

**О. Радкевич**

Канд. техн. наук

**Г. Чумало**

Канд. техн. наук

**Р. Юркевич**

Інженер

**І. Домінюк**

Інженер

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

УДК: 620.194

## **ВПЛИВ ЦИКЛІЧНИХ ТА СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У СІРКОВОДНЕВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

*Досліджено конструкційні сталі, які найчастіше застосовують для нафтогазового обладнання — сталь 20 і 30ХМА за дії статичних і циклічних навантажень на повітрі й у стандартному сірководневому розчині НАСЕ. Показано, що сталі з вищою опірністю СКРН мають вищу трициностійкість як у повітрі, так і в сірководневому розчині НАСЕ. Встановлено, що при знакозмінних навантаженнях час до руйнування зразків усіх досліджених сталей зменшується у 8 — 10 разів порівняно з випробуваннями при статичних навантаженнях.*

**сталь, сірководень, циклічне навантаження, статичне навантаження**

Сучасний етап розроблення нафтових і газових родовищ супроводжується зростаючою кількістю технічних (високі тиски, температура, агресивні пластові води, глибокі, в тому числі похилі та горизонтальні свердловини), екологічних та економічних проблем. Окрім дії розтягуючих статичних навантажень (наприклад, у бурильних трубах та елементах їхніх з'єднань, насосних штангах) конструкції, зокрема гідротехнічні споруди, зазнають впливу циклічних навантажень. Велика увага приділяється попередженню корозійної втоми, перш за все бурових і стаціонарних платформ для видобутку нафти і газу, оскільки саме вони зазнають циклічних навантажень від удару хвиль, вібрації механізмів, дії вітру. Вібрації механізмів спричиняють багатоциклову, а удари хвиль і дія вітру — малоциклову втому [1, 2]. Штангове свердловинне насосне устаткування (ШСНУ) працює в умовах дії змінних напружень і корозійно-агресивного середовища, що містить мінералізовану воду, у складі якої часто є сірководень, вуглекислий газ, кисень та інші агресивні гази. Зазначимо, що колона насосних штанг поруч з

осьовими пульсуючими навантаженнями одного знака, що діють за асиметричним циклом, зазнає знакозмінного циклічного навантаження, зумовленого поздовжнім згином, що відбувається в результаті втрати стійкості.

Усе це гостро ставить питання про потребу в забезпеченні якості обладнання як на стадії виготовлення, так і в процесі його експлуатації в умовах дії статичних, циклічних та спільної дії статичних і циклічних навантажень.

**Матеріали та методи досліджень.** Оскільки умови експлуатації ШСНУ є найжорсткішими, ми вибрали для досліджень працездатність конструкційних сталей за статичних, циклічних та спільній дії цих навантажень як на повітрі, так і у стандартному сірководневому розчині НАСЕ (5 % водний розчин NaCl + 0,5 % CH<sub>3</sub>COOH, насичений H<sub>2</sub>S; рН~4; 20 °С).

Досліджували сталі 20 і 30ХМА, які широко використовують для виготовлення обладнання нафтогазовидобувної промисловості. Зазначимо, що для згаданого обладнання використовують вуглецеві та низьколеговані сталі, а також сталі інших класів та сплави. Сталь 30ХМА

пройшла спеціально підібране нами термічне оброблення (гартування від 890 °С + подвійний відпуск), що забезпечило її високу опірність сірководневому корозійному розтріскуванню під напруженням (СКРН).

Схильність сталей до СКРН визначали на зразках діаметром 6,4 мм, навантажених осьовим статичним розтягом на установках важільного типу. Опірність СКРН оцінювали за відношенням порогових напружень до мінімально допустимої межі текучості сталі чи сплаву (відносна опірність до СКРН). Здатність сталей та сплавів чинити опір поширенню тріщини під час довготривалої експлуатації визначали на прямокутних зразках — балках з наведеними втомними тріщинами. Зразки навантажували консольним згином на установках ДПП-1. Коефіцієнт інтенсивності напружень розраховували за формулою

$$K_{10} = \frac{6M\sqrt{a}}{b^2t} \left[ A_0 + A_1 \left( \frac{a}{b} \right) + A_2 \left( \frac{a}{b} \right)^2 + A_3 \left( \frac{a}{b} \right)^3 + A_4 \left( \frac{a}{b} \right)^4 \right],$$

де  $M$  — згинальний момент у надрізі;  $b$  — висота зразка (20 мм);  $t$  — ширина зразка (10 мм);  $a$  — глибина надрізу і втомної тріщини (10 мм);  $A$  — коефіцієнти, що входять у багаточлен четвертого степеня.

Тріщиностійкість сталей під циклічним навантаженням оцінювали за швидкістю поширення тріщин у повітрі  $V_{air}$  та корозійному середовищі  $V_{sc}$ . Досліджували плоскі зразки розміром 150×15×2,5 мм з V-подібним надрізом глибиною 1,5 мм, кутом розкриття 60°. Схема навантаження зразків — чистий віднульовий згин (коефіцієнт асиметрії  $R=0$ ), частота навантаження 5 Гц. Коефіцієнт інтенсивності напружень при чистому згині

$$K_I = \left( \frac{6M}{b\sqrt{h^3}} \right) \sqrt{\epsilon F(\epsilon)}. \quad (2)$$

При  $0 \leq \epsilon \leq 0,6$

$$F(\epsilon) = 1,99 - 2,47\epsilon + 12,97\epsilon^2 - 23,17\epsilon^3 + 24,80\epsilon^4. \quad (3.1)$$

При  $0,6 \leq \epsilon \leq 0,8$

$$F(\epsilon) = \frac{0,6651}{\sqrt{\epsilon(1-\epsilon)^3}}. \quad (3.2)$$

Тут  $M$  — згинальний момент в ослабленому перерізі;  $b$  — товщина зразка (2,5 мм);  $h$  — висота зразка (15 мм),  $l$  — довжина тріщини, мм;  $\epsilon = l/h$ .

Інтервал  $0,6 < \epsilon \leq 0,8$  можна розширити до  $0,6 < \epsilon \leq 0,95$ . При цьому похибка в оцінці  $K_I$  не перевищуватиме 5 %.

Досліди проведено на установці УВРТ за однакового рівня деформації зразків. Коефіцієнт інтенсивності напружень становив  $\sim 8,3 \text{ МПа} \sqrt{\text{мм}}$  в інтервалі  $(0,25 \dots 0,7) l/h$ . Отримані залежності  $l = F(N)$  довжини тріщини  $l$  від кількості циклів навантаження  $N$  (рис. 1) мають виразні прямолінійні ділянки, для яких коефіцієнт інтенсивності напружень  $\epsilon$  сталим.

У сірководневому середовищі інкубаційний період практично відсутній, прямолінійна ділянка на кривій

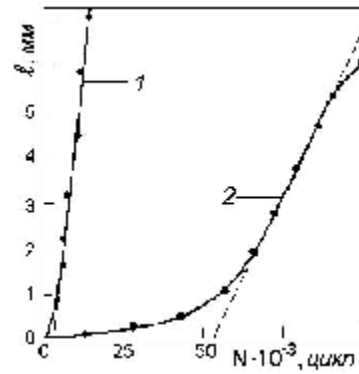


Рис. 1. Типові криві росту втомної тріщини у вуглецевій сталі: 1 — сірководневе середовище NACE; 2 — повітря

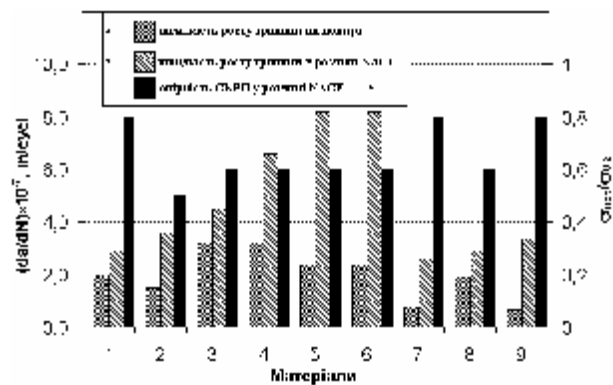


Рис. 2. Швидкість росту тріщини при циклічних навантаженнях (5 Гц,  $R=0$ ) та опірність СКРН конструкційних матеріалів: 1 — 12X18H10T; 2 — 15X12H2MBФБА; 3 — 15X16H2M; 4 — 09Г2СФ; 5 — 12X13; 6 — 17Г1С; 7 — 30ХМА; 8 — Ст20; 9 — 12X21H5T

росту тріщини більша, ніж у повітрі. За нахилом прямолінійних ділянок визначали швидкість росту тріщин.

Спільну дію статичних та циклічних навантажень досліджува на модернізованій установці УП-6 з програмним забезпеченням, що дало можливість встановлювати мінімальні й максимальні рівні навантаження та частоту циклу. Швидкість навантаження — розвантаження становила  $10^{-5} \text{ сек}^{-1}$ , а тривалість циклу — 20 хв. Параметри та форма циклів показані на рис. 4, а, с.

Твердість досліджених матеріалів визначали за Роквеллом (HRC та HRB для сталі 12X18H10T).

**Результати досліджень та їх обговорення.** Результати досліджень працездатності конструкційних сталей за статичних і циклічних навантажень як на повітрі, так і в стандартному сірководневому розчині NACE подані на рис. 2.

Як бачимо, сірководневе середовище пришвидшує ріст тріщини в усіх сталях. Найвідчутніший вплив цього середовища спостерігається на сталях 12X13 та 17Г1С: швидкість поширення тріщини в цих матеріалах зростає у 3,7 рази. Натомість, високу опірність поширенню тріщини при циклічному навантаженні показали сталі 30ХМА, 12X18H10T та сталь 20.

Загальноприйнятим критерієм опірності сталей СКРН є порогове ( $\sigma_{пор.}$ ) напруження, визначене у стандартному

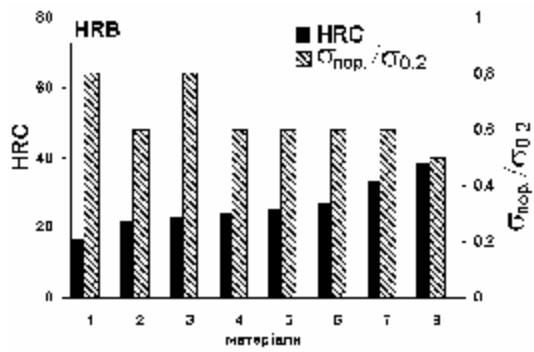


Рис. 3. Опірність СКРН та твердість сталей різного класу: 1 — 12X18H10T; 2 — Ст20; 3 — 30XMA; 4 — 09Г2СФ; 5 — 17Г1С; 6 — 12X13; 7 — 15X16H2M; 8 — 15X12H2MBФБА

сірководневому розчині NACE на базі 720 год. Сталь вважається придатною до використання в сірководневому середовищі, якщо  $\sigma_{нор.} \geq 0,8\sigma_{0.2}$ . Встановлено, що сталі 30XMA, 12X18H10T, 12X21H5T мають найвищу опірність СКРН ( $\sigma_{нор.}/\sigma_{0.2}=0,8$ ), а 15X12H2MBФБА — найнижчу ( $\sigma_{нор.}/\sigma_{0.2}=0,5$ ). Окрім цього, ми виявили таку залежність: сталі з вищою опірністю СКРН мають вищу тріщиностійкість як у повітрі, так і в сірководневому розчині NACE.

За стандартом NACE MR9175-96 [3] для роботи у сірководневих середовищах придатні пластичні сталі з  $HRC \leq 22$ . Для високоміцних сталей допускається HRC 21...26. Перевищення цих показників призводить до зниження опірності СКРН. Ці величини встановлені на основі практичного досвіду і стосуються трубних сталей. Для отримання повнішої інформації встановлено кореляцію між твердістю та опірністю СКРН для сталей різного класу (рис. 3).

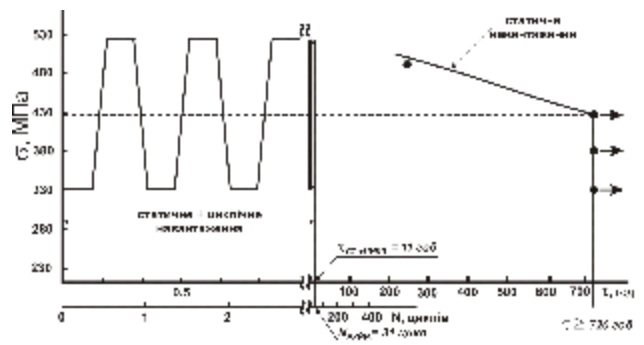
Таким чином, підтверджено на сталях різного класу тенденцію до зниження опірності СКРН при зростанні твердості матеріалу.

Нафтогазовидобувне обладнання, в тому числі й гідротехнічні споруди, в процесі експлуатації зазнають спільного впливу статичних і циклічних навантажень (наприклад, циклічним і розтягучим навантаженням піддаються бурильні труби та елементи їхніх з'єднань, насосні штанги, а також зварні конструкції бурових платформ на морському шельфі). Тому ми розробили методику, за якою можна досліджувати спільну дію статичних та циклічних навантажень на працездатність конструкційних матеріалів.

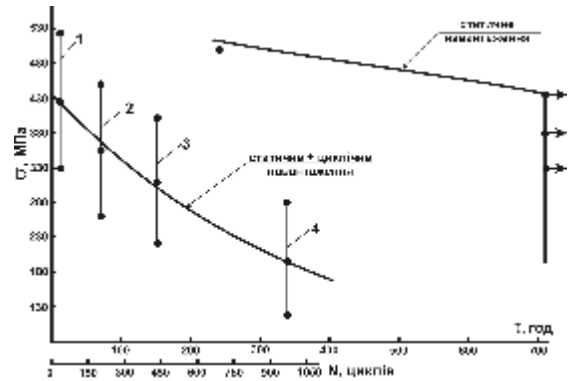
Результати досліджень, а також параметри та форма циклу наведені нижче (рис. 4).

У стандартному сірководневому розчині NACE визначено довготривалу корозійну міцність сталі 30XMA та сталі 20 (статичні навантаження, база випробувань — 720 год),  $\sigma_{нор.}$  становить відповідно 440 МПа ( $0,8\sigma_{0.2}$ ) та 174 ( $0,6\sigma_{0.2}$ ) МПа.

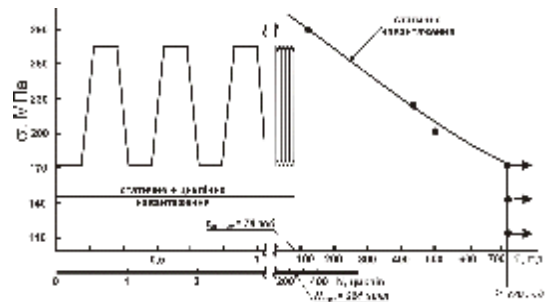
Параметри циклічних навантажень встановлювали, виходячи з межі текучості для кожної сталі (див. рис. 4). Сталь 30XMA:  $\sigma_{0.2} = 550$  МПа; амплітуда циклу  $\sigma_a = 95$  МПа; середні напруження з кожним експериментом зменшувались,  $\sigma_{cp}$ : 1 — 427,5 МПа; 2 — 355 МПа; 3 —



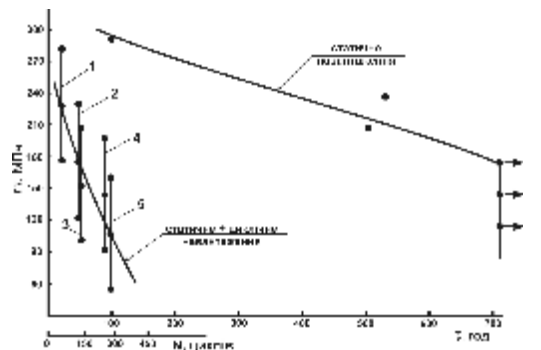
a)



b)



c)



d)

Рис. 4. Опірність руйнуванню сталі 30XMA (a,b) та сталі 20 (c, d) у стандартному сірководневому розчині NACE (5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH, насичення H<sub>2</sub>S, pH 3...4, 20 ± 2°C) при статичному навантаженні та сумарній дії статичних та циклічних навантажень

316 МПа; 4 — 200,5 МПа. Відповідно зменшувався коефіцієнт асиметрії  $R$ : 1 — 0,63; 2 — 0,58; 3 — 0,53; 4 — 0,43. Сталь 20:  $\sigma_{0,2}=290$  МПа; амплітуда циклу  $\sigma_a=54$  МПа; середні напруження  $\sigma_{cp}$ : 1 — 229 МПа; 2 — 175 МПа; 3 — 153 МПа; 4 — 145 МПа; 5 — 108 МПа. Відповідно коефіцієнт асиметрії  $R$  становив: 1 — 0,62; 2 — 0,53; 3 — 0,48; 4 — 0,46; 5 — 0,33.

При циклічних навантаженнях час до руйнування зменшився у 8 — 10 разів порівняно з випробуваннями при статичних навантаженнях. Спостерігається тенденція до зменшення часу до руйнування при збільшенні асиметрії циклу.

**Висновки.** 1. Підтверджено на сталях різного класу тенденцію до зниження опірності сірководневому корозійному розтріскуванню при напруженні (СКРН) зі зростанням твердості.

2. Показано, що сталі з вищою опірністю СКРН мають вищу тріщиностійкість як у повітрі, так і в сірководневому розчині NACE.

3. Встановлено, що при циклічних навантаженнях час до руйнування зразків усіх досліджених сталей зменшується у 8 — 10 разів порівняно з випробуваннями при статичних навантаженнях;

4. Зі збільшенням асиметрії циклів навантаження руйнування сталей у сірководневому середовищі пришвидшується.

## Література

1. *Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідн. посібник*, т. 10 / Під заг. ред. В.В. Панасюка. — К.: Наук. думка, 1988. — 1194 с.

2. *Романив О.Н., Никифорчин Г.Н.* Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 294 с.

3. NACE Standard MR-0175-96. Standard Material Requirements Sulfide Stress Cracking Resistance Metallic Materials for Oilfield Equipment. — Houston, Tx.: National Association of Corrosion Engineers (NACE). — 1996. — 30 p.

Отримана 22.10.08

*O. Radkevych, H. Chumalo, R. Jurkevych, I. Dominuk*  
**Influence of cyclic and static loading on structural materials serviceability in hydrogen sulfide environments**  
*Karpenko Physiko-mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv*

*The structural 20 steel and 30 XMA steel ( that are most useful for gas-oil equipment) under static and cyclic loading in the air and standard hydrogen sulfide NACE solution have been studied. It has been shown that steels with higher resistance to sulfide stress corrosion cracking (SSCC) have higher crack growth resistance. It has been established that time to failure of specimens under sign-changing loading decrease in 8-10 times in comparison with such under static loading.*

21 01 01 00 3 3

## NONLINEAR NORMAL MODES, DIMENSION REDUCTION AND LOCALIZATION IN VIBRATING SYSTEMS

27 September 2009 - 2 October 2009  
Frascati (Rome), Italy

### Information:

The Colloquium aims at presenting the latest developments in the areas of Nonlinear Normal Modes, Dimension Reduction and Localization, and their applications in vibrating systems. Nonlinear Normal Modes (NNMs) is a classical topic which is presently given a more modern interpretation mostly as regards their formulation for continuous or discontinuous systems, strongly nonlinear regimes, and discretized structures, as well as their use in various applications. They are also of major interest in the framework of Dimension Reduction of dynamical systems, an area where various methods are being formulated and compared with each other, along with the reduced order models – developed for different purposes/systems – based on just nonlinear (vs linear) normal modes or proper orthogonal modes or multi-modes ensuing from nonlinear finite element analyses. In turn, Localization is one major topic (to be possibly addressed via NNMs) in wave propagation and targeted energy transfer. In this context, there is special interest towards analyzing possible occurrence in mechanics of such dynamic phenomena as the discrete breathers highlighted in applied mathematics and physics, where they are paradigmatic solutions in periodic lattices. Cross-fertilization among such companion areas could allow to exploit results useful to describe analogous phenomena likely to occur in engineered materials and devices, with nontrivial effects in terms of efficient/robust energy focusing/transfer, and material/system design.

**Contact:** Prof. Giuseppe Rega

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

Universita' di Roma La Sapienza

Via A. Gramsci 53

00197 Roma, Italy

Ph: +39-06-49919195; Fax: +39-06-49919192 or +39-06-3221449

e-mail: [Giuseppe.Reg@uniroma1.it](mailto:Giuseppe.Reg@uniroma1.it)