

Віталій ВОЛОШИН

КОРОЗІЙНО-ВТОМНА МІЦНІСТЬ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ З УРАХУВАННЯМ КАВІТАЦІЙНОЇ ДІЇ ВОДОГІННОЇ ВОДИ

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

Vitaliy VOLOSHYN

CORROSION-FATIGUE STRENGTH OF THE CARBON STEEL WITH TAKING INTO ACCOUNT OF TAP WATER CAVITATION ACTION

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

ABSTRACT

Practice shows that real conditions of cavitation are often accompanied by cyclic loading. Using the specially developed method an influence of the combined action of fatigue and cavitation as well as cavitation with the different duration on fatigue strength of 0.35C steel are studied. The tests under cyclic loading frequency of 3 Hz showed a reduction of corrosion fatigue strength by a factor of 3 under a combined action of cyclic and cavitation loadings in comparison to results of cyclic tests in tap water without cavitation. At the same time precavitation of metal surface ambiguously effects on the fatigue strength of steel in air under frequency of 50 Hz. Fatigue characteristics changed differently depending on duration of the precavitation. At cavitation duration 29 and 180 min they decreased but at 60 min – increased. Such mechanical behaviour was explained by the processes of strengthening-weakening in the near-surface regions of the steel and the specimen surface geometry changes under cavitation.

KEY WORDS: *structural steel, cavitation, fatigue strength, electrochemical parameters.*

ВСТУП

У трубопроводах можуть виникати ситуації, коли механічні напруження, в тому числі циклічні, супроводжуються кавітаційною дією транспортованого по трубопроводу середовища. Найчастіше такі явища виникають під час гідродару, коли тиск у трубопроводі стрибкоподібно знижується на ділянках після засувки, перепадів висот чи згинів.

Транспортовані по трубопроводах середовища можуть наводнювати метал стінки труби за присутності певних механічних умов, до яких слід віднести і кавітаційне навантаження [1]. Під час транспортування органічних середовищ часто в умовах кавітації розриваються вуглеводневі ланцюги [2], що посилює їх наводнювальну здатність. Водночас відомо, що наводнювання сталі послаблює не тільки опір втомному руйнуванню, але і її корозійно-ерозійну тривкість [3, 4]. У даній праці приведено результати досліджень втомної та корозійно-втомної міцності вуглецевої сталі 35 після нормалізації за додаткового кавітаційного впливу корозивного середовища.

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сумісне циклічне з кавітаційним навантаження здійснювали на спеціальній установці КІН-1ВК, в якій поєднується пристрій для циклічного навантаження з діапазоном частот від 3 до 10 Hz та магніострикційний вібратор, що діє за схемою “нижнє” розміщення зразка [5]. Схема установки та зразка для випроб наведені на рис. 1.

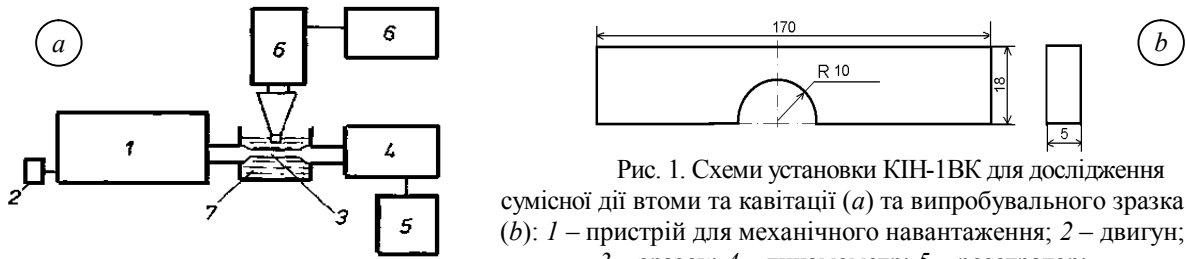


Рис. 1. Схеми установки КИH-1BK для дослідження сумісної дії втоми та кавітації (а) та випробувального зразка (b): 1 – пристрій для механічного навантаження; 2 – двигун; 3 – зразок; 4 – динамометр; 5 – реєстратор; 6 – магніострикційний вібратор; 7 – камера з середовищем.

Fig. 1. Installation scheme of the KИH-1BK device for the study of the combined action of fatigue and cavitation (a) and the test sample (b): 1 – a device for mechanical loading; 2 – engine; 3 – sample; 4 – dynamometer; 5 – the registrar; 6 – piezoelectric vibrator; 7 – camera with medium.

Кавітаційне навантаження (частота 22 kHz, амплітуда кавітації $A = 45 \mu\text{m}$) прикладали до зразка з боку його плоскої поверхні, протилежної від концентратора. За асиметрії циклічного навантаження $R = 0$ зразок піддавали консольному згину, навантажуючи розтягом з боку гладкої поверхні, а стиском – з боку концентратора. Вплив попередньої дії кавітації вивчали, піддаючи зразки перед випробами на втому кавітаційному навантаженню за тією ж схемою “нижнє розміщенням зразка” та тими ж режимами, що і за сумісних втомно-кавітаційних випроб. Тривалості обробки: 60 та 180 min. Після цього досліджували їх втомну витривалість у повітрі за тією ж схемою, але за частоти навантаження 50 Hz.

За середовище, в якому здійснювали кавітаційне навантаження в обох випадках, слугувала водогінна вода середньої твердості ($\text{pH} = 6,3 \dots 6,8$, твердість $3,8 \dots 4,1 \text{ mg-eqv/l}$). Мікротвердість сталі визначали мікротвердоміром ПМТ-3 за стандартною методикою.

Виконували електрохімічні вимірювання, в тому числі і під час кавітації, на потенціостаті ІРС-Pro методом потенціодинамічної поляризації з використанням насиченого хлоридсрібляного електрода порівняння. За результатами випроб визначали базові електрохімічні характеристики сталі – потенціал корозії E_{corr} та густину струму корозії i_{corr} .

ВТОМНА МІЦНІСТЬ СТАЛІ У ПОВІТРІ ПІСЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО КАВІТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Кавітаційне навантаження спричинило пластичне деформування при поверхневого шару, на що вказує зміна його мікротвердості впродовж кавітаційного впливу (рис. 2). При цьому H_{μ} окремих структурних складових сталі змінюється неоднаково. Перліт виказує постійну тенденцію до знеміцнення (крива 1), тоді як ферит спочатку зміцнюється, сягаючи максимуму мікротвердості при $\tau = 60 \text{ min}$, а потім теж знеміцнюється, досягаючи початкового значення H_{μ} при $\tau = 180 \text{ min}$ (крива 2). Інтегрально це привело спочатку тільки до незначного підвищення мікротвердості, а при $\tau > 60 \text{ min}$ – до відчутного зниження (крива 3).

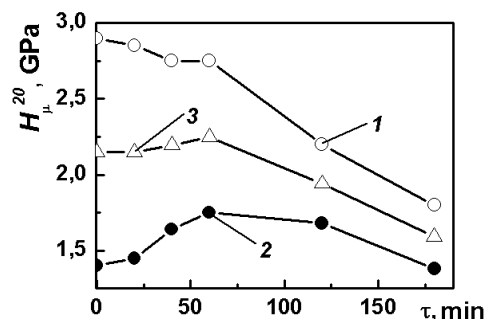


Рис. 2. Мікротвердість H_{μ} окремих складових мікроструктури поверхні сталі 35 залежно від часу кавітації τ у воді: 1 – перлітна складова; 2 – феритна; 3 – інтегральна характеристика.

Fig. 2. Microhardness H_{μ} of the separate components of the microstructure of the 35 steel surface depending on the time of cavitation τ in water: 1 – pearlite component; 2 – ferrite; 3 – integral characteristic.

Встановлено неоднозначну залежність втомної міцності конструкційної сталі у повітрі від тривалості попереднього кавітаційного навантаження (рис. 3 *a*): при $\tau = 60$ min вона зростає (крива 2), а при $\tau = 180$ min – різко знижується (крива 3). Тривалість 60 min відповідає інкубаційному періоду кавітаційного руйнування, упродовж якого ще не розвивається пошкодженість, однак зміцнюється феритна складова мікроструктури сталі. Вона відзначається меншою за перліт твердістю і тому повинна слугувати локальними місцями зародження втомного руйнування. Тому зміцнення феритної складової, очевидно, і призвело до позитивного ефекту попередньої кавітації на стадії інкубаційного періоду на опір втомі сталі у повітрі.

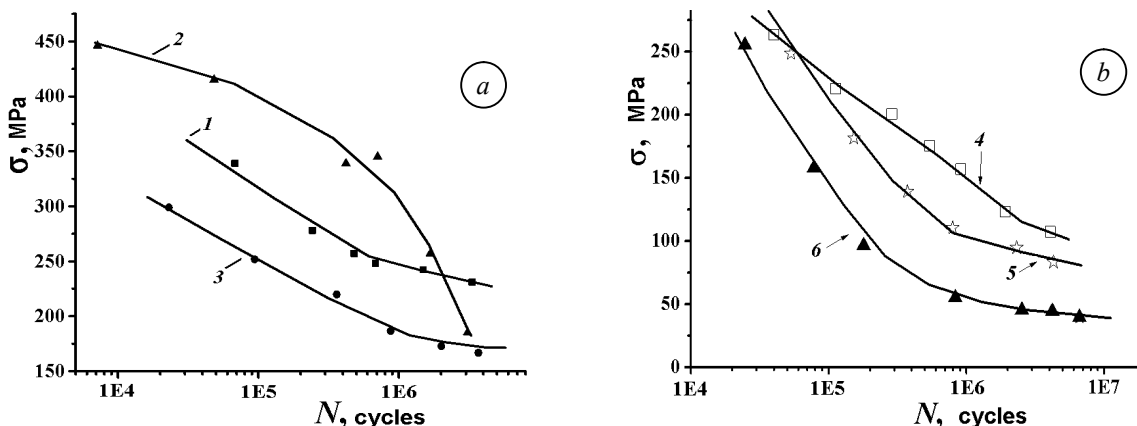


Рис. 3. Криві втомної витривалості σ - N сталі 35 за випроб на повітрі (*a*) без кавітації (1), після попередньої кавітації тривалістю 60 min (2) та 180 min (3) і у воді (*b*) без кавітації (4), після попередньої кавітації тривалістю 180 min (5) та за сумісної дії кавітації і циклічного навантаження (6).

Fig. 3. Curves of fatigue endurance of σ - N of 35 steel under testing in air (*a*) without cavitations (1), after previous cavitations for 60 minutes (2) and 180 minutes (3) and in water (*b*) without cavitations (4), after previous cavitations lasting 180 minutes (5) and with the combined action of cavitations and cyclic loading (6).

Збільшення тривалості кавітації призводить вже до розвитку пошкодженості на поверхні металу, втрати його маси, що означає завершення інкубаційного періоду. Однак, така поверхня стає чутливішою до розвитку втомних тріщин, тому і спостерігали зниження втомних характеристик сталі після 180 min попереднього кавітаційного впливу.

КОРОЗІЙНО-ВТОМНА МІЦНІСТЬ СТАЛІ ПІСЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО КАВІТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Втомна міцність сталі 35 у водогінній воді різко знижується порівняно із випробами у повітрі (криві 1 і 4 на рис. 3), що вказує на чутливість досліджуваного металу до дії корозивного середовища за циклічного навантаження.

Таблиця 1. Вплив умов кавітації на електрохімічні характеристики вуглецевої сталі 35 у водогінній воді
Table 1. Influence of cavitation conditions on the electrochemical characteristics of carbon steel 35 in tap water

Умови	Потенціал корозії E_{corr} , V	Густина струму корозії i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Статичне середовище	-0,44	0,35
Кавітація за $A = 45 \mu\text{m}$	-0,42	4,03

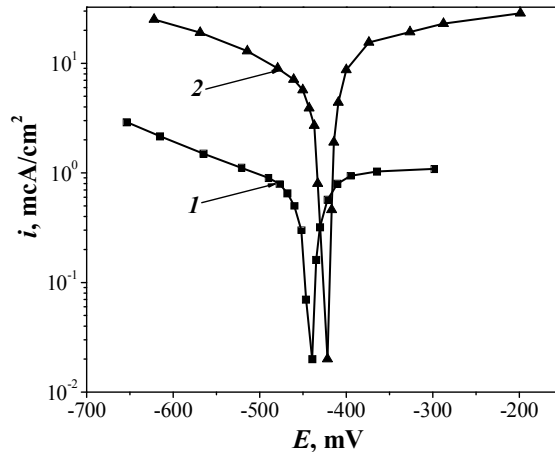


Рис. 4. Поляризаційні криві сталі 35 у водогінній воді за статичних умов (1) та за кавітації під час інкубаційного періоду за $A = 45$ мкм (2).

Fig 4. Polarization curves of steel 35 in tap water in stationary state (1) and during incubation period of cavitation at $A = 45 \mu\text{m}$ (2).

Попередня кавітація упродовж 180 min додатково знизила опір сталі корозійній втомі (крива 5), що відбиває вплив зміни стану поверхні металу на руйнування у корозивному середовищі. З іншого боку, крива 5 на рис. 3 знаходиться в діапазоні нижчих напружень, ніж крива 3, що вказує на додатковий спад корозійно-втомної міцності попередньо кавітованої сталі. Однак найбільше зниження опору руйнуванню сталі відбувається за сумісної дії циклічного та кавітаційного навантажень (крива б), умовна границя втоми опускається до 50 МПа.

Така зміна корозійно-втомних характеристик у результаті кавітаційного впливу супроводжується істотною зміною електрохімічної поведінки кавітованої поверхні (рис. 4, табл. 1): зростає густина струму корозії i_{corr} . Тут слід брати до уваги не тільки зміну стану поверхні через мікропластичну деформацію металу, але і розвиток пошкодженості. Це чинники, які активують корозійний процес. Під час кавітації середовище інтенсивно перемішується, що, як відомо, також пришвидшує електродні реакції на поверхні.

ВИСНОВКИ

Попередня кавітація поверхні неоднозначно впливає на втомну міцність сталі у повітрі через суперечливу дію двох чинників: деформаційного зміцнення та розвитку пошкодженості на кавітованій поверхні. Сумісна дія кавітаційного та циклічного навантажень призводить до істотного зниження втомної міцності через електрохімічну активацію поверхні та зміни механічних властивостей металу за присутності перемішування корозивного середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Роль водню в кавітаційному руйнуванні сталі 45 у змащувальних середовищах / Фіз.-хім. механіка матеріалів // О.І. Балицький, Я. Хмель, П. Краузе, Я. Некраш, М. Мацьонг. – 2009. – № 5. – С. 39–42.
2. Starczewski L. Wodorowe zużycie ciernych elementów maszyn. – Sulejówek: Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej, 2002. – 150 p.
3. Особливості корозійного та механічного впливу рідких середовищ на корозійно-ерозійне руйнування сталей / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, А. І. Бассараб, Я. М. Гладкий // Проблеми трибології. — 1999. – № 1. – С. 3–11.
4. Effect of Hydrogen on Cavitation Erosion Behaviour of High Strength Steel / Y. X. Qiao, X. Cai, C. Ouyang, Y. G. Zheng // Int. J. Electrochem. Sci. – 2016. – V. 11. – P. 10329–10346.
5. Цирульник О., Бассараб А. Порівняння різних методів випробувань конструкційних матеріалів на корозійно-ерозійне руйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – Спецвип. № 1. – С. 658–661.