

Степан ШТАЮРА, Ростислав КОСТИВ, Ігор ВЕРГУН, Наталія ШТАЮРА

ВПЛИВ ВОДНЮ ЗА НЕПРОПОРЦІЙНОГО ДВОВІСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДЕФОРМУВАННЯ ТА МІЦНІСТЬ СТАЛІ 20

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060. E-mail: shtayura@ipm.lviv.ua*

Stepan SHTAYURA, Rostyslav KOSTIV, Igor VERGUN, Natalia SHTAYURA

HYDROGEN INFLUENCE ON DEFORMATION AND STRENGTH OF STEEL 20 UNDER UNPROPORTIONAL BIAXIALE LOADING

*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine
5, Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine. E-mail: shtayura@ipm.lviv.ua*

ABSTRACT

Axial and tangential stresses diagram under different schemes biaxiale disproportionately loading of cylindrical cavity samples unhydrogenated and hydrogenated (10 MPa) which depends from different hardness stress state was constructed. The increase axial stress creep and fracture for increasing stiffness stress state under different schemes disproportionately load was established. Fracture tension (axial) hydrogenated samples (Figure VI) increases up to 22% in compare unhydrogenated (Scheme II, tension) and versus hydrogenated (Scheme II sprain) - up to 13%. The fracture of hydrogenated sample according scheme V start under axial stresses that are higher than unhydrogenated on 30%, and compare hydrogenated (Scheme II, tension) - 13% higher. Intensity of the stress from stiffness stresses state was built for correct comparison of stress-strain states samples during fracture under different schemes disproportionately biaxiale load.

KEY WORDS: *cavernous cylindrical sample, stiffness of stress state, disproportionate biaxiale loading, axial and tangential stresses, hydrogen influence, strength and creep characteristics.*

Враховуючи те, що більшість елементів конструкцій працює за складних умов навантаження, а оцінювання міцності та несучої здатності виробів здійснюють за еквівалентних і граничних напружень, застосування для розрахунку граничного стану характеристик, отриманих за одновісного розтягу є некоректним [1-4]. Тому для оцінювання міцності та опірності руйнуванню матеріалів конструкцій, які працюють за складного навантаження, використовують діаграми руйнування, побудовані за випробувань тонкостінних трубчатих зразків за різної жорсткості двовісного навантаження [5]. Методику визначення характеристик міцності матеріалу трубчатих зразків за двовісного навантаження побудовано на основі рекомендацій ДСТУ 4131, ДСТУ 2550 [6, 7].

Мета роботи – дослідити опірність течіння та руйнуванню сталі 20 у водні за різної жорсткості напруженого стану під двовісним непропорційним навантаженням.

ЗРАЗКИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження впливу водню на опірність течіння та руйнуванню сталі 20 за різної жорсткості напруженого стану під двовісним навантаженням випробовували тонкостінні трубчаті зразки та будували діаграми руйнування за дії осьової сили та внутрішнього тиску масла за непропорційного навантаження.

Механічні характеристики сталі 20 за одновісного розтягу наводнених і ненаводнених суцільних циліндричних зразків за ГОСТ 1497 та трубчатих зразків – за ДСТУ 4131 та ДСТУ 2550 [4, 6, 7] визначено як середнє із трьох випробувань за швидкості траверси 1 мм/хв та представлено у таблиці 1.

Тонкостінний трубчатий зразок зі сталі 20 діаметра – $D_0=23$ мм, $d_0=21$ мм та робочої довжини $L_0=87$ мм виготовлено з постійною по товщині ($h_0=1$ мм) робочою частиною. До

хвостовиків приварені захоплювачі для герметизації внутрішнього об'єму зразка (за випроб внутрішнім тиском масла) та у захватах для визначення характеристик міцності та пластичності матеріалу за розтягання (рис. 1, *b*). Суцільні циліндричні зразки мали такі розміри – $d_0 = 10$ мм, $L_0 = 50$ мм.

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

Table 1. Mechanical properties of steel 20 (air/hydrogen, 10 MPa)

Матеріал	σ_T , МПа	σ_b , МПа	S_K , МПа	ε_K , %	ψ , %
Сталь 20, поставка (суцільний зразок, розтяг), ГОСТ 1497	330/340	510/520	103/85	29/26	63/54
Сталь 20 (трубчатий зразок, розтяг), ДСТУ 4131	395/420	492/520	-	16/13	-
Сталь 20 (трубчатий зразок, внутр. тиск), ДСТУ 2550	$\sigma_\theta^T = 393/410$ $\sigma_z^T = 196/205$ $\sigma_i^T = 340/355$	$\sigma_\theta^B = 465/482$ $\sigma_z^B = 233/242$ $\sigma_i^B = 402/418$	-	-	-

*жирним позначено напруження, за яких настає течіння та руйнування за внутрішнього тиску масла.

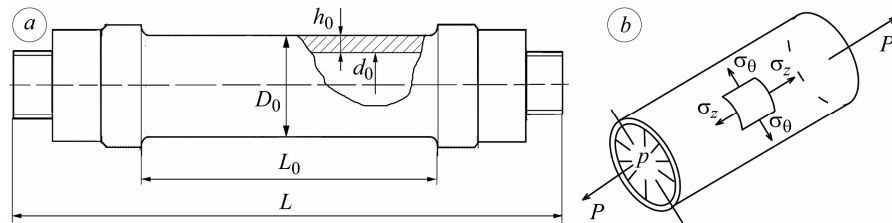


Рис. 1. Тонкостінний трубчатий зразок (*a*) та силова схема його двовісного навантаження (*b*).

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

Методика статичних випробувань за двовісного навантаження циліндричних трубчатих зразків (ДСТУ 2550) передбачає такі схеми: розтяг осьовою силою P (схема I), внутрішнім тиском p (схема II), попереднє розтягання осьовою силою з подальшим навантаженням внутрішнім тиском p (схема V), попереднє стискання осьовою силою з подальшим навантаженням внутрішнім тиском p (схема IV) за різного їх співвідношення та попереднє навантаження внутрішнім тиском з подальшим розтяганням осьовою силою P (схема VI). За таких схем навантаження у робочій частині трубчатого зразка виникає плоский напружений стан, близький до однорідного, з осьовою σ_z та тангенціальною σ_θ компонентами напружень. Радіальними напруженнями σ_r нехтують, оскільки їх середнє значення не перевищує 5% від тангенціального. Відношення компонент напружень σ_θ та σ_z у перерізі зразка характеризує жорсткість напруженого стану $\chi = \sigma_\theta/\sigma_z$. Такі співвідношення напружень (жорсткість НС) реалізували за вищенаведеними схемами навантажень (табл. 2).

Для оцінювання впливу газоподібного водню на опірність сталі 20 водневій деградації досліджували наводнені зразки у стані поставки на повітрі. Наводнення зразків та випробування для визначення опірності матеріалу руйнуванню здійснювали за наступною методикою [5]. Тонкостінні трубчасті зразки наводнювали у камері із газоподібної фази за тиску 10 МПа у печі при 400°C упродовж 4 годин, досягаючи рівномірного розподілу водню в об'ємі зразка. Після охолодження зразок встановлювали у захопи випробувальної машини EUS-20 та випробували зразки на повітрі за вище наведеними схемами. Видовження і звуження зразків за всіх схем навантаження реєстрували тензометричними двоконсольними давачами переміщень з базою, рівною робочій довжині зразка (для видовження) і діаметра (для звуження). Осьову силу P контролювали давачем випробувальної машини. Тиск у внутрішній порожнині зразка вимірювали манометром та електронним давачем тиску. Сигнали від тензометрів та давачів реєстрували вимірювальною системою [5] за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та будували діаграми навантаження P , тиску p , видовження Δl та звуження ΔD залежно від часу.

Умовні осьові та колові напруження для вказаних схем навантаження розраховували за формулами [7]:

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

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ

За отриманими експериментально часовими залежностями вимірюваних параметрів будували діаграми руйнування тонкостінних трубчатих зразків зі сталі 20 за вищенаведеними схемами: розтягом (I), внутрішнім тиском (II), стиском та внутрішнім тиском (IV), розтягом і внутрішнім тиском (V), внутрішнім тиском і розтягом (VI) за непропорційного навантаження. За співвідношеннями (1) визначали складові напруження при настанні течіння σ_θ^T , σ_z^T та при досягненні міцності σ_θ^B , σ_z^B і будували діаграми деформування в координатах $\sigma_z - \sigma_\theta$ за різної жорсткості χ напруженого стану у перерізі зразка (за різних схем навантаження).

Під час випробувань зразки навантажували за відповідними траєкторіями (рис. 2). Стрілками на рисунку показано послідовність прикладання силових факторів (тиск – сила чи сила – тиск). Жорсткість χ за непропорційного навантаження встановлювали у момент досягнення напружень течіння σ_θ^T , σ_z^T та міцності σ_θ^B , σ_z^B (символи на кривих, рис. 2).

Вважали, що течіння настає тоді, коли залишкові деформації (ε_θ^T чи ε_z^T) уздовж головних напружень під час навантаження досягають 0,25%. При цьому жорсткість НС χ змінювалася від 0 до 2.

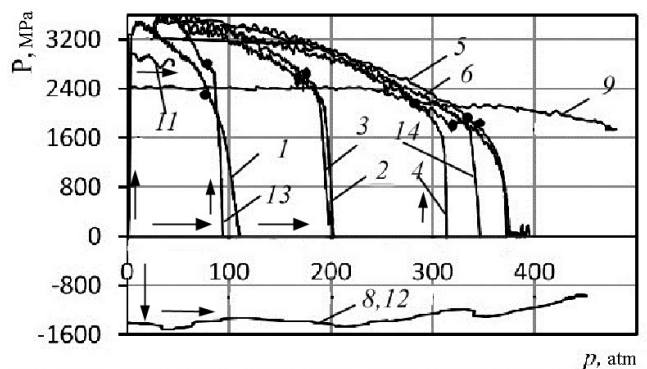


Рис. 2. Траєкторії непропорційного навантаження зразків за різної жорсткості: ненаводнених – тиском-розтягом, схема VI, лінії 2-7; наводнених (10 МПа) – тиском-розтягом, схема VI, лінії 13-14; розтягом-тиском, схема V, VI, лінії 9-11, 8, 12. На графіках: затемнені символи – момент настання течіння, х – момент руйнування. Номери ліній 1-14 (траєкторій деформування) відповідають номерам зразків (точки 1-14) на рис. 3.

Fig. 2. The trajectories disproportionate samples loading for different stiffness: hydrogenated by pressure- tension, scheme VI, lines 2-7; hydrogenated (10 MPa) – pressure-tension scheme VI, lines 13-14; tension-pressure, scheme V, VI, lines 9-11, 8, 12. Charts: black-out symbols – the moment of creep starting, x – fracture process. Numbers 1-14 lines (deformation trajectories) correspond to the numbers of samples (points 1-14) in fig. 3.

У результаті досліджень встановлено, що за двовісного непропорційного навантаження ненаводнених трубчатих зразків за сумісної дії тиску і розтягу (схема VI, точки 2-8, 2¹-8¹, рис. 3) зі зростанням сили P після попереднього навантаження тиском p межа течіння матеріалу зразка за осьовими напруженнями σ_z відносно напружень вихідного (схема II, точка 1, ненаводнений зразок) зростає до 17% за жорсткості 0,45 (табл. 2). Зростає також і межа міцності – до 22% за жорсткості 0,36. Найбільші значення руйнуючих зусиль зафіксовано для зразків, які за попередньої дії тиску доведено до течіння матеріалу за окружними напруженнями σ_θ (точка 7, рис. 3; точка 7 на лінії 3, рис. 4). Подальше навантаження розтягуючою силою призводить до руйнування за напруженнями σ_z (лінія 4, точка 7, рис. 4). При цьому більше, ніж у два рази зменшуються окружні напруження σ_θ (точка 7, лінія 5, рис. 4). Тобто зі зростанням жорсткості напруженого стану χ від дії внутрішнього тиску напруження σ_θ (лінія 2, точки 2-6, рис. 4) та σ_z (лінія 1, точки 2-6, рис. 4) зростають, а в точці 7 (лінія 3, рис. 4) настає течіння за окружними напруженнями σ_θ .

При подальшому навантаженні розтягуючою силою до руйнування окружні напружен-

ня σ_0 зменшуються більше, ніж удвічі (точки 2-7, лінія 5), а осьові σ_z (лінія 4, точки 2-7) значно зростають, забезпечуючи течіння у напрямку розтягу (точка 7, лінія 3, рис. 4, табл. 2).

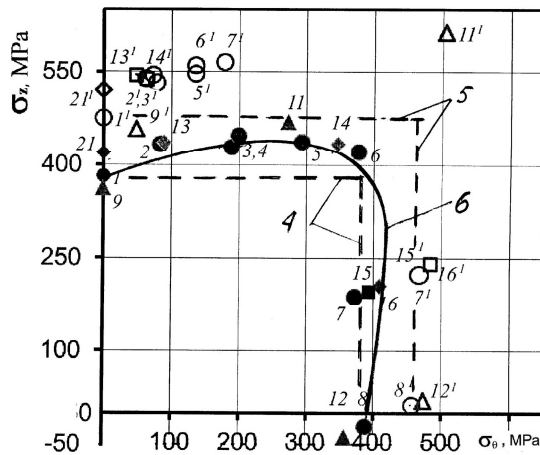


Рис. 3. Діаграми граничних напружень течіння та міцності за двовісного непропорційного навантаження циліндричних порожнинних зразків зі сталі 20: ненаводнені – схема I, точки 1-1' – течіння і руйнування; схеми IV, VI, точки 2-8, 2'-8' – течіння і руйнування; схема II, точки 15, 15' – течіння і руйнування; наводнені (10 МПа) – схема V, IV – точки 9-12, 9'-12' – течіння і руйнування; схема VI, точки 13, 14, 13', 14' – течіння і руйнування; схема II, точки 16, 16' – течіння і руйнування. Лінія 4 побудована за критерієм Треска-Сен-Венана; 5 – за критерієм Кулона; 6 – за критерієм Губера-Місеса. Затемнені символи – межа течіння, світлі символи – межа руйнування.

Fig. 3. Limit creep stresses and strength diagram for the biaxial disproportionate load of hollow cylindrical samples from steel 20: unhydrogenated – scheme I, points 1-1' – techinnya and destruction; scheme IV, VI, point 2-8, 2'-8' - techinnya and destruction; scheme II, points 15, 15' - creep and fracture; hydrogenated (10 MPa) – scheme V, IV – point 9-12, 9'-12' - creep and fracture; scheme VI, points 13, 14, 13', 14' – creep and fracture; scheme II, points 16, 16' – creep and fracture. Line 4 was built based on Tresca-Saint-Wenan criteria; 5 – the Coulomb criterion, 6 – a Huber-Mises criterion. Shaded symbols – the creep limit, light symbols – the fracture limit.

Отже, руйнування за такого способу навантаження відбувається за жорсткості не вище 0,4 (навантаженням внутрішнім тиском зразок доведено до течіння по σ_0 (точка 7, лінія 3 рис. 4), а наступним навантаженням розтягом досягають руйнування за напруженнями σ_z (точка 7, лінія 4, схема VI).

Руйнування зразка тільки внутрішнім тиском (схема II, точки 15, лінії 1 і 2) відбувається за максимальних напружень σ_0 , в 2 рази менших за осьові σ_z (рис. 4, рис. 4) та жорсткості навантаження $\chi = 2$.

Таблиця 2. Характеристики течіння і міцності сталі 20 за непропорційного навантаження різної жорсткості напруженого стану та дії водню

Table 2. Creep and strength characteristics for steel 20 under disproportionate load of varying stiffness stress state and hydrogen action

Середовище, зразки, схема навантаження	№ точок (зразків)	Течіння			Руйнування			Інтенсивність σ_i^B , МПа	
		σ_z^T , МПа	σ_0^T , МПа	жорсткість, χ_1	σ_z^B , МПа	σ_0^B , МПа	жорсткість, χ_2		
Повітря									
Ø10 mm	-	330	-	-	510	-	-		
Ø 23 (розтяг)	I	1	382	-	475	-	-		
Ø 23 (тиск)	II	15	196	393	2,0	233	465	2,0	
Тиск + розтяг (непропорційне навантаження)	VI	2	433	84	0,19	538	63	0,12	509
		3	427	189	0,44	532	79	0,15	497
		4	447	200	0,45	543	74	0,14	510
		5	437	294	0,67	546	137	0,25	492
		6	421	378	0,9	559	137	0,24	505
		7	186	373	2,0	580	210	0,36	509
Стиск+тиск масла	IV	8	-23	389	-17	12	458	39,0	452
H₂, 10 МПа									
Ø10 mm	-	340	-	-	520	-	-		
Ø 23 (розтяг)	I	21	420	-	521	-	-		
Ø 23 (тиск)	II	16	205	410	2,0	242	483	2,0	418
Тиск + розтяг		13	436	89	0,2	545	47	0,09	523

(непропорційне навантаження)	VI	14	434	347	0,8	538	63	0,12	509
Розтяг + тиск (непропорційне навантаження)	V	9	353	0	0	458	48	0,11	436
		10							
		11	522	378	0,12	614	504	0,82	567
Стиск + тиск масла	IV	12	-31	373	-12,0	20	473	24,0	463

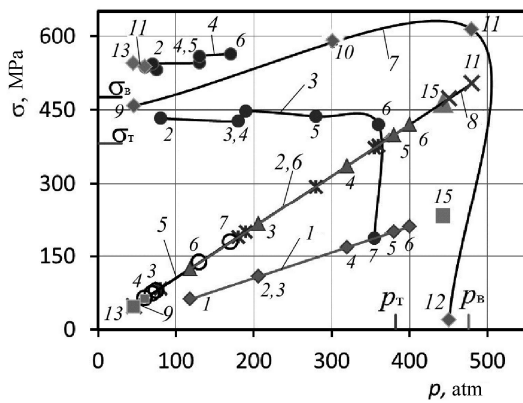


Рис. 4. Залежність напружень течіння та міцності за двовісного непропорційного навантаження (схеми навантаження IV, V, VI) циліндричних порожнинних зразків із сталі 20 від внутрішнього тиску масла p : *ненаводнені зразки*: лінія 1 – зміна напружень σ_z (схема II, точки 2-6); лінія 2 – зміна напружень σ_θ (схема II, 2-6); 3 – σ_z при течінні (схема VI, 2-7); 4 – σ_z при руйнуванні (VI, 2-4); 5 – σ_θ при руйнуванні (схема VI, 2-7); 6 – σ_θ при течінні (VI, 2-6); *наводнені зразки (10 МПа)*: лінія 7 – σ_z при руйнуванні (схеми IV, V, 9-12); 8 – σ_θ при руйнуванні (IV, V, 9-12); 9 – σ_θ при руйнуванні (схема VI, 13); лінія 10 – σ_z при руйнуванні (VI, 13); p_r, p_b – тиск при течінні і руйнуванні за схеми II. σ_r, σ_b – напруження за схеми I.

Fig. 4. Dependence creep stresses and strength hollow cylindrical samples of steel 20 under biaxial disproportionated load (load schema IV, V, VI) from the internal oil pressure p : unhydrogenated samples: line 1 – change stresses σ_z (scheme II, points 2-6); σ_θ (scheme II, 2-6); line 2 – change stresses σ_θ under creep (scheme VI, 2-7); 3 – σ_z the fracture (VI, 2-4); 4 – σ_z under fracture (scheme VI, 2-7); 5 – σ_θ under creep (VI, 2-7); 6 – σ_θ under fracture (scheme VI, 2-6); awash samples (10 MPa): line 7 – under fracture (IV, V, 9-12); 8 – σ_θ under fracture (scheme IV, V, 9-12); 9 – σ_θ under fracture (VI, 13); line 10 – σ_z under fracture (VI, 13); p_r, p_b – pressure at creep and fracture for the scheme II. σ_r, σ_b – stress on schema I.

Двовісне непропорційне навантаження розтягом і тиском (схема V) наводнених зразків (точки 9-12, лінія 1 рис. 3, рис. 4, a, b) призводить до руйнування зі зростанням тиску (після попереднього розтягу). При цьому напруження σ_z , зростають до 30 % (точка 11, лінія 7, рис. 3, рис. 4) проти ненаводнених зразків (схема I, точка 1), і – до 18% – порівняно з напруженнями наводненого зразка (точка 21, табл. 2).

За непропорційного двовісного навантаження за схемою IV ненаводнених (точка 8) та наводнених зразків (10 МПа, точка 12, табл. 2) течіння від стискуючої сили настає за окружними напруженнями σ_θ , значення яких сумірні (у межах (2-3)%) з вихідними (точки 1, 21 табл. 2). При зростанні тиску руйнування відбувається за напруження σ_θ , яке є у межах розкиду експериментальних даних для ненаводнених та наводнених зразків у порівнянні з вихідними (схема I).

При навантаженні за схемами V, VI жорсткість навантаження при переході від границі течіння до границі міцності зменшується (табл. 2). Для цих схем непропорційного навантаження максимальна жорсткість досягає 0,4 – для схеми V, 0,9 – для схеми VI.

Зіставимо експериментальні результати з кривими, які побудовані за критеріями граничних станів. Лінія 4 апроксимує границі течіння за критерієм Треска-Сенвенана, крива 5 – за критерієм Кулона, а крива 6 – границі течіння ненаводнених зразків за критерієм Губера-Мізеса.

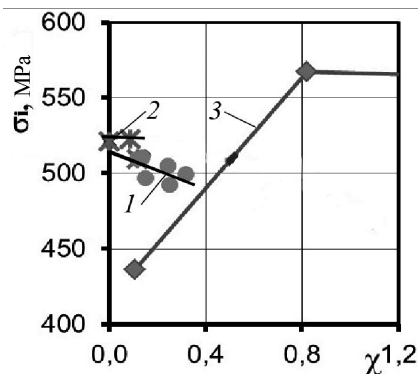


Рис. 5. Залежність інтенсивностей напружень за двовісного непропорційного (схеми IV, V, VI) навантаження циліндричних порожнинних зразків із сталі 20 від жорсткості напруженого стану χ : лінія 1 – схема VI (ненаводнені); 2 – схема VI (наводнені, 10 МПа); 3 – схема V (наводнені, 10 МПа).

Fig. 5. Dependence of stresses intensity for biaxial disproportionated load (scheme IV, V, VI) hollow cylindrical samples of steel 20 from the hardness of the stress state χ : 1st line – scheme VI (unhydrogenated), 2 – scheme VI (hydrogenated, 10 MPa); 3 – scheme V (hydrogenated, 10 MPa).

Як бачимо за результатами випробувань одновісним навантаженням механічні характеристики сталі 20 (визначені за ГОСТ 1497), характеристики текучості та пластичності матеріалу трубчатого зразка зі сталі 20 (визначені за ДСТУ 4131), а також – за двовісного навантаження тиском трубчатого зразка (ДСТУ 2550) значно різняться (див. табл. 1). Тому для коректного оцінювання напружено-деформованого стану матеріалу зразка за різної жорсткості двовісного навантаження запропоновано використовувати еквівалентні напруження (інтенсивність напружень) (рис. 5), розраховані за ДСТУ 2550.

Як видно з рис. 5, зі зростанням жорсткості інтенсивність напружень за непропорційного навантаження зразків спадає (лінія 1, схема VI, ненаводнені; лінія 2, схема VI, 10 МПа). Причому інтенсивність напружень за руйнування наводнених зразків є вищою, ніж аналогічно навантажених ненаводнених. Винятком є інтенсивність напружень за руйнування за схемою V (лінія 3), де інтенсивність напруження із зростанням жорсткості напруженого стану зростає.

ВИСНОВКИ

Під час непропорційного двовісного навантаження наводнених і ненаводнених трубних зразків (схема VI) встановлено зростання текучості та міцності матеріалу. Напруження руйнування (осьові) наводнених зразків зростають до 22% проти ненаводнених (схема I, розтяг), а проти наводнених (схема I, розтяг) – до 13%. Жорсткість напруженого стану при цьому не перевищує 0,4.

Руйнування наводнених зразків за схемою V відбувається за осьовими напруженнями, що перевищують аналогічні для ненаводнених на 30%, а відносно наводнених (схема I, розтяг) – на 13%. Жорсткість навантаження при цьому зростає до 0,9.

Особливістю непропорційного навантаження за схемою IV та VI є зменшення жорсткості НС від текучості до руйнування за домінування осьових напружень. Досягнення жорсткості НС більшої, ніж 0,4 та 0,9 є проблемним.

Для коректного порівняння напружено-деформованого стану зразків з різною жорсткістю за двовісного непропорційного навантаження доцільно використовувати залежність інтенсивності напружень від жорсткості навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ламашевский В.П. Влияние вида напряжённого состояния на деформирование и прочность стали 20Х25Н20С2 // Вісник НГУУ “КП”, – 2010. – Серія “Машинобудування”, № 58. – С. 165-170.
2. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 415 с.
3. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Гигиняк Ф.Ф., Ламашевский В.П. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряжённом состоянии / Под ред. акад. НАН Украины А.А. Лебедева. – Киев: Изд. Дом “Ин Юре”2003. – 540 с.
4. ГОСТ 1497-84 /СТ СЭВ 471-77 / Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М: Изд. стандартов, 1985. – 40 с.
5. Штаюра С.Т., Костів Р.Б., Вергун І.А. Побудова діаграм руйнування сталі 20 за двовісного навантаження циліндричних порожнинних зразків і дії водню // Фізико-хімічна механіка матеріалів. –2014. – Спец. вип. № 10, Т.1. – С. 194-198.
6. ДСТУ 4131-2002. Труби металеві. Методи випробування на розтяг за кімнатної температури. – К.: Держстандарт України, 2004. – 22 с.
7. ДСТУ 2550–94. Методи механічних випробувань за складного напруженого стану в умовах короткого та тривалого навантаження. – К.: Держстандарт України, 1994. – 24 с.