

УДК:539:3 621:3

ВПЛИВ ЖОРСТКОСТІ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЗА ДВОВІСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТРУБЧАСТИХ ЗРАЗКІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ СТАЛІ 20 У ВОДНІ

С. Т. ШТАЮРА

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Побудовано діаграми осьових і тангенціальних напружень за двовісного пропорційного навантаження, яке спричиняє напружений стан (НС) різної жорсткості у трубчастих ненаводнених та наводнених (10 МПа) зразках. Встановлено, що з підвищенням жорсткості НС ($\chi = 0,52$) за двовісного навантаження зумовлені розтягом напруження текучості та руйнування ненаводнених зразків підвищуються до 24% порівняно з відповідними за одновісного розтягу. У наводнених зразках вони зростають лише до 13%. З підвищенням жорсткості НС інтенсивність цих напружень у перерізі зразків спадає. Під час руйнування наводнених зразків вона вища, ніж для ненаводнених.

Ключові слова: *порожнинний циліндричний зразок, жорсткість напруженого стану за двовісного навантаження, пропорційне та непропорційне навантаження, осьові та колові напруження, характеристики текучості та міцності.*

Труби, піддані двовісному навантаженню, часто застосовують у багатьох галузях. Для оцінки їх міцності встановлюють залежність руйнівних еквівалентних напружень від тиску чи сумісної дії тиску і розтягу. Через вплив двовісного навантаження на схильність матеріалу до крихкого руйнування змінюються закони зміцнення та умова настання гранично-рівноважного стану, а також характеристики міцності та пластичності, які суттєво відрізняються від аналогічних за одновісного розтягу [1–6].

Оскільки більшість елементів конструкцій працює під складним навантаженням, то, щоб оцінити їх міцність та опірність руйнуванню, використовують характеристики матеріалу, визначені з діаграм руйнування, побудованих за результатами випробувань тонкостінних трубчастих зразків за різної жорсткості напруженого стану (НС) під час двовісного навантаження [3, 4]. Зокрема, застосовують методику, побудовану на рекомендаціях ДСТУ 4131, ДСТУ 2550 [7, 8], які регламентують випробування трубчастих зразків розтягом та внутрішнім тиском.

Нижче встановлено вплив жорсткості НС за двовісного навантаження на характеристики пластичності та міцності сталі 20 під дією водню.

Зразки, обладнання та методика. Випробовували тонкостінні трубчасті зразки за пропорційної дії осьової сили та внутрішнього тиску мастила. Механічні характеристики сталі 20 за одновісного розтягу ненаводнених та наводнених суцільних циліндричних [9] та трубчастих [7, 8] зразків усереднювали після трьох випробувань за швидкості переміщення траверси 1 mm/min (табл. 1).

Тонкостінний трубчастий зразок мав сталу товщину робочої частини. До його хвостовиків приварювали захопи для герметизації внутрішнього об'єму (за випроб внутрішнім тиском мастила) та кріплення у випробувальній камері, щоб дослідити вплив двовісності навантаження та водню на характеристики міцності матеріалу за розтягу (рис. 1). Випробовували суцільні циліндричні ($d_0 = 10$ mm,

$L_0 = 50 \text{ mm}$) та трубчасті ($D_0 = 23 \text{ mm}$, $d_0 = 21 \text{ mm}$, $L = 140 \text{ mm}$, $L_0 = 87 \text{ mm}$, $h_0 = 1 \text{ mm}$) зразки (рис. 1).

Таблиця 1. Механічні характеристики сталі 20 (повітря/водень, 10 МПа)

Умови випроб	σ_T	σ_B	S_k	ϵ_k	ψ
	МПа			%	
Постачання, розтяг суцільного зразка, ГОСТ 1497	330/340	510/520	103/85	29/26	63/54
Розтяг трубчастого, ДСТУ 4131	395/420	492/520	–	16/13	–
Руйнування трубчастого внутрішнім тиском, ДСТУ 2550	$\sigma_\theta^T = \mathbf{393/410}$ $\sigma_z^T = 196/205$ $\sigma_i = 340/355$	$\sigma_\theta^B = \mathbf{465/482}$ $\sigma_z^B = 233/242$ $\sigma_i = 402/418$	–	–	–

* жирним шрифтом виділені напруження, за яких настає текучість та руйнування під внутрішнім тиском мастила.

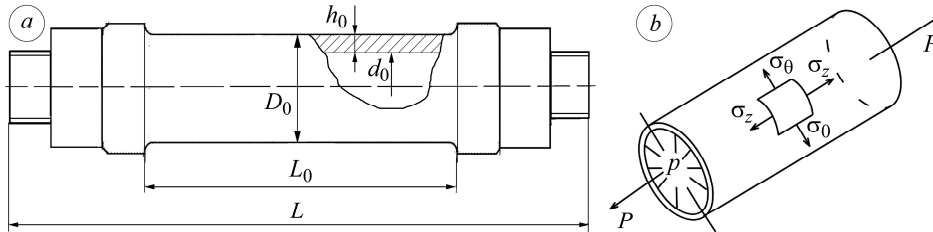


Рис. 1. Тонкостінний трубчастий зразок (a) та силова схема його двовісного навантаження (b).

Fig. 1. Thin-walled tubular specimen (a) and power chart of its biaxial loading (b).

Методика статичних випробувань за двовісного навантаження циліндричних трубчастих зразків (ДСТУ 2550) передбачає такі схеми: розтяг осьювою силою P (I), внутрішнім тиском p (II, пропорційне навантаження), розтяг осьювою силою і внутрішнім тиском (III, пропорційне) та попереднє стискання осьювою силою з подальшим навантаженням до руйнування внутрішнім тиском (IV) за різного їх співвідношення. За таких схем у робочій частині зразка реалізується плоский напружений стан, близький до однорідного, з осьювою σ_z та тангенціальною σ_θ компонентами напружень. Радіальні напруження σ_r нехтують, оскільки їх середнє значення не перевищує 5% від тангенціального. Викликаний силовими чинниками НС характеризується жорсткістю, яку визначає відношення компонент напружень у перерізі зразка $\chi = \sigma_\theta / \sigma_z$. Реалізували такі співвідношення напружень (жорсткість НС): поздовжній одновісний розтяг силою P – $\chi = \sigma_\theta / \sigma_z = 0$, двовісний розтяг тиском – $\chi = 2$, рівномірний двовісний розтяг зусиллям P та тиском p – $\chi = 1; 0,19; 0,32; 0,52; 0,83; 1,1$, попередній стиск осьювою силою P з подальшим навантаженням до руйнування внутрішнім тиском p – $\chi = -\infty$.

Тонкостінні трубчасті зразки наводнювали [10] у камері із газоподібної фази за тиску 10 МПа у печі при 400°C упродовж 4 h, досягаючи рівномірного розподілу водню в об'ємі зразка. Після охолодження зразок встановлювали у захопи випробувальної машини EUS-20 та розтягали до руйнування (схема I). Пропорційно навантажували його за схемою II ($\chi = 2$), підвищуючи тиск мастила у внутрішній порожнині зразка. Видовження і звуження зразків у всіх схемах навантаження реєстрували тензометричними двоконсольними давачами переміщень з базою,

рівною робочій довжині зразка (для видовження) і діаметру (для звуження). Осьову силу P контролювали давачем випробувальної машини. Тиск у внутрішній порожнині зразка вимірювали манометрами та електронними давачами тиску. Сигнали від тензометрів та давачів реєстрували вимірювальною системою [10] за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та будували діаграми “навантаження P –видовження Δl ”, “навантаження P –звуження ΔD ”.

Умовні осьові та колові напруження для вказаних схем розраховували так [8]:

$$\sigma_z = \frac{P}{\pi(D_0 - h_0) \cdot h_0} + \frac{p(D_0 - 2h_0)}{4 \cdot h_0}; \quad \sigma_\theta = \frac{p(D_0 - 2h_0)}{2h_0}. \quad (1)$$

Аналіз результатів. Використовуючи експериментальні діаграми руйнування тонкостінних трубчастих зразків розтягом (схема I), внутрішнім тиском (схема II), розтягом і внутрішнім тиском (схема III), стиском та внутрішнім тиском (схема IV) за різного співвідношення компонент навантаження, визначали компоненти напружень на початку текучості (σ_θ^T , σ_z^T) та руйнування (σ_θ^B , σ_z^B) і будували діаграми деформування в координатах σ_z – σ_θ . Вважали, що текучість настає тоді, коли залишкові деформації (ε_θ^T чи ε_z^T) уздовж головних напружень під час навантаження становлять 0,25%. Для побудови діаграм зразки пропорційно навантажували за прямолінійними траєкторіями 21–26 (схема III) згідно з номограмами (рис. 2). При цьому жорсткість НС χ змінювалася від 0 до 2.

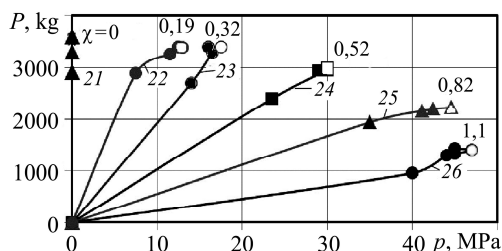


Рис. 2. Номограми пропорційного навантаження (схема III) наводнених (10 МПа) зразків: лінії 21–26 – траєкторії навантаження, що відповідають номерам зразків (точки 21–26, 21^l–26^l) на рис. 3; $\chi = 0; 0,2; 0,32; 0,52; 0,83; 1,1$ відповідно; $\blacktriangle, \bullet, \blacksquare$ – початок текучості, $\triangle, \circ, \square$ – момент руйнування.

Fig. 2. Nomograms of proportional loading (Mode III) of hydrogenated (10 MPa) specimens: lines 21–26 – paths of loading, corresponding to the number of specimens (points 21–26, 21^l–26^l) in Fig. 3; $\chi = 0; 0,2; 0,32; 0,52; 0,83; 1,1$, respectively); $\blacktriangle, \bullet, \blacksquare$ – yielding start, $\triangle, \circ, \square$ – fracture moment.

За результатами випробувань та розрахунків побудували діаграми руйнування в координатах σ_z – σ_θ за двовісного навантаження тонкостінної труби зі сталі 20 для досліджуваних схем навантаження (рис. 3–5). Встановили, що за пропорційного навантаження ненаводнених та наводнених зразків тільки внутрішнім тиском (схема II) (рис. 3, точки 15, 16, 15^l, 16^l) текучість та руйнування починаються за максимальних напружень σ_θ , удвічі більших за осьові σ_z за жорсткості НС $\chi = 2$. За навантаження за схемою IV ненаводнених (точка 8) та наводнених (10 МПа, точка 12; табл. 2) зразків текучість від стискальної сили зумовлюють колові напруження σ_θ , сумірні (в межах 2...3%) з вихідними (схема I, точки 1, 21; табл. 2). Руйнівні колові напруження σ_θ за подальшого зростання тиску знаходяться у межах розкиду експериментальних даних для обох типів зразків (схема I).

Подано (табл. 2 та рис. 3) результати розрахунків осьових σ_z та тангенціальних σ_θ напружень залежно від жорсткості НС у перерізі зразка та побудовано діаграми граничних напружень текучості та міцності за двовісного пропорційного навантаження (схеми II, III) наводнених (10 МПа) трубчастих зразків.

Рис. 3. Діаграма граничних напружень текучості та міцності за двовісного навантаження ненаводнених (●, ○) та наводнених (■, □) трубчастих зразків зі сталі 20 за різної жорсткості НС: ○, □ – границя міцності, ●, ■ – границя текучості; точки 1–8, 1¹–8¹ – ненаводнені зразки з різною історією навантаження; точки 21–26 (пропорційне навантаження) відповідають лініям 21–26 на рис. 2; лінії 4–7 побудовані за критеріями Треска–Сен-Венана, Кулона та Губера–Мізеса.

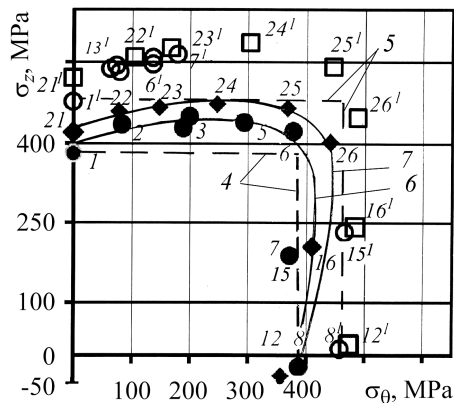


Fig. 3. Diagrams of boundary yield stresses and strength under biaxial loading of non-hydrogenated (●, ○) and hydrogenated (■, □) tubular steel 20 specimens at different stress strain state (SSS) rigidity: ○, □ – ultimate strength, ●, ■ – yield stress; points 1–8, 1¹–8¹ – non-hydrogenated specimens with different histories of loading; points 21–26 (proportional loading) correspond to lines 21–26 in Fig. 2; 4–7 lines built according to Tresca–Saint-Venant, Coulomb and Huber–Misses criteria.

Таблиця 2. Результати розрахунків для трубчастих зразків за різної жорсткості НС (ненаводнені / наводнені за тиску 10 МПа)

№ зразка на рис. 3	Границя текучості, МПа		Границя міцності, МПа		Тиск, МПа	Сила, kg	Жорсткість НС		Інтенсивність напружень
	σ_z	σ_θ	σ_z	σ_θ	p	P	χ_T	χ_B	σ_i^B
8/12	0	380/357	0	460/474	45,1	-1500	–∞	–∞	460/474
1/21	395/420	0	521/492	0	0	3600	0	0	-/521
-/22	-/457	-/78	-/570	-/105	10,0	3500	0,17	0,19	-/515
-/23	-/464	-/147	-/576	-/168	17,5	3400	0,32	0,29	-/513
-/24	-/471	-/247	-/587	-/305	30,0	3000	0,52	0,52	-/508
-/25	-/464	-/368	-/542	-/446	42,5	2200	0,79	0,82	-/501
-/26	-/401	-/441	-/447	-/488	47,0	1400	1,10	1,09	-/469
15/16	205/210	381/420	220/240	440/483	46/46	0	2	2	381/418

* жирним шрифтом виділено напруження, за яких настають текучість і руйнування.

Встановили, що за двовісного пропорційного навантаження наводнених трубчастих зразків за сумісної дії розтягу та внутрішнього тиску мастила (схема III) з підвищенням жорсткості НС границі текучості і міцності (за осьовими напруженнями σ_z) зростають до 24% (точки 24, 24¹, $\chi = 0,52$) проти ненаводнених (схема I, точки 1, 1¹ на рис. 3; табл. 2). Порівняно з осьовим розтягом наводнених зразків (схема I, точки 21, 21¹) границі текучості і міцності (за напруженнями σ_z) збільшуються до 13%. За жорсткості НС $\chi = 1,1$ (точка 26) текучість і міцність зафіксовано за домінування колових напружень σ_θ . Напруження текучості та руйнування за схеми I наводнених (точки 21, 21¹) зразків зростають лише на 6% (за напруженнями σ_z) проти ненаводнених (точки 1, 1¹).

Зіставили (рис. 3) експериментальні результати з граничними кривими, розрахованими за відомими критеріями граничних станів. Границі текучості (лінія 4) та міцності (лінія 5) апроксимували ламаною кривою за критерієм Треска–Сен-

Венана. Криві 6, 7 описують границю текучості ненаводнених та наводнених зразків за критерієм Губера–Мізера:

$$\sigma_z^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_z \sigma_\theta = \sigma_T^2. \quad (2)$$

Отже, для розрахунків граничного стану текучості можна використовувати рівняння Губера–Мізера. Характерним під час пропорційного навантаження зразка є незмінність жорсткості НС як за досягнення текучості, так і міцності (табл. 2 і рис. 4).

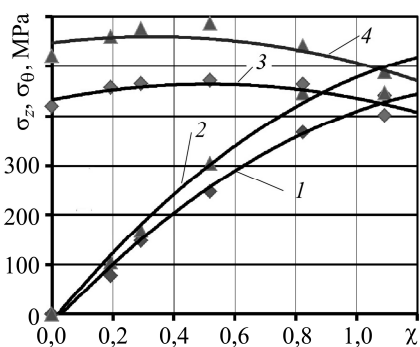


Fig. 4. Dependence of yield stress σ_θ^T (curve 1), σ_z^T (curve 3) and strength σ_θ^B (curve 2), σ_z^B (curve 4) under proportional biaxial loading (Mode III) of hydrogenated (10 MPa) tubular specimens of steel 20 on SSS rigidity χ ; points correspond to points 21–26, 21^l–26^l in Fig. 3.

Рис. 4. Залежність напружень текучості σ_θ^T (крива 1), σ_z^T (крива 3) та міцності σ_θ^B (крива 2), σ_z^B (крива 4) за двовісного пропорційного навантаження (схема III) наводнених (10 МПа) трубчастих зразків зі сталі 20 від жорсткості НС χ ; точки відповідають точкам 21–26, 21^l–26^l на рис. 3.

Визначені за одновісного розтягу механічні характеристики суцільного зразка (схема I), трубчастого (схема II) та навантаженого тиском (схема III) суттєво різняться (див. табл. 1). Тому для коректного оцінювання міцності матеріалів з різною жорсткістю НС за складного навантаження потрібно використовувати механічні характеристики, розраховані за розтягу трубчастого зразка (ДСТУ 2550) та виражені в інтенсивностях напружень (рис. 5).

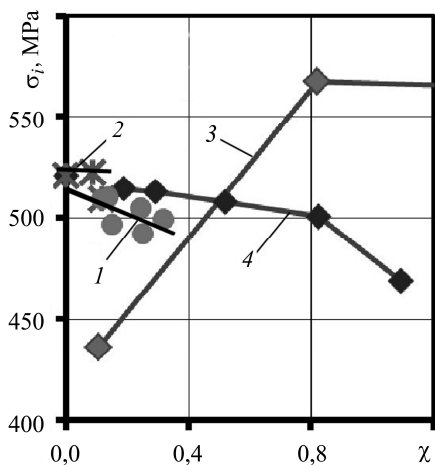


Рис. 5. Залежність інтенсивності напружень руйнування трубчастих зразків зі сталі 20 від жорсткості НС χ за двовісного пропорційного (схема III, лінія 4) та непропорційного (лінії 1–3) навантажень [10]: 1 – ненаводнені зразки (тиск–розтяг); 2, 3 – наводнені, 10 МПа, відповідно тиск–розтяг та розтяг–тиск.

Fig. 5. Dependence of the ultimate stress intensity of tubular specimens of steel 20 on SSS rigidity χ under proportional (Mode III, line 4) and non-proportional (line 1–3) biaxial loading [10]: 1 – non-hydrogenated specimens (pressure–tension); 2, 3 – hydrogenated, 10 MPa, pressure–tension and tension–pressure respectively.

Побудовано (рис. 5) залежність інтенсивності напружень руйнування за двовісного пропорційного (схема III) та непропорційного навантажень [10] трубчастих зразків зі сталі 20 від жорсткості НС у їх перерізі. Виявили, що зі зростанням жорсткості інтенсивність напружень спадає за непропорційного (лінія 1, ненаводнені; лінія 2, 10 МПа) та пропорційного (схема III, лінія 4, 10 МПа) навантажень. Причому інтенсивність руйнівних напружень наводнених зразків як за пропорційного, так і непропорційного навантажень вища, ніж ненаводнених. Винятком є руйнування розтягом–тиском (лінія 3), де вона зі зростанням жорсткості НС збільшується.

ВИСНОВКИ

Під час пропорційного двовісного навантаження зі зростанням жорсткості НС напруження текучості та міцності наводнених зразків збільшуються до 24% ($\chi = 0,52$) проти ненаводнених (схема І). Порівняно з напруженнями за розтягу наводнених зразків (схема І) напруження текучості підвищуються лише до 13%. При цьому за переходу від границі текучості до границі міцності за пропорційного навантаження жорсткість не змінюється, на відміну від непропорційного. За зростання жорсткості НС інтенсивність напружень текучості та міцності спадає за обох навантажень. Але за руйнування наводнених зразків вона вища, ніж під час руйнування ненаводнених. Найнижчої інтенсивності руйнівних напружень за пропорційного навантаження досягнуто за жорсткості 0,9.

РЕЗЮМЕ. Построены диаграммы осевых и тангенциальных напряжений при двухосном пропорциональном нагружении, которое вызывает напряженное состояние (НС) различной жесткости в трубчатых ненаводороженных и наводороженных (10 МПа) образцах. Установлено, что с повышением жесткости НС ($\chi = 0,52$) при двухосном нагружении обусловленные растяжением напряжения текучести и разрушения ненаводороженных образцов увеличиваются до 24% в сравнении с соответствующими при одноосном растяжении. В наводороженных образцах они повышаются только до 13%. С повышением жесткости НС интенсивность этих напряжений в сечении образцов уменьшается. Во время разрушения наводороженных образцов она выше, чем для ненаводороженных.

SUMMARY. The diagrams of axial and tangential stresses under non-proportional biaxial loading that causes the stress-strain state (SSS) of different rigidity in tubular non-hydrogenated and hydrogenated (10 MPa) specimens were built. It is established that with the increase of the SSS rigidity ($\chi = 0.52$) tensile yield stress and ultimate strength under axial tension increased to 24% compared to non-hydrogenated specimens. In the hydrogenated specimens they increase up to 13% only. With increasing SSS rigidity the stress intensity in the cross-section of specimens decreases. In the fracture of hydrogenated specimens it is higher than for non-hydrogenated ones.

1. Лебедев А. А., Ламашевский В. П. Деформирование и прочность легированных сталей при низких температурах в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности. – 2010. – № 4. – С. 28–36.
2. Ламашевский В. П. Влияние вида напряженного состояния на деформирование и прочность стали 20Х25Н20С2 // Вісник Техн. ун-ту України “КПІ”. Сер. Машинобудування. – 2010. – № 58. – С. 165–170.
3. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: Наук. думка, 1976. – 416 с.
4. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А. А. Лебедев, Б. И. Ковальчук, Ф. Ф. Гигиняк, В. П. Ламашевский. – К.: Изд. дом “Ин Юре”, 2003. – 540 с.
5. Ламашевский В. П., Маковецкий И. В., Волков Ю. Н. Методика механических испытаний конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии в условиях высоких температур // Проблемы прочности. – 1987. – № 11. – С. 111–114.
6. Іваницький Я. Л., Кунь П. С. Тріщинотійкість конструкційних матеріалів за складного навантаження. – Львів: Сполом, 2013. – 280 с.
7. ДСТУ 4131-2002. Труби металеві. Методи випробування на розтяг за кімнатної температури. – К.: Держстандарт України, 2004. – 22 с.
8. ДСТУ 2550-1994. Методи механічних випробувань за складного напруженого стану в умовах короточасного та тривалого навантаження. – К.: Держстандарт України, 1994. – 24 с.
9. ГОСТ 1497-84 / СТ СЭВ 471-77. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 40 с.
10. Штайора С. Т., Костів Р. Б., Вергун І. А. Побудова діаграм руйнування сталі 20 за двовісного навантаження циліндричних порожнинних зразків і дії водню // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – Спецвип. № 10, Т. 1. – С. 194–198.

Одержано 09.12.2014