

УДК 620.191.33:620.193

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ ДЛЯ МОРСЬКИХ ПЛАВУЧИХ ПЛАТФОРМ ЗА СТАТИЧНОГО ТА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕНЬ

NENGJUN BEN<sup>1</sup>, О. Ю. ВИТЯЗЬ<sup>2</sup>, Р. С. ГРАБОВСЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yancheng Polytechnic College, China;

<sup>2</sup> Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Наведено результати виконання комплексу експериментальних випробувань зразків зі сталі Q420 з рівнем якості Q420B. Порівняно хімічні склади сталі, а також її механічні характеристики, вказані у сертифікаті на продукцію та визначені експериментально, зі значеннями стандарту. Проаналізовано результати втомних та корозійно-втомних випробувань сталі. Побудовано криві втоми у повітрі та штучній морській воді, а також визначено відповідні значення границі витривалості за кімнатної температури та при 0°C. Виявлено суттєвий вплив корозивного середовища на швидкість поширення втомних тріщин у сталі.

**Ключові слова:** *сталь Q420B, хімічний склад сталі, механічні властивості, корозивне середовище, випробування на втому, криві втоми.*

The paper presents the results of a set of experimental tests of Q420 steel samples with quality level Q420B. The chemical composition of steel and its mechanical characteristics, indicated in the certificate for products and determined experimentally, were compared with the standard values in the certificate for products. The results of steel fatigue and corrosion-fatigue tests were analyzed. Fatigue curves in air and artificial seawater were constructed, and the corresponding values of endurance limits at room temperature and at 0°C were also determined. A significant influence of the corrosive environment on fatigue crack propagation rate in steel was established.

**Keywords:** *Q420B steel, chemical composition of steel, mechanical properties, corrosive environment, fatigue test, S-N curves.*

**Вступ.** Плавучі установки для видобутку, зберігання і відвантаження нафти (Floating Production, Storage and Offloading (FPSO)) інтенсивно використовують впродовж останніх 30 років для експлуатації морських нафтогазових свердловин. Для їх проектування, створення необхідної геометричної моделі, розрахунків (валідації та верифікації розрахункової схеми), а також будівництва застосовують методи скінченних елементів (МСЕ). Для коректного використання МСЕ необхідно враховувати досвід експлуатації FPSO [1, 2], визначити експлуатаційні навантаження [3, 4], врахувати вплив експлуатаційних середовищ [4–7] та кліматичних умов [3, 5, 8], зміну властивостей матеріалів під час експлуатації [4–7, 9] тощо. Вибір сталей для основних груп конструкцій є важливими етапом проектування FPSO. Один з можливих варіантів – конструкційна сталь Q420. Її використовують для виготовлення великогабаритних конструкцій, зокрема, кораблів, мостів, нафтогазовидобувних морських платформ, підйомних, гірничих машин тощо, які експлуатують в екстремальних умовах. Використання технологій мікролегуння та гарячого вальцювання забезпечує високі механічні властивості після нормалізації (чи після гартування та високого відпуску). Відповідно до стандарту сталь має п'ять рівнів якості: Q420A, Q420B, Q420C, Q420D і Q420E. Сталь Q420E

Контактна особа: Р. С. ГРАБОВСЬКИЙ, e-mail: hrabovskyy.r@gmail.com

є найкращішою з найменшими масовими частками сірки (0,02%) та фосфору (0,025%) порівняно з іншими. Експериментальне визначення стандартних механічних, а також втомних властивостей сталі Q420 за дії робочих середовищ з врахуванням температурного чинника є основним завданням цієї роботи. Отримані результати використовуватимуть під час проектування та розрахунків МСЕ конструктивних елементів FPSO.

**Матеріали та методика досліджень.** Досліджували низьколеговану високоміцну конструкційну сталь Q420B, виготовлену китайським виробником згідно з національним стандартом GB/T1591-2008 [10]. Її хімічний склад (I) наведено в табл. 1. Стандартні механічні характеристики сталі Q420B для листа завтовшки 16 mm такі [10]:  $\sigma_Y = 420$  МПа,  $\sigma_U = 520...540$  МПа,  $\varepsilon = 21\%$ .

**Таблиця 1. Порівняння хімічного складу (mass%) сталі Q420B**

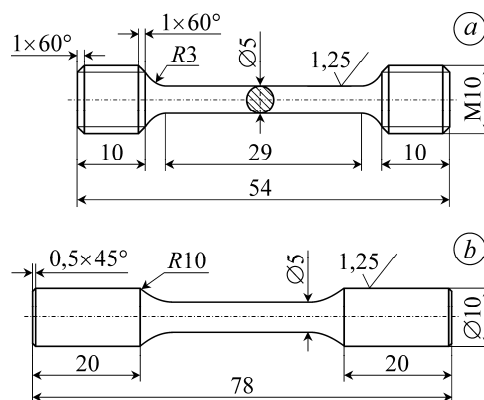
Склад	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
I	≤0,20	≤0,55	≤1,70	≤0,035	≤0,035	≤0,05	≤0,13	≤0,05	≤0,30	≤0,80	≤0,40	≤0,20	решта
II	0,09	0,190	1,08	0,017	0,020	0,04	0	0,03	0,020	0,010	0,030	0,004	решта
III	0,14	0,042	0,80	0,025	0,030	0,01	0	0,01	0,015	0,007	0,017	0	решта

Елементний аналіз сталі здійснювали рентгеноспектральним мікроаналізатором (Electron Probe Microanalyzer (EPMA)) JXA-8530F (Jeol, Japan) [11]. Обладнання дає можливість отримати точні результати, зокрема щодо вмісту легких елементів таких, як вуглець.

Всі зразки вирізали з однаковою орієнтацією стосовно мікроструктури і напруженого стану листового прокату, а саме в повздовжньому напрямку. Механічні та втомні властивості сталі досліджували за кімнатної температури та 0°C.

Рис. 1. Зразки для визначення стандартних механічних характеристик (a) та для випробувань на втому та корозійно-втомну довговічність (b).

Fig. 1. Samples for determination of standard mechanical characteristics (a), and fatigue and corrosion-fatigue durability tests (b).



Механічні характеристики сталі визначали за стандартними методиками випробувань [12, 13] пропорційних зразків круглого поперечного перерізу (рис. 1a) за їх розтягу осьовою силою на основі побудованих діаграм руйнування в координатах “напруження  $\sigma$  – деформація  $\varepsilon$ ”. Зразки розтягували на розривній машині до руйнування за швидкості переміщення рухомої траверси 2 mm/min. За допомогою персонального комп’ютера реєстрували зусилля навантаження за даними вбудованого динамометра машини, а видовження – з тензометричного екстензометра. Випробовували партію з чотирьох зразків та визначали усереднені значення границь пластичності ( $\sigma_Y$ ) та міцності ( $\sigma_U$ ) (згідно з ISO 80000-1, результати

в МРа округляли до найближчого цілого числа), а також відносе видовження ( $\epsilon$ ) після розриву (згідно з ISO 80000-1, результати наведено з похибкою до 0,5%).

Втомні та корозійно-втомні випробування здійснювали за стандартною методикою випробувань [14] циліндричних (рис. 1b) зразків. Криві втоми будували в координатах “напруження  $\sigma$ –кількість циклів до руйнування  $N$ ”. Границю витривалості визначали як максимальне напруження, за якого не відбувається втомне руйнування впродовж заданого часу (база випробувань  $10^7$  cycles), згідно з діючим стандартом [14]. Основним критерієм руйнування при визначенні границі витривалості та побудові кривих втоми є повне руйнування зразка. Зразки навантажували за схемою обертового згину з використанням симетричного циклу навантаження частотою 50 Hz. Для побудови кривої втоми і визначення границі витривалості, що відповідає ймовірності руйнування 50%, випробувували не менше 15 зразків. В інтервалі напружень 0,95...1,05 від границі витривалості, що відповідало ймовірності руйнування 50%, випробувано не менше чотирьох зразків, при цьому два з них не зруйнувались до бази випробування.

Всі зразки для випробувань вирізали безпосередньо з листа завтовшки 16 mm, що дало змогу максимально врахувати технологію виробництва, а також стан матеріалу в конструйованому елементі нафтогазовидобувної морської платформи. Для усунення слідів механічної обробки і забезпечення високої збіжності отриманих результатів робочу частину всіх зразків перед випробуваннями полірували.

Як корозивне середовище використали штучну морську воду, виготовлену згідно зі стандартом ASTM D 1141-98 [15], з таким хімічним складом (g/L):  $\text{NaHCO}_3$  – 0,201;  $\text{CaCl}_2$  – 1,158;  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 11,112;  $\text{SrCl}_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$  – 0,042;  $\text{NaCl}$  – 25,534;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 4,094;  $\text{KCl}$  – 0,695;  $\text{KBr}$  – 0,201;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 0,201;  $\text{NaF}$  – 0,201.

Під час корозійно-втомних випробувань підтримували стабільність параметрів робочого середовища та його взаємодії з поверхнею зразка. Забезпечили примусову циркуляцію штучної морської води з рН 8,26, концентрацією розчиненого кисню  $\sim 7,0$  ppm та провідністю  $59,8 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ . Контролювали температуру середовища на поверхні зразка. Для випробувань за знижених температур штучну морську воду охолоджували до  $-1^\circ\text{C}$  у холодильній камері.

**Результати та їх обговорення. Визначення хімічного складу сталі.** Хімічний склад сталі (вміст основних елементів), а також граничні значення легувальних елементів, обумовлені стандартом GB/T1591-2008 [10]. У табл. 1 порівняли хімічний склад сталі Q420B відповідно до стандарту (I) зі значеннями, наведеними у сертифікаті на продукцію (II) та визначеними ЕРМА (III).

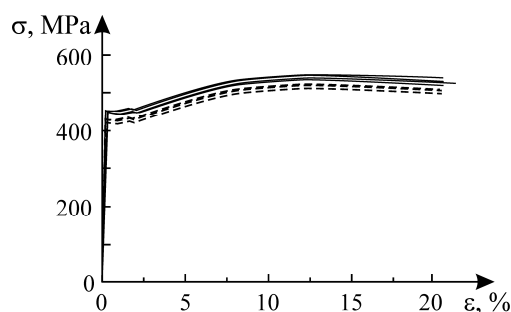
Хімічний склад сталі, а також допустимі відхилення від норми, вміст легувальних елементів, визначений ЕРМА, відповідають стандарту GB/T1591-2008 [10]. Масові частки сірки та фосфору не перевищують гранично допустимих значень.

**Визначення стандартних механічних характеристик.** За навантаження  $P$  та видовженнями робочої частини зразка  $\Delta l$  обчислювали умовні напруження  $\sigma = P/F_0$  ( $F_0$  – початкова площа поперечного перерізу стандартного пропорційного зразка) і відносе видовження  $\epsilon = \Delta l/l_0$  ( $l_0$  – початкова робоча довжина зразка) та будували (рис. 2) умовну діаграму деформування  $\sigma \sim \epsilon$  [12]. З цих діаграм за стандартною процедурою визначали (табл. 2) границі пластичності  $\sigma_U$  та міцності  $\sigma_U$ , а також відносе видовження  $\epsilon$  після розриву за кімнатної температури.

Крім цього, стандартні механічні характеристики сталі Q420B визначали [13] за температури  $0^\circ\text{C}$  (рис. 2, табл. 2). Для цього зразки витримували в холодильній камері впродовж 3 h.

Рис. 2. Діаграми деформування сталі Q420B за кімнатної температури (зразки T1–T4, штрихова лінія) та при 0°C (T5–T8, суцільна).

Fig. 2. Stress–strain curves of Q420B steel at room temperature (specimens T1–T4, dashed line) and at 0°C (T5–T8, solid line).



**Таблиця 2. Результати визначення стандартних механічних характеристик за розтягу**

Номер зразка	$\sigma_Y$	$\sigma_U$	$\epsilon$ , %
	МПа		
$t = 20^\circ\text{C}$			
T1	425	527	20,5
T2	429	532	21
T3	420	524	22
T4	418	523	21
середнє	423	527	21
$t = 0^\circ\text{C}$			
T5	439	548	21
T6	432	540	21
T7	434	543	22
T8	433	544	21
середнє	435	544	21

Аналіз результатів досліджень за кімнатної температури та при 0°C показує, що відхилення від середнього значення границь пластичності ( $\sigma_Y$ ) та міцності ( $\sigma_U$ ), а також відносного видовження ( $\epsilon$ ) після розриву становило < 5%, що свідчить про однорідність сталі та стабільність її механічних характеристик. Умовні діаграми деформування сталі мають класичний вигляд, притаманний пружно-пластичним матеріалам. Чітко виділені ділянки пружного деформування, плинності, тимчасового зміцнення та руйнування. Проте ділянки плинності зразків коротші, ніж у звичайної вуглецевої сталі. Зі зниженням температури з 20 до 0°C середнє значення границь пластичності та міцності зростає відповідно на 11 МПа (2,6%) та 17 МПа (3,2%), що свідчить про підвищення міцнісних характеристик. Водночас відносне видовження зразків залишилось незмінним. Тут слід зазначити, що, згідно з ISO 80000-1, результати наведено з похибкою до 0,5%.

Загалом стандартні механічні характеристики сталі Q420B, визначені експериментально, відповідають стандарту GB/T1591-2008 [10] та узгоджуються зі значеннями, наведеними у сертифікаті на продукцію ( $\sigma_Y = 420$  МПа,  $\sigma_U = 525$  МПа,  $\epsilon = 21\%$ ) для листа завтовшки 16 mm (характеристики матеріалу визначали на зразках, вирізаних у повздовжньому напрямку листового прокату).

**Втомні та корозійно-втомні випробування.** Визначали границю витривалості та будували [14] криві втоми  $\sigma \sim N$  у повітрі за кімнатної температури та середовищі штучної морської води за кімнатної температури та при  $0^\circ\text{C}$ . Результати випробувань наведено в табл. 3 та рис. 3.

**Таблиця 3. Результати втомних та корозійно-втомних випробувань**

Середовище	База випробувань, cycles	Границя витривалості, МПа
Повітря ( $t = 20^\circ\text{C}$ )	$10^7$ (рис. 3, лінія I)	228 (рис. 3, зона A)
Штучна морська вода ( $t = 20^\circ\text{C}$ )	$5 \cdot 10^7$ (рис. 3, лінія II)	181 (рис. 3, зона B)
Штучна морська вода ( $t = 0^\circ\text{C}$ )	$5 \cdot 10^7$ (рис. 3, лінія II)	186 (рис. 3, зона C)

Встановлено, що у діапазоні прикладених навантажень опір корозійно-втомному руйнуванню сталі Q420B у середовищі штучної морської води порівняно з повітрям (табл. 3, рис. 3) знижується. У штучній морській воді зі зменшенням температури границя витривалості зростає  $\sim$  на 2,7% і становить відповідно 181 МПа при  $t = 20^\circ\text{C}$  та 186 МПа при  $t = 0^\circ\text{C}$ .

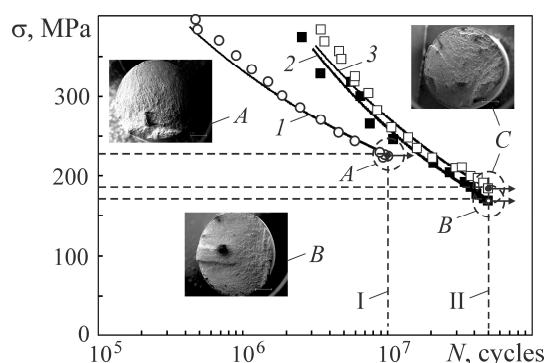


Рис. 3. Крива втоми сталі Q420B у повітрі (I) та штучній морській воді за  $t = 20^\circ\text{C}$  (2) та  $0^\circ\text{C}$  (3).

Fig. 3. S-N curve of Q420B steel in air (I), and artificial seawater at  $t = 20^\circ\text{C}$  (2) and  $0^\circ\text{C}$  (3).

Особливість руйнування зразків за випробувань обертовим згином полягає у постійному контакті спряжених поверхонь зламів зразків, які формуються внаслідок росту втомної тріщини, яка зароджується на бічній поверхні за дії циклічних знакозмінних навантажень. Тому злами порівнювали за різних, але якомога нижчих максимальних напружень, щоб мінімізувати наслідки такого контактування на завершальному етапі руйнування. Результати показали (рис. 3), що втомне руйнування зразка типово і поверхню руйнування можна розділити на області: зародження тріщини, поширення та перехідну область руйнування.

### ВИСНОВКИ

Наведено результати виконання комплексу експериментальних випробувань зразків зі сталі Q420 з рівнем якості Q420B. Показано, що хімічний склад сталі, а також його допустимі відхилення від норм, вміст легувальних елементів, визначені рентгеноспектральним мікроаналізатором, відповідають стандарту. Масові частки сірки та фосфору не перевищують гранично допустимих значень. Стандартні механічні характеристики сталі, визначені експериментально, відповідають стандарту та узгоджуються зі значеннями, наведеними у сертифікаті на продукцію для листа завтовшки 16 mm (характеристики матеріалу визначали на зразках, вирізаних у повздовжньому напрямку листового прокату). Проаналізовано результати втомних та корозійно-втомні випробувань сталі. Побудовано криві втоми у повітрі та штучній морській воді, а також визначено відповідні значення

границі витривалості за кімнатної температури та при 0°C. Виявлений суттєвий вплив корозивного середовища на швидкість поширення втомних тріщин у сталі.

1. *Review on fixed and floating offshore structures. Part I: Types of platforms with some applications* / C. V. Amaechi, A. Reda, H. O. Butler, I. A. Ja'e, and C. An // *J. of Marine Sci. and Eng.* – 2022. – **10**, № 8. – Article number: 1074. DOI: 10.3390/jmse10081074.
2. *Review on fixed and floating offshore structures. Part II: Sustainable design approaches and project management* / C. V. Amaechi, A. Reda, H. O. Butler, I. A. Ja'e, and C. An // *J. of Marine Sci. and Eng.* – 2022. – **10**, № 7. – Article number: 973. DOI: 10.3390/jmse10070973.
3. *Cruz A. M. and Krausmann E. Vulnerability of the oil and gas sector to climate change and extreme weather events* // *Climatic Change.* – 2013. – **121**, № 1. – P. 41–53. DOI: 10.1007/s10584-013-0891-4.
4. *Evans C., Leiva-Garcia R., and Akid R. Strain evolution around corrosion pits under fatigue loading* // *Theoretical and Appl. Fract. Mech.* – 2018. – **95**. – P. 253–260. DOI: 10.1016/j.tafmec.2018.02.015.
5. *Abbas M. and Shafiee M. An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme offshore environments* // *Offshore Struct.* – 2020. – **71**. – Article number: 102718. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102718.
6. *Dmytrakh I. M., Akid R., and Miller K. J. Electrochemistry of deformed smooth surfaces and short corrosion fatigue crack growth behaviour* // *British Corr. J.* – 1997. – **32**, № 2. – P. 138–144. DOI: 10.1179/bcj.1997.32.2.138.
7. *Syrotyuk A. M. and Dmytrakh I. M. Methods for the evaluation of fracture and strength of pipeline steels and structures under the action of working media. Part I. Influence of the corrosion factor* // *Materials Science.* – 2014. – **50**, № 3. – P. 324–339. DOI: 10.1007/s11003-014-9724-5.
8. *Climate change impacts on coastal and offshore petroleum infrastructure and the associated oil spill risk: A review* / J. Dong, Z. Asif, Y. Shi, Y. Zhu, and Z. Chen // *J. of Offshore Sci. and Eng.* – 2022. – **10**, № 7. – Article number: 849. DOI: 10.3390/jmse10070849.
9. *A method for the assessment of the serviceability and fracture hazard for structural elements with cracklike defects* / V. V. Panasyuk, I. M. Dmytrakh, L. Toth, O. L. Bilyi, and A. M. Syrotyuk // *Materials Science.* – 2014. – **49**, № 5. – P. 565–576. DOI: 10.1007/s11003-014-9650-6
10. *GB/T1591–2018. National standard of the People's republic of China. ICS 77.140.01 / H 40: High strength Low alloy structural steels.* – Beijing: China Standard Press., 2018. – 30 p. (in Chinese)
11. *Instructions. JXA-8530FPlus Field Emission Electron Probe Microanalyzer (FE-EPMA). Operation Guide.* – Akishima: Jeol, 2021. – 160 p.
12. *ДСТУ ISO 6892–1:2019. Інформація та документація. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT).* Чинний від 2020-07-01. Вид. офіц. – К.: УкрНДНЦ, 2019. – 16 с.
13. *ДСТУ 7305:2013. Метали. Метод випробування на розтяг металів і сплавів за низьких та криогенних температур.* Чинний від 2013-10-14. Вид. офіц. – К.: Мінекономрозвитку, 2013. – 18 с.
14. *ГОСТ 25.502–79. Розрахунки і випробування на міцність в машинобудуванні. Методи механічних випробувань металів. Методи випробувань на втому.* Чинний від 2020-07-01. Вид. офіц. – К.: УкрНДНЦ, 2019. – 16 с.
15. *ASTM D1141–98. Standard Practice for Preparation of Substitute Ocean Water.* – 2021. – 3 p. Available online: <https://www.astm.org/d1141-98r21.html> (accessed on 25 September 2022).

Одержано 09.01.2023