

УДК 620.193

## КОРОЗИЙНО-ВТОМНА ВИТРИВАЛІСТЬ СТАЛІ 35 У ВОДОГІННІЙ ВОДІ ЗА ДОДАТКОВОГО КАВІТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О. Т. ЦИРУЛЬНИК, О. І. ЗВІРКО, В. А. ВОЛОШИН

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

Встановлено основні чинники зниження корозійно-втомної витривалості вуглецевої сталі за кавітаційного, циклічного навантажень та їх сумісної дії. Попередня кавітація поверхні неоднозначно впливає на втомну витривалість сталі через переважальний вплив одного з двох чинників: деформаційного зміцнення та розвитку пошкоджень на кавітованій поверхні. Сумісна дія кавітаційного та циклічного навантажень зменшує умовну границю корозійної втоми сталі у 2,4 рази, а обмежену довговічність для близьких до границі втоми навантажень – на порядок. Електрохімічними дослідженнями показано, що отримані ефекти зумовлені посиленням впливу корозійного чинника.

**Ключові слова:** *вуглецева сталь, корозійна втома, кавітація, мікротвердість, електрохімічні властивості.*

The main factors reducing corrosion fatigue durability of carbon steel under cavitation, cyclic loading and their combined action have been established. Preliminary cavitation of the surface ambiguously affects the fatigue durability of steel due to the predominant influence of one of two factors: deformation hardening and the development of damages on the cavitated surface. The combined effect of cavitation and cyclic loading reduces the corrosion fatigue limit of the steel in 2.4 times, and the limited durability for loads close to the fatigue limit – by an order of magnitude. Electrochemical studies have shown that the obtained effects are caused by intensification of corrosion factor.

**Keywords:** *carbon steel, corrosion fatigue, cavitation, microhardness, electrochemical properties.*

**Вступ.** Трубопроводи та обладнання, яке працює в умовах швидкісного потоку рідини (гідродвигуни, лопаті гідравлічних турбін і pomp тощо), часто виходять з ладу через кавітаційне та корозійно-втомне руйнування [1, 2]. Ці процеси значною мірою взаємопов'язані, оскільки кавітація спричиняє вібрації і, зрештою, втомне руйнування, а корозійний чинник зазвичай інтенсифікує руйнування сталей за дії кавітаційного та циклічного навантажень. Відомо, що кавітаційну обробку металевих поверхонь завдяки ініціюванню стискальних залишкових напружень можна застосовувати для підвищення втомної витривалості деталей та елементів конструкцій [3], а також як метод поверхневої наноструктуризації [4]. Водночас кавітація руйнує поверхневі плівки на сталях, сформовані внаслідок корозійних процесів [5], і може суттєво пришвидшити загальну або локальну корозію [6, 7], а також спричинити зниження корозійно-втомної витривалості [8]. Кавітаційні виразки, які утворюються за вібраційних випроб, сягають кількох мікрометрів [5, 9, 10] та є співмірні з діаметром кавітаційних мікроструменів, а розмір і форма виразок, сформованих мікропластичною деформацією, залежить від інтенсивності кавітаційної дії та властивостей матеріалу [6]. Зокрема, у сталях перлітного класу кавітаційне руйнування виникає у фериті та межах зерен через майже удвічі нижчу твердість фериту порівняно з перлітом [7].

*Контактна особа:* В. А. ВОЛОШИН, e-mail: vitavol@i.ua

Мета роботи – проаналізувати деформаційні та електрохімічні процеси у поверхневих шарах металу, спричинених кавітаційним навантаженням, та їх вплив на втомну та корозійно-втомну витривалість вуглецевої сталі як за сумісної дії кавітації з циклічним навантаженням, так і за попередньої її дії.

**Об’єкт та методи випробувань.** Досліджували метал труби міського водогону, виготовленої зі сталі 35 перлітного класу. Сумісне циклічне з кавітаційним навантаження здійснювали на спеціальній установці, у якій поєднується пристрій для циклічного навантаження з діапазоном частот від 3 до 10 Hz та магнетострикційний вібратор з нижнім розміщенням зразка у герметичній електрохімічній комірці. Кавітаційне навантаження (частота 22 kHz, амплітуда кавітації  $A = 45 \mu\text{m}$ ) прикладали до зразка з боку його плоскої поверхні, протилежної від концентратора (рис. 1). За асиметрії циклічного навантаження  $R = 0$  зразок піддавали консольному згину, навантажуючи розтягом з боку гладкої поверхні, а стиском – зі сторони концентратора. Створений концентратор напружень (у стискальній зоні зразка) не впливав на напружений стан на плоскій поверхні, однак локалізував руйнування в мінімальному перерізі.

Рис. 1. Схема зразка для випроб за сумісної дії циклічного та кавітаційного навантажень.

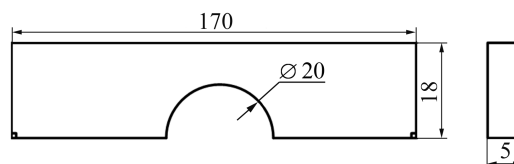


Fig. 1. Scheme of a specimen for tests under combined action of cyclic loading and cavitation.

Середовищем, де здійснювали кавітаційне та циклічне навантаження зразка, слугувала водогінна вода середньої твердості (рН 6,3...6,8, твердість 3,8...4,1 mg-ekv/l).

Вплив попередньої дії кавітації (частота 22 kHz, амплітуда кавітації  $A = 10$  та  $45 \mu\text{m}$ ) вивчали, піддаючи зразки перед випробами на втому кавітаційному навантаженню за тією ж схемою нижнього розміщення зразка, що і за сумісних втомно-кавітаційних випроб. Експериментували після таких періодів  $\tau$  кавітаційного впливу водогінної води: 60 min (початковий період) та 180 min (коли вже виявили корозійні втрати металу, тобто спостерігали типово корозійно-кавітаційне руйнування). Втомні випроби реалізували за тією ж схемою, навантажуючи зразок циклічно консольним згином з нульовою асиметрією циклу ( $R = 0$ ) за частоти навантаження 10 Hz у повітрі та 3 Hz у середовищі. Будували криві втомної витривалості “напруження  $\sigma$ –кількість циклів до руйнування  $N$ ”.

Характер деформаційних змін на поверхні сталі внаслідок кавітаційного впливу визначали за зміною мікротвердості окремих структурних складових феритно-перлітної структури сталі 35 з використанням мікротвердоміра ПМТ-3.

Електрохімічні вимірювання, в т.ч. і під час кавітації, реалізували на потенціостаті ІРС-Про методом потенціодинамічної поляризації з використанням насиченого хлоридсрібного електрода порівняння. За результатами випроб визначали базові електрохімічні характеристики сталі – потенціал  $E_{\text{соп}}$  та густину струму корозії  $i_{\text{соп}}$ .

**Результати та їх обговорення. Втомна витривалість після попереднього кавітаційного навантаження.** Виявлено неоднозначну залежність втомної витривалості сталі 35 від тривалості  $\tau$  попереднього кавітаційного навантаження у водогінній воді за амплітуди  $A = 45 \mu\text{m}$  (рис. 2): після 60 min кавітації вона дещо підвищується (крива 2), а після 180 min – знижується (крива 3). Оскільки  $\tau = 60$  min відповідає початковій стадії кавітаційного руйнування, то вважали, що мікрорельєф поверхні суттєво не змінився, і отриманий ефект пов’язали з деформаційним зміцненням поверхневого шару.

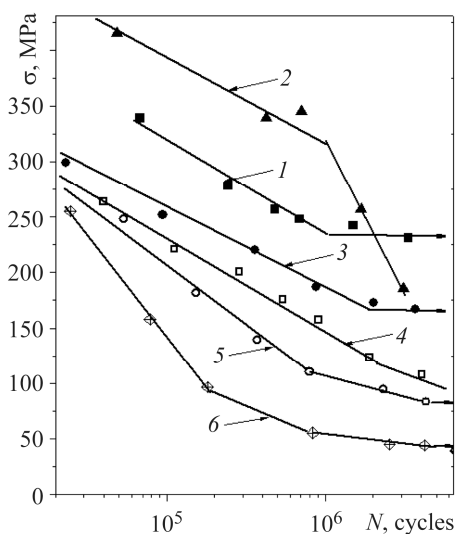


Рис. 2. Криві втомної витривалості сталі 35 за навантаження у повітрі (1–3) та водогінній воді (4–6): 1, 4 – без кавітаційного впливу; 2 – після кавітаційного впливу 60 min; 3, 5 – 180 min; 6 – під час кавітації (амплітуда  $A = 45 \mu\text{m}$ ).

Рис. 2. Fatigue life curves of the 35 steel under loading in air (1–3) and tap water (4–6): 1, 4 – without cavitation; 2 – after cavitation for 60 min; 3, 5 – 180 min; 6 – during cavitation (amplitude  $A = 45 \mu\text{m}$ ).

Це підтверджують результати вимірювання мікротвердості  $H_{\mu}$  окремих структурних складників під час попередньої кавітації. Для перліту характерна незмінна тенденція до зменшення впродовж кавітаційного навантаження –  $H_{\mu}$  знижується від 2,9 до 1,8 GPa. Водночас ферит спочатку зміцнюється, сягаючи максимуму мікротвердості ( $H_{\mu} = 1,76$  GPa) при  $\tau = 60$  min, а потім зменшується, досягаючи при  $\tau = 180$  min початкового значення  $H_{\mu} = 1,35$  GPa. Це зумовлено циклічно-ударним навантаженням на поверхневий шар металу за дії кавітації і цей механічний чинник зумовлює пластичне деформування металу, яке спричиняє зміцнення поверхневого шару [3, 11]. Рентгеноструктурним аналізом показано, що пластична деформація під дією кавітації в сталях може поширюватись на глибину 100...300  $\mu\text{m}$  і більше [12].

Отже, підвищення втомної витривалості після попереднього кавітаційного навантаження впродовж 60 min пов'язали зі зміцненням фериту. Водночас зниження опору після попереднього кавітаційного навантаження тривалістю 180 min – зі зменшенням обох структурних складників, а особливо перліту аж до можливого утворення поверхневих мікротріщин, що скорочує стадію зародження втомної макротріщини під час подальшого циклічного навантаження.

**Корозійно-втомна витривалість після попереднього кавітаційного навантаження.** Водогінна вода значно знизилла втомну витривалість сталі 35 (рис. 2, крива 4), а попередня кавітація у ній впродовж 180 min додатково послабила опір сталі корозійній втомі, і тим сильніше, що нижче напруження  $\sigma$  циклічного навантаження (крива 5). Найімовірніше, це пов'язано із тим, що після попередньої дії кавітаційного навантаження на поверхні вже існують тріщиновидні мікродфекти, оскільки у загальній втомній довговічності частка стадії зародження тріщини зростає зі зниженням циклічного напруження  $\sigma$ . Багато дослідників розглядає кавітаційне руйнування сталей здебільшого саме як зародження та ріст коротких тріщин на кавітованій поверхні, яка зазнає циклічно-ударного навантаження, що підтверджується металографічним та фрактографічним аналізом [9, 10, 13], а також виявленими кореляційними залежностями між параметрами кавітаційного та втомного руйнування [8, 14].

**Корозійно-втомна витривалість за сумісної дії кавітації і циклічного навантаження.** За цих умов суттєво посилюється корозійний вплив водогінної води на характеристики опору сталі втомному руйнуванню. Зокрема, границя коро-

зійної втоми знизилась удвічі (рис. 2, криві 4, 6), а обмежена довговічність для порогової області навантажень – на порядок.

Зниження опору корозійній втомі сталі 35 внаслідок кавітації супроводжується помітною зміною її електрохімічної поведінки, яка проявляється, насамперед, у підвищенні інтенсивності корозії та зміні потенціалу корозії кавітованої поверхні (рис. 3): різке зміщення в бік позитивніших значень за низької амплітуди кавітації ( $A = 10 \mu\text{m}$ ) та незначне – за високої ( $A = 45 \mu\text{m}$ ).

За низької амплітуди ( $A = 10 \mu\text{m}$ ) кавітації переважає внесок зміни дифузійних обмежень корозійного процесу через інтенсивне перемішування середовища, внаслідок чого потенціал зміщується у бік позитивніших значень, подібно до результатів дослідження дискового електрода зі сталі 35: зі збільшенням швидкості обертання (до  $100 \text{ s}^{-1}$ ) потенціал корозії  $E_{\text{кор}}$  зміщується у бік позитивніших значень (від  $-0,44$  до  $-0,34 \text{ V}$ ), а густина струму корозії  $i_{\text{кор}}$  збільшується від  $3,5$  до  $5,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Однак кавітаційне навантаження навіть за  $A = 10 \mu\text{m}$  переважає вплив тільки перемішування на інтенсифікацію корозії сталі, зокрема,  $i_{\text{кор}}$  збільшується практично вдвічі – від  $5,7$  до  $8,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

За вищої амплітуди кавітації ( $45 \mu\text{m}$ ) переважає, очевидно, внесок механічного руйнування поверхневих захисних плівок на поверхні сталі, внаслідок чого виникають ювенільні ділянки, яким властиві від'ємніші електродні потенціали (рис. 3, крива 3). Внаслідок зростання швидкостей катодних та анодних реакцій за дії інтенсивнішого кавітаційного навантаження (за  $A = 45 \mu\text{m}$ ) густина струму корозії  $i_{\text{кор}}$  сталі збільшується, порівняно із впливом тільки перемішування, майже на порядок – до  $40,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Прояв корозійного чинника під час кавітаційної корозії здебільшого ідентифікують як вплив кавітації на швидкість корозії сталей [7, 15], визначеної за корозійними втратами, які зростають на 15...20%. Проте таке різке зростання  $i_{\text{кор}}$ , отримане електрохімічними оцінками деформаційно активованого кавітаційним навантаженням металу, спричинене високою швидкістю розчинення ювенільних ділянок – нестационарної складової корозійних процесів. У цьому, з одного боку, і полягає на порядок вища роль корозійного чинника під час кавітації. Однак з іншого – інтенсифікацію руйнування за дії кавітації слід розглядати і як різновид корозійно-механічного руйнування, зокрема, як прояв механохімічного ефекту [16], або як один із різновидів корозії під напруженням.

### ВИСНОВКИ

Попередня кавітація поверхні неоднозначно впливає на втомну витривалість сталі 35 у повітрі: вона підвищується після кавітаційного навантаження амплітудою  $45 \mu\text{m}$  упродовж 60 min через деформаційне зміцнення та знижується після 180 min кавітації внаслідок розвитку пошкоджень на кавітованій поверхні. Попередня кавітація амплітудою  $45 \mu\text{m}$  сталі упродовж 180 min знижує корозійно-втомну витривалість у водогінній воді в 1,3 рази. Сумісна дія кавітаційного та

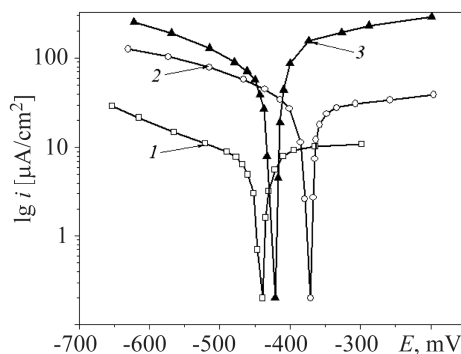


Рис. 3. Поляризаційні криві сталі 35 у водогінній воді без (1) та за кавітації під час інкубаційного періоду за амплітуди  $A = 10$  (2) і  $45 \mu\text{m}$  (3).

Fig. 3. Polarization curves of the 35 steel in tap water without cavitation (1) and with cavitation during incubation period for amplitude  $A = 10$  (2) and  $45 \mu\text{m}$  (3).

циклічного навантажень спричиняє істотне зниження втомної витривалості сталі через електрохімічну активацію поверхні, зумовлену як зміною механічних властивостей металу, так і перемішуванням корозивного середовища: умовна границя корозійної втоми зменшилась у 2,4 рази, а обмежена довговічність для близьких до границі втоми навантажень – на порядок. Встановлено неоднозначний характер залежності електродного потенціалу кавітованої поверхні від амплітуди кавітації: за низької амплітуди переважає вклад зміни дифузійних обмежень катодного процесу внаслідок інтенсивного перемішування середовища, а за високої – внесок механічного руйнування поверхневих захисних плівок, внаслідок чого виникають ювенільні ділянки на кавітованій поверхні.

1. *Failure analysis of a steel elbow pipe from a gas well* / M. Garcia-Martinez, M. P. Valles Gonzalez, A. Gonzalez Meije, and A. Pastor Muro // *J. of Fail. Anal. and Prevention*. – 2020. – **20**, № 3. – P. 723–733.
2. *Investigation of failure mechanisms and remaining life prediction of firewater pipelines used in industrial applications* / B. Piri, R. Amini, E. Asadinia, S. Vardak, R. Mehdilouee, and A. Mojarrad // *Eng. Fail. Anal.* – 2021. – **124**. – Article number 105301.
3. *Odhiambo D. and Soyama H.* Cavitation shotless peening for improvement of fatigue strength of carbonized steel // *Int. J. of Fatigue*. – 2003. – **25**, № 9–11. – P. 1217–1222.
4. *Corrosion characteristics of nanostructured layer on 316L stainless steel fabricated by cavitation-annealing* / C. T. Kwok, F. T. Cheng, H. C. Man, and W. H. Ding // *Materials Letters*. – 2006. – **60**, № 19. – P. 2419–2422.
5. *Investigation into morphology of cavitation erosion-corrosion pits on the surface of carbon steel* / S. Karrab, M. Aboaraia, M. Doheim, and S. M. Ahmed // *The Int. J. of Eng. and Inform. Techn.* – 2014. – **1**, № 1. – P. 28–34.
6. *Choi J.-K. and Chahine G. L.* Relationship between material pitting and cavitation field impulsive pressures // *Wear*. – 2016. – **352–353**. – P. 42–53.
7. *Effect of cavitation on corrosion behavior of 20SiMn low-alloy steel in 3% sodium chloride solution* / S. Z. Luo, Y. G. Zheng, M. C. Li, Z. M. Yao, and W. Ke // *Corrosion*. – 2003. – **59**, № 7. – P. 597–605.
8. *Okada T., Awazu K., and Kawasaki H.* Influence of cavitation erosion on corrosion fatigue and the effect of surface coatings on resistance // *Wear*. – 1980. – **63**, № 1. – P. 51–70.
9. *Osman M. and Ahmed S. M.* Investigation of cavitation damage progress in the incubation period using stepwise erosion and image process techniques // *J. of Eng. Sci.* – 2014. – **42**, № 3. – P. 683–702.
10. *Voloshyn V. A. and Kosarevych R. Ya.* Specific features of the analysis of the initial stage of corrosion-erosion destruction of high-strength steel // *Materials Science*. – 2013. – **49**, № 3. – P. 398–403.  
(*Волошин В. А., Косаревич Р. Я.* Особливості аналізу початкової стадії корозійно-ерозійного руйнування високоміцної сталі // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 3. – С. 105–109.)
11. *Sreedhar B. K., Albert S. K., and Pandit A. B.* Cavitation damage: Theory and measurements – A review // *Wear*. – 2017. – **372–373**. – P. 177–196.
12. *Kai A. and Soyama H.* Visualization of the plastic deformation area beneath the surface of carbon steel induced by cavitation impact // *Scripta Materialia*. – 2008. – **59**, № 3. – P. 272–275.
13. *Hutli E., Fekete T., and Nedeljkovic M.* Surface characteristics and cavitation damage progress in ductile materials // *Eng. Fail. Anal.* – 2019. – **106**. – Article 104157.
14. *Correlation of cavitation erosion resistance and mechanical properties of some engineering steels* / W. Chen, C. Gu, K. Zhao, and F. Shen // *J. of Mat. Sci.* – 2006. – **41**, № 7. – P. 2151–2153.
15. *Tsyurul'nyk O. T.* Influence of temperature on the corrosion, corrosion fatigue, and cavitation fracture of steel in tap water // *Materials Science*. – 2000. – **36**, № 1. – P. 136–137.  
(*Цирульник О. Т.* Вплив температури на корозію, корозійну втому та кавітаційне руйнування сталі у водогінній воді // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2000. – **36**, № 1. – С. 113–114.)
16. *Gutman E. M.* *Mechanochemistry of solid surfaces* – Singapore: World Scientific Publ. Company, 1994. – 332 p.

Одержано 14.05.2021