  знижуються на 27 %. Такі процеси зумовлені зниженням пластичності zdeформованого металу за зміни жорсткості напружено-деформованого стану.

**Висновки.** 1. Визначено характеристики тріщиностійкості сталі 08кп за одно- та двовісного навантаження пластины з тріщиною на повітрі й у водні.

2. Встановлено зміну КІН ( $K_c$ ) та розкриття вершини тріщини  $d_c$  за зміни напружено-деформованого стану сталі 08кп за одно- та двовісного навантажень.

3. Встановлено, що водень істотно знижує характеристики тріщиностійкості сталі 08кп до 30 % за одно- та двовісного навантажень за різної жорсткості НДС.

4. Методом спекл-кореляції встановлено розподіл деформацій у пластичній зоні перед вершиною тріщини.

#### Література

1. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Евецкий Ю. Л. Испытательный комплекс для исследования прочности тонколистовых материалов при двухосном растяжении в диапазоне температур 20 — 300 К / Пробл. прочности. — 1985. — №1. — С. 109—112.

2. Лебедев А. А., Музыка Н. Р. Конструкции крестообразных образцов для испытаний на трещиностойкость при двухосном растяжении (обзор) // Пробл. прочности. — 1998. — №3. — С. 5—21.

3. Писаренко Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. — К.: Наук. думка, 1976. — 415 с.

4. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Обухивский О.И. Расчётная модель роста трещины в металлах при воздействии водорода // Физ.-хим. механика материалов. — 1984. — №3. — С. 3—6.

5. Галактионова Н.Л. Водород в металлах. — М.: Металлургия, 1967. — 303 с.

6. Шановалов В.И. Влияние водовода на структуру и свойства низкоуглеродистых сплавов. — М.: Металлургия, 1982. — 232 с.

7. Гельд П.В., Рябов Р.А. Водород в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1974. — 272 с.

8. Лебедев А. А., Ковальчук Б.И. Влияние вида напряжённого состояния на прочность конструкционных материалов, используемых в ракетно-космической технике, при низких температурах // Вісник Дніпропетровського ун-ту. — 2006. — №2. — С. 97—102.

9. Визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів під двовісним навантаженням / Іваницький Я.Л., Штаюра С.Т., Костів Р.Б., Мольков Ю.В., Вергун І.А. // Машинознавство. — 2004. — №7 (85). — С. 31—34.

10. Методы механических испытаний металлов, определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении // Методические указания. — М., 1993. — 53 с.

11. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Введ. в действие 27.03.1985 г. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 60 с.

12. Іваницький Я.Л., Зазуляк В.А., Ваганов С.А. Влияние водорода на распространение в сталях трещин продольного сдвига // Физ.-хим. механика материалов. — 1984. — №3. — С. 20—23.

13. Панасюк В.В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П. Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2004. — №5. — С. 67—72.

14. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. — К.: Наук. думка, 1991. — 416 с.

Отримана 17.05.07

S. Shtaiura, Yu. Molkov, I. Vergun  
**Estimation of hydrogen degradation of materials at a biaxial loading**  
 Karpenko Physical and Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

The investigation of work of constructions elements at the biaxial stress-strain state is actual today. In this paper the technique and results of definition of static crack growth resistance characteristics for steel 08kp at a biaxial stretching on air and in hydrogen are represented. Crack resistance characteristics of material  $K_{IC}$  and  $d$  on an infinite plate with central crack at the active proportional loading is determined. Influence of hydrogen is set on characteristics of crack resistance at different of strength the stress-strain state before the crack tip. The stress-strain state near the crack tip by methods of speckle correlation and tensometry is appreciated. It is shown, that of stress-strain state at a biaxial stretching changes crack growth resistance characteristics, the form and the size of a plastic zone.