

М. С. СТЕЧИШИН, А. В. МАРТИНЮК, Ю. М. БІЛИК, В. С. КУРСКОЙ
Хмельницький національний університет

ВПЛИВ СЕРЕДОВИЩ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ КАВІТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ МЕТАЛІВ

Встановлено, що інтенсивність кавітаційно-ерозійного зношування металів зумовлена сумісною дією механічних і хімічних факторів, а під час кавітації в корозійно-активних середовищах – електролітах – корозійні процеси проходять за електрохімічним механізмом. При цьому фізичні властивості середовища на інтенсивність руйнування проявляються двоюко: фізичні властивості середовища (поверхневий натяг, тиск пари, в'язкість, питома густина і т. п.) визначають динамічні характеристики кавітаційних бульбашок і мікроструменів рідини, а хімічні властивості – корозійні процеси при мікроударному навантаженні. Аналіз і узагальнення теоретичних і експериментальних робіт дозволив розробити схему корозійно-механічного зношування (КМЗ) в середовищах-електролітах, в основі якої лежить втомно-електрохімічна природа руйнування металів в системах метал+середовище.

Ключові слова: кавітація, механізми кавітаційного зношування, схема корозійно-механічного зношування, (M1+M2+C); метал-середовище (M+C).

M. S. STECHISHIN, A. V. MARTYNYUK, YU. M. BILYUK, V. S. KURSKOY
Khmelnytskyi National University

ENVIRONMENTAL EFFECTS ON THE INTENSITY OF CALCULATION AND EROSION WOODING METALS

It is established that the intensity of cavitation and erosion wear of metals is determined by the coaction of mechanical and chemical factors, and when cavitation in corrosive environments - electrons, corrosion processes pass through the electro-chemical mechanism. In this case, the physical properties of the environment on the intensity of destruction are manifested in two ways: the physical properties of the medium (surface tension, vapour pressure, viscosity, specific density, etc.) determine the dynamic characteristics of the cavitation bubbles and liquid micro-flows, and the chemical properties are corrosive processes with micro-shock load. The analysis and generalization of theoretical and experimental work allowed to develop a scheme of corrosion-mechanical wear (KMW) in such environments as electrolytes, which is based on the fatigue electrochemical nature of the destruction in systems metal- environments.

Keywords: cavitation, mechanisms of cavitation wear, scheme of corrosion-mechanical wear, (M1 + M2 + E); metal-environment (M + E).

Вступ. Швидкість руйнування поверхонь металів при кавітаційно-ерозійному зношуванні в робочих середовищах, які є здебільшого корозійно-активними до металів, визначається двома факторами: механічним і корозійним. Тому вплив середовищ на швидкість і характер руйнування металевих поверхонь проявляється двоюко: фізичні властивості середовища визначають динамічні характеристики кавітаційних бульбашок і мікроструменів рідини, а хімічні властивості – корозійні процеси при мікроударному навантаженні [1].

Мета роботи полягає в дослідженні впливу фізико-хімічних властивостей рідких середовищ на інтенсивність кавітаційно-ерозійного зношування металів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що рідини і, зокрема, вода володіють великою руйнуючою силою. Вода здатна проникати в мілкі пори і при ударній дії чинити на тіло розклинюючу дію. На відміну від твердого тіла рідини володіють здатністю руйнувати окремі мікроділянки металу. До переліку важливих показників, які характеризують руйнуючу здатність рідин в умовах мікроударного навантаження, відносяться в'язкість і поверхневий натяг.

При великих швидкостях деформації рідина веде себе як тверде тіло і за відповідних умов проявляє здатність до крихкого руйнування [2, 3]. Здатність рідини до розриву визначається об'ємною міцністю, яка залежить від поверхневого натягу, в'язкості, газонаповнення і т.д.

Підвищення температури рідини сприяє її здатності до розриву і веде до підвищення її кавітаційної здатності. Однак руйнуюча здатність води збільшується лише до температури 44...45 °С, а далі різко зменшується [2, 3].

Із підвищенням коефіцієнта поверхневого натягу рідин інтенсивність кавітаційного руйнування зростає [3]. Згідно з кінетичною теорією чисті рідини витримують дуже високі розтягуючі напруження, а реальні рідини розриваються при тисках близьких до парціального тиску парів рідини. Тому в роботі Лейта [4] для виявлення властивостей рідин на інтенсивність кавітаційного руйнування від температури брали за точку відліку температуру плавлення, а температуру рідини визначали у відсотках від різниці температур точки кипіння і плавлення. При цьому розглядалися такі властивості рідин: тиск пари, в'язкість, поверхневий натяг і питома маса залежно від зазначеної різниці температур для води, бензину і евтектичної суміші Na-K. Шляхом апроксимації експериментальних даних для бензину і води Лейт отримав вираз для величини ерозії в лужних металах через її величину у воді.

Виклад основного матеріалу. Кавітаційна зносостійкість в рідинах, що відрізняються від води, представляє великий практичний інтерес у зв'язку з широким використанням органічних рідин і рідких металів в насосах, турбінах, дизельних двигунах і т.п. Це призвело до широких досліджень кавітаційної і

ерозійної зносостійкості матеріалів у різних рідинах, зокрема в толуолі, етиловому спирті, ацетоні і формальдегіді, бензолі та ефірі, лужних металах. На жаль, у цих дослідженнях не враховано вплив властивостей середовищ на інтенсивність кавітаційного руйнування, за виключенням розглянутої вище роботи [4].

Руйнування металів в корозійних середовищах у більшості випадків гальмується утворенням на їх поверхнях захисних плівок. Кавітація і тертя сприяють руйнуванню та наступному видаленню захисних плівок і росту інтенсивності зношування. Крім того, розчини впливають на механічні властивості металів внаслідок адсорбції поверхнево-активних речовин та ефекту Ребіндера [5, 6].

Особливо поширена думка про електрохімічний характер корозії при кавітації [2, 4], яка протікає з утворенням мікрокомірок, що складаються з анодних і катодних ділянок. Метал втрачається на аноді (1):



Спряженою катодною реакцією є



або



Реакція (2) переважає в кислих розчинах, у яких висока концентрація іонів водню, а реакція (3) – в нейтральних і лужних розчинах. Швидкість корозії визначається величиною струму корозії від сумарної дії мікрогальванопар поверхні.

Коли вперше було відкрито явище кавітації виникла полеміка про те, чи механізм втрат маси є переважно електрохімічним чи повністю механічним. Кренн, Петраччі, Уїлер і Тейлор підкреслюють електрохімічну природу втрат маси металу. Проте теоретичні розрахунки напружень, які створюються одиночною кавітаційною бульбашкою і їх скупченням [7, 8] показали, що їх величина достатня для пластичної деформації в'язкого металу і розтріскування крихкого металу. Більш того, Плессет показав, що матеріали можуть руйнуватися в інертних рідинах.

Сьогодні вже ясно, що кавітаційні пошкодження викликані сумісною дією механічних і хімічних факторів [6]. При кавітації в середовищах-електролітах корозійні процеси проходять за електрохімічним механізмом [3, 4, 7, 9, 10, 11 та ін.].

Переконалим доказом електрохімічної корозії при кавітації є можливість катодного захисту матеріалів в середовищах-електролітах. Застосування катодного захисту для захисту деталей турбін [12], для гвинтів суден [13], робочих коліс насосів в харчовій промисловості [2, 3] дало позитивні результати.

Однак подальші дослідження показали [14], що ефективність катодного захисту залежить від інтенсивності кавітації і з її зростанням різко падає.

Про успішне застосування катодного захисту від кавітації свідчать публікації закордонних авторів [9, 12]. При цьому відмічається, що катодний захист ефективний лише тоді, коли в кавітаційному полі з поверхні металу виділяються бульбашки водню. При низьких катодних потенціалах, коли водень не виділяється, помітного зменшення швидкості руйнування не спостерігається.

Не дивлячись на багаточисельні дослідження, єдиної думки про роль корозійного фактору при КМЗ і кавітації до цього часу немає.

Френкель Я. І. рахує, що при утворенні кавітаційних бульбашок на їх границях появляються іони середовища різних знаків і виникає електричне поле великої напруженості. Такі місцеві електричні поля при їх розряді сприяють іонізації газів і молекул розчинених домішок. Ці новоутворені іони і є можливою причиною виникнення хімічних реакцій між рідким середовищем і металом. Такий підхід поділяють автори багатьох досліджень [9, 15, 16]. Так, наприклад, Б. Вайс [12] рахує, що кавітація викликає зміни хімічної активності середовища, які сприяють електрохімічній корозії.

Багато дослідників [13, 16, 17 та ін.] пов'язують роль корозійного фактора руйнування з наявністю на поверхні металу окисної плівки. При її руйнуванні кавітацією втрати маси збільшуються. При утворенні міцних захисних окисних плівок, що витримують не руйнуючись мікроударні навантаження (механічні), зносостійкість максимальна.

В.В. Фомін [18] рахує, що вплив корозійного фактору при кавітаційно-ерозійному зношуванні проявляється, головним чином, у зниженні механічної міцності поверхні металу при її контакті з рідиною. Для корозійностійких сталей, на яких утворюються щільні і дуже тонкі окисні шари на поверхні, міцність їх знижується лише в верхніх шарах, безпосередньо контактуючих з окисною плівкою. Такої ж думки дотримуються Варінг і Тірувенгадам [13, 19].

М.Г. Тімербулатов вважає [17], що електрохімічні втрати складають лише невелику долю втрат металу і значна частина окислювальних процесів при кавітації протікає шляхом утворення на «ювенільних» поверхнях металів хімічним способом первинних окисних плівок. Однак за Г.В. Акімовим і Н.Д. Томашовим корозія металів в електролітах проходить переважно за електрохімічним процесом, а тому автор роботи [8] рахує, що корозія металів в системі охолодження дизелів має лише електрохімічну природу.

Уїлер вперше [20, 21] визначив роль корозії при кавітаційно-ерозійному зношуванні як «каталізатора» процесу руйнування поверхонь, яка в даний час є загальноприйнятою для більшості дослідників [3, 4, 7, 22, 23, та ін.]. Однак відсутність єдиної, загальноприйнятої методики визначення корозійних втрат в процесі тертя або кавітації, а також недоліки нині існуючих методик, ускладнюють

розуміння процесів корозійно-механічного зношування та розробку методів прогнозування кавітаційної стійкості металів і сплавів залежно від параметрів зовнішнього навантаження, фізичних і електрохімічних характеристик робочих середовищ тощо.

Дослідження впливу робочих середовищ на КМЗ металів і сплавів проводилося за різними ознаками: 1) галузевий принцип – кавітація в суднобудуванні [6, 15, 16, 25], нафтовій і газовій галузях [8, 9, 22], гідротурбобудуванні і дизелебудуванні [14, 15, 25], в харчовій промисловості [2–4, 7, 24]; 2) за ступенем корозійної агресивності середовища [7, 9, 23]; 3) за складом середовища, вмістом або відсутністю абразивних частинок, газонасиченістю тощо [6, 9, 19].

Більш зручною нам видається класифікація робочих середовищ за типом хімічних реакцій: нейтральні, кислі та лужні середовища. Такий підхід дозволяє об'єднати різні дослідження і систематизувати експериментальні та теоретичні результати.

Найбільша кількість досліджень кавітаційної зносостійкості виконана у звичайній питній (водопровідній) воді. Враховуючи, що питна вода в різних регіонах суттєво відрізняється за своїм хімічним складом, кількістю і видом нерозчинних сполук в електрохімії часто використовують еталонну або жорстку воду ($\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ –0,343 г і $\text{CaCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ –0,61 г на 1 л дистилату). Крім того, воду використовують для порівняння інтенсивності руйнування матеріалів відносно інших рідин і середовищ. Іншим, часто застосовуваним середовищем є 3% водний розчин хлориду натрію, який прийнято за модель морської води.

В роботі [4] основні дослідження кавітаційно-ерозійної зносостійкості вуглецевих конструкційних сталей, нержавіючої сталі, сірого чавуну і групи титанових сплавів з α ; $\alpha + \beta$ і β – структурою проведені в розчинах хлориду натрію. Знайдені співвідношення, які дозволяють за відомими втратами в прісній воді знаходити втрати маси матеріалів в морській воді. Отримані вирази для знаходження швидкості руйнування металів залежно від величини співвідношення корозійного і механічного факторів руйнування, а також розроблені прискорені лабораторні методи оцінки кавітаційної зносостійкості металів в розчинах хлориду натрію, які відповідають показникам зношування в умовах експлуатації обладнання.

Дослідження кавітаційної зносостійкості матеріалів в морській і прісній воді наведені також в роботах [12, 13, 16 та ін.]. Тут, в основному, проведено вибір кавітаційностійких матеріалів, розглядаються розроблені методи прогнозування їх зносостійкості з врахуванням корозійного фактору руйнування поверхонь, вплив термічної, хіміко-термічної та інших способів поверхневого і об'ємного зміцнення металів.

Разом з тим, аналіз цих робіт свідчить про відсутність єдиної методики знаходження корозійного фактору руйнування саме в процесі кавітації, а застосування опосередкованих способів, що базуються на методах екстраполяції приводять до значних похибок [16]. Так само, як і повне ототожнення кінетики зміни потенціалу і мікрореформацій поверхні при кавітації [10].

Роботи, виконані науковою школою під керівництвом професора Прейса Г.О., вигідно відрізняються від інших саме тим, що в них процеси КМЗ і, зокрема, кавітаційно-ерозійного зношування розглядаються комплексно у всіх видах середовищ (нейтральних, кислих і лужних). Крім того, враховуючи специфіку робочих середовищ харчових виробництв, за характером і механізмом взаємодії з металами рідкі середовища розділяються також на хімічно і поверхнево-активні [7].

До хімічно-активних середовищ відносяться водні розчини електролітів (кислот, лугів, солей). Молекули речовин розчинених у цих середовищах можуть дисоціювати і тим самим інтенсифікувати електрохімічні процеси. Поверхнево-активні середовища містять речовини з полярними (асиметричними) молекулами, які адсорбуються на поверхнях твердих тіл, утворюють структурні плівки. Можлива як нормальна, так і дотична орієнтація молекул. Нормальна орієнтація характерна для полярних молекул (наприклад, COOH і CH_3 в жирних кислотах). Дотична орієнтація властива молекулам, що мають на кінцях однакові групи атомів (ефіри).

Відповідно до ефекту Ребіндера під дією дотичних і нормальних навантажень адсорбційні шари дотичних і нормальних навантажень адсорбційні шари

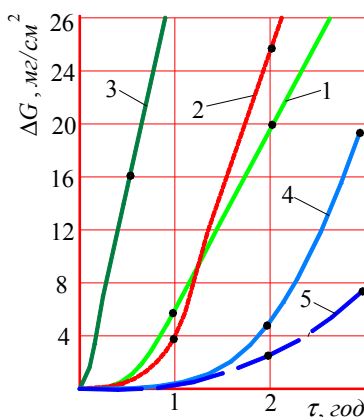


Рис. 1. Кінетика втрат маси сталі 45 при випробуваннях на МСВ: 1 – жорстка вода, 2-3 – розчин NaCl; 3 – кисле; 4 – лужне середовища і 5 – сталь 12X 18N10T в 3% розчині NaCl [4, 14]

поверхнево-активних речовин (ПАР) володіють великим опором стиску, але дуже малим опором зсуву. Разом з тим, шари молекул ПАР спричиняють «розклинюючу» дію і відштовхують один від одного поверхні тріщин, а потрапляючи на ділянки з поверхневими дефектами, сприяють відокремленню (диспергуванню) поверхневих шарів металів.

Лабораторні дослідження та результати виробничих випробувань однозначно вказують на тісний зв'язок швидкості руйнування від виду середовища і матеріалу (рис. 1). Ці залежності побудовані за результатами досліджень [4, 7, 11, 24].

Кавітаційно-ерозійне зношування є складним фізико-хіміко-механічним процесом, що виявляється

при мікроударному впливі рідини на поверхню твердого тіла. При цьому, руйнування металів залежить від багатьох чинників: фізико-хімічних властивостей рідини і металу, температури, наявності вібрацій, електрохімічних процесів і т.д.

У зв'язку з винятковою складністю процесу кавітації і пов'язаного з нею кавітаційного руйнування поверхонь в літературі висловлюються різні припущення про можливий механізм кавітаційної ерозії. Цьому сприяла також тенденція пояснення кавітаційного руйнування будь-яким одним фактором. Всі нині висловлені гіпотези можуть бути розділені на чотири групи [3]: засновані на теорії гідромеханічного впливу [13, 23], електрохімічної теорії кавітаційної ерозії [1-4], теорії миттєвих хімічних реакцій [9] і на термодинамічну теорію кавітаційної ерозії [9].

У роботах Г.А. Прейс, Н.А. Сологуба, А.І. Некоза на основі узагальнення великого обсягу фактичного матеріалу більш глибоко і всебічно розглянуті питання КМЗ в електролітах, вивчені його природа і механізми руйнування поверхонь в залежності від умов роботи фрикційного контакту, електрохімічних і фізико-хімічних властивостей середовища.

Так, імпульсний характер тертя зумовлює циклічну зміну напруг в поверхневому шарі деталей, що труться [1]. Дане положення неодноразово підтверджено експериментально [2-4]. Однак тільки в роботах [24, 27] вивчена кінетика інтенсивності зношування металів в процесі тертя і кавітації відповідно до змін дислокаційної структури поверхневих шарів матеріалів.

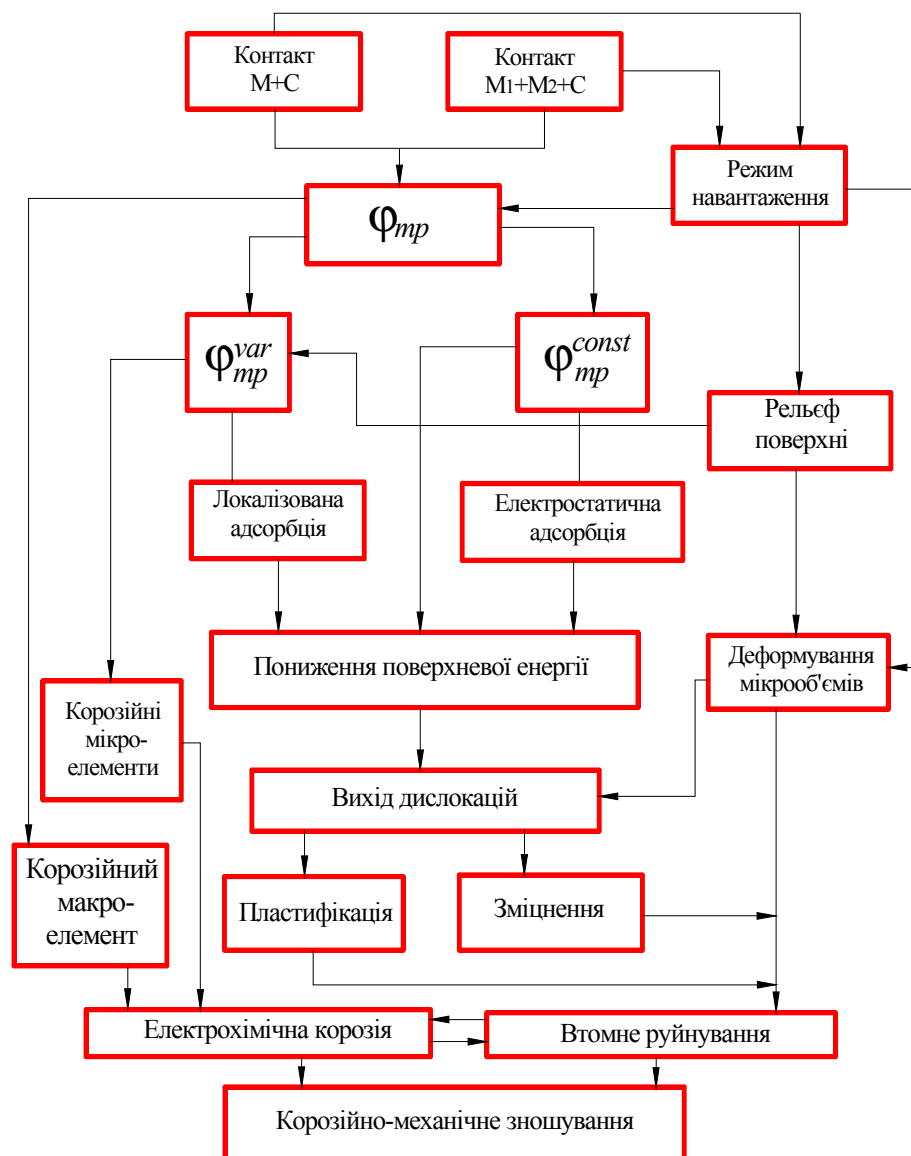


Рис. 2. Схема корозійно-механічного зношування металів у середовищах електролітах [1, 4]

Так, в роботі [27] наведена залежність зміни інтенсивності зношування по масі пари тертя нікель-молібден (Ni-Mo) від часу випробування на тертя. На отриманих кривих в початковий період відзначається різке падіння інтенсивності зношування до деякого мінімального значення, що залежить від величини навантаження, а в подальшому спостерігається ділянка усталеного тертя, на якому ясно виражені циклічно повторювані викиди інтенсивності зношування. Початковий спад інтенсивності зношування в період припрацювання (до першого мінімуму), очевидно, обумовлений згасанням явищ сколу і мікрорізання, які

проявляються в інтрузії і надриву поверхонь матеріалів при терті через локальний характер концентрації напружень в приповерхневих шарах, що сягають межі витривалості. На цій стадії починає формуватися рівноважна шорсткість поверхонь тіл тертя.

Наявність циклічно чергованих викидів інтенсивності зношування свідчить про локалізацію в часі процесу утворення продуктів зносу і, мабуть, про те, що при терті має місце нерівномірний у часі циклічний знос поверхонь тертя, обумовлений специфікою пружно-пластичного деформування приповерхневих шарів тіл. Це прямо або опосередковано підтверджується даними робіт [6, 18, 21]. Крім того, на підставі аналізу зміни структурних і енергетичних характеристик приповерхневих шарів в роботах [6, 9] висловлено припущення про можливість прояву такої залежності. Зіставлення часових залежностей показує, що циклічно повторювані викиди інтенсивності зношування збігаються у часі з ділянками мінімуму щільності дислокацій, отриманих методом феромагнітного резонансу (ФМР) [27]. Тут також видно, що тривалість циклу інтенсивності зношування, як і тривалість циклу зміни міцності тісно пов'язана з умовами навантаження фрикційного контакту. Так збільшення навантаження в два рази призводить до відповідного зменшення тривалості циклів кінетики інтенсивності зношування та структурних змін в приповерхневих шарах з одночасним зростанням величини зносу.

Таким чином, при реалізації умов пружного і пружно-пластичного контакту відповідні взаємопов'язані циклічні зміни напруг і структурні зміни приповерхневого шару визначають втомний характер руйнування металів [27].

У разі реалізації пластичного фрикційного контакту, матеріал руйнується під дією також циклічно змінних напружень, що перевищують межу втоми. При цьому, реалізується малоциклова втома, при якій субмікротріщини утворюються вже при перших циклах навантаження.

Аналіз і узагальнення теоретичних і експериментальних робіт дозволив розробити схему протікання КМЗ в середовищах-електролітах, в основі якої лежить втомно-електрохімічна природа руйнування металів в системах метал1+метал2+середовище ($M1+M2+C$) і метал-середовище ($M+C$) [1, 4]. Власне на базі цієї схеми протікання КМЗ і виконані теоретичні і експериментальні дослідження в даній роботі (рис. 2).

Висновки. У роботі розглянуто вплив середовищ на інтенсивність корозійно-механічного зношування металів до якого належить і їх кавітаційно-ерозійне зношування. При цьому фізичні властивості середовищ (в'язкість, і поверхневий натяг) визначають динамічні характеристики кавітаційних бульбашок і мікроструменів рідини, а хімічні (електрохімічні) – корозійні властивості металів. Виходячи з аналізу літературних джерел та власних досліджень автори обґрунтовують втомно-електрохімічну теорію корозійно-механічного руйнування металів у середовищах-електролітах.

Література

1. Преис Г.А. О природе коррозионно-механического изнашивания металлов / Г.А. Преис // Трение и износ. – 1987. – Т. 8. – № 5. – С. 792–797.
2. Сологуб Н.А. Прогнозирование и повышение долговечности деталей технологического оборудования сахарных заводов : дис. ... докт. техн. наук / Н.А. Сологуб. – К., 1993. – 57 с.
3. Некоз А.И. Разработка методов оценки и повышения долговечности деталей оборудования пищевой промышленности, подверженных кавитационно-эрозионному изнашиванию : автореф. на соискание науч. степени дис. докт. техн. наук / А.И. Некоз. – К., 1985. – 43 с.
4. Стечишин М.С. Довговічність деталей обладнання харчової промисловості при корозійно-механічному зношуванні : автореф. на здобуття наук. ступеня дис. докт. техн. наук / М.С. Стечишин. – Хмельницький, 1998. – 32 с.
5. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г.В. Карпенко. – К. : Наукова думка, 1976. – 125 с.
6. Погодаев Л.И. Износостойкость материалов и деталей машин при гидроабразивном и кавитационном изнашивании : автореф. на соискание науч. степени дис. докт. техн. наук / Л.И. Погодаев. – М., 1979. – 46 с.
7. Преис Г.А. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности / Г.А. Преис, Н.А. Сологуб, А.И. Некоз. – М. : Машиностроение. 1979. – 208 с.
8. Томашов Н.Ф. Коррозия и коррозионностойкие сплавы / Н.Ф. Томашов, Г.П. Чернова. – М. : металлургия, 1983. – 232 с.
9. Эрозия / под. ред. К. Прис ; пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – 464 с.
10. Карасюк Ю.А. О соотношении коррозионного и эрозионного факторов в кавитационном разрушении металлов / Ю.А. Карасюк, В.И. Кочеров, В.В. Бенино и др. // Физ.-хим. механика материалов. – 1976. – № 5. – С. 14–16.
11. Некоз А.И. Анализ соотношения коррозионного и механического факторов при кавитационно-эрозионного изнашивания / А.И. Некоз, Н.А. Сологуб, М.С. Стечишин и др. // Физ.-хим. механика материалов. – 1984. – Т. 20. – № 2. – С. 110–111.
12. Vyas B., Preece C.M. Appl. Phys / B. Vyas, C.M. Preece. – 47, 5133. – 1976. – P. 32–41.
13. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы / И.Н. Богачев. – М. : Металлургия, 1972. – 192 с.

14. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С.П. Козырев. – М. : Машиностроение, 1971. – 240 с.
15. Трифель М.С. Особенности устройства и контроля катодной защиты гидротурбин от кавитационной эрозии / М.С. Трифель, Е.П. Штерн, Е.Д. Гликлштейн // Гидротехническое строительство. – 1979. – № 8. – С. 39–42.
16. Георгиевская Е.К. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е.К. Георгиевская. – Л. : Судостроение, 1978. – 206 с.
17. Тимербулатов М.Г. Влияние коррозии на кавитационную стойкость металлов / М.Г. Тимербулатов // Защита металлов. – 1972. – Т. 8. – № 5. – С. 583–587.
18. Фомин В.В. Гидроэрозия металлов / В.В. Фомин. – М. : Машиностроение, 1977. – 287 с.
19. Кнепп Р. Кавитация / Р. Кнепп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир, 1974. – 687 с.
20. Waring S. On the role corrosion in cavitation damage / S. Waring, H.S. Preiser, A. Thiruvengadam // J. of ship res. – 1965. – Vol. 9. – P. 200–208.
21. Меттер И. Физическая природа кавитации / И. Меттер // Успехи физических наук. – 1948. – Т. XXXV. – С. 17–21.
22. Коррозия. Справочник / под. ред. Л.А. Шрайера. – М. : Metallurgiya, 1981. – 632 с.
23. Богачев И.Н. Влияние коррозионных свойств среды на кавитационную стойкость стали / И.Н. Богачев, Ю.Г. Векслер, К.А. Карасюк // Защита металлов. – 1972. – № 3. – Т. 8. – С. 265–269.
24. Стечишин М.С. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість деталей обладнання молокозаводів : монографія / М.С. Стечишин, Н.М. Стечишина, А.В. Мартинюк. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – 148 с.
25. Thiruvengadam A. Trans / A. Thiruvengadam. – ASME, Ser. D., 85, 1963. – 365 p.
26. Leith W.C. Proc. Am. Soc. Test. Mater / W.C. Leith. – 1985. – 65. – 798 p.
27. Stechishin M.S. Surface layer energy capacity and cavitation resistance of nickel in NaCl solutions / Nekoz A.I., Belyi V.I., Pinchuk V.G., Stechishin M.S. // Soviet Journal of Friction and Wear (English translation of Trenie i Iznos) 5(1), p. 131–133.

References

1. Prejs G.A. O prirode korrozionno-mekhanicheskogo iznashivaniya metallov / G.A. Prejs // Trenie i iznos. – 1987. – Т. 8. – № 5. – С. 792–797.
2. Sologub N.A. Prognozirovanie i povyshenie dolgovechnosti detalej tehnologicheskogo oborudovaniya saharlyh zavodov : dis. ... dokt. tehn. nauk / N.A. Sologub. – K., 1993. – 57 s.
3. Nekoz A.I. Razrabotka metodov ocenki i povysheniya dolgovechnosti detalej oborudovaniya pishhevoj promyshlennosti, podverzhennyh kavitacionno-jerozionnomu iznashivaniyu : avtoref. na soiskanie nauch. stepeni dis. dokt. tehn. nauk / A.I. Nekoz. – K., 1985. – 43 s.
4. Stechyshyn M.S. Dovichnist detalei obladnannia kharchovoi promyslovosti pry koroziiino-mekhanichnomu znoshuvanni : avtoref. na zdobuttia nauk. stupenia dys. dokt. tekhn. nauk / M.S. Stechyshyn. – Khmelnytskyi, 1998. – 32 s.
5. Karpenko G.V. Vlianie srede na prochnost' i dolgovechnost' metallov / G.V. Karpenko. – K. : Naukova dumka, 1976. – 125 s.
6. Pogodaev L.I. Iznosostojkost' materialov i detalej mashin pri gidroabrazivnom i kavitacionnom iznashivani : avtoref. na soiskanie nauch. stepeni dis. dokt. tehn. nauk / L.I. Pogodaev. – M., 1979. – 46 s.
7. Prejs G.A. Povysenie iznosostojkosti oborudovaniya pishhevoj promyshlennosti / G.A. Prejs, N.A. Sologub, A.I. Nekoz. – M. : Mashinostroenie. 1979. – 208 s.
8. Tomashov N.F. Korrozija i korrozionnostojkie splavy / N.F. Tomashov, G.P. Chernova. – M. : metallurgija, 1983. – 232 s.
9. Jerozija / pod. red. K. Pris ; per. s angl. – M. : Mir, 1982. – 464 s.
10. Karasjuk Ju.A. O sootnoshenii korrozionnogo i jerozionnogo faktorov v kavitacionnom razrushenii metallov / Ju.A. Karasjuk, V.I. Kocherov, V.V. Benino i dr. // Fiz.-him. mehanika materialov. – 1976. – № 5. – S. 14–16.
11. Nekoz A.I. Analiz sootnosheniya korrozionnogo i mekhanicheskogo faktorov pri kavitacionno-jerozionnogo iznashivaniya / A.I. Nekoz, N.A. Sologub, M.S. Stechishin i dr. // Fiz.-him. mehanika materialov. – 1984. – Т. 20. – № 2. – S. 110–111.
12. Vyas B., Preece C.M. Appl. Phys / B. Vyas, C.M. Preece. – 47, 5133. – 1976. – P. 32–41.
13. Bogachev I.N. Kavitationnoe razrushenie i kavitacionno-stojkie splavy / I.N. Bogachev. – M. : Metallurgija, 1972. – 192 s.
14. Kozyrev S.P. Gidroabrazivnyj iznos metallov pri kavitacii / S.P. Kozyrev. – M. : Mashinostroenie, 1971. – 240 s.
15. Trifel' M.S. Osobennosti ustrojstva i kontrolja katodnoj zashhity gidroturbin ot kavitacionnoj jerozii / M.S. Trifel', E.P. Shtern, E.D. Gliksteyn // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. – 1979. – № 8. – S. 39–42.
16. Georgievskaja E.K. Kavitationnaja jerozija grebnyh vintov i metody bor'by s nej / E.K. Georgievskaja. – L. : Sudostroenie, 1978. – 206 s.
17. Timerbulatov M.G. Vlianie korrozii na kavitacionnuju stojkost' metallov / M.G. Timerbulatov // Zashhita metallov. – 1972. – Т. 8. – № 5. – S. 583–587.
18. Fomin V.V. Gidrojerozija metallov / V.V. Fomin. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 287 s.
19. Knepp R. Kavitacija / R. Knepp, Dzh. Dejli, F. Hjemmit. – M. : Mir, 1974. – 687 s.
20. Waring S. On the role corrosion in cavitation damage / S. Waring, H.S. Preiser, A. Thiruvengadam // J. of ship res. – 1965. – Vol. 9. – P. 200–208.
21. Metter I. Fizicheskaja priroda kavitacii / I. Metter // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1948. – Т. HHHV. – S. 17–21.
22. Korrozija. Spravochnik / pod. red. L.A. Shrajera. – M. : Metallurgija, 1981. – 632 s.
23. Bogachev I.N. Vlianie korrozionnyh svoystv srede na kavitacionnuju stojkost' stali / I.N. Bogachev, Ju.G. Veksler, K.A. Karasjuk // Zashhita metallov. – 1972. – № 3. – Т. 8. – S. 265–269.
24. Stechyshyn M.S. Kavitatsiino-eroziina znosostiikist detalei obladnannia molokozavodiv : monohrafiia / M.S. Stechyshyn, N.M. Stechyshyna, A.V. Martyniuk. – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – 148 s.
25. Thiruvengadam A. Trans / A. Thiruvengadam. – ASME, Ser. D., 85, 1963. – 365 p.
26. Leith W.C. Proc. Am. Soc. Test. Mater / W.C. Leith. – 1985. – 65. – 798 p.
27. Stechishin M.S. Surface layer energy capacity and cavitation resistance of nickel in NaCl solutions / Nekoz A.I., Belyi V.I., Pinchuk V.G., Stechishin M.S. // Soviet Journal of Friction and Wear (English translation of Trenie i Iznos) 5(1), r. 131–133.

Рецензія/Peer review : 11.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Стаття прорецензована редакційною колегією