

ISSN 0370-2197

**ПРОБЛЕМИ  
ТЕРТЯ ТА  
ЗНОШУВАННЯ**

**PROBLEMS OF FRICTION  
AND WEAR**

УДК 62-82:535.528

DOI: 10.18372/0370-2197.2(103).18668

Т.В. ТАРАСЕНКО<sup>1</sup>, В.М. БАДАХ<sup>1</sup>, М.Г. МАКАРЕНКО<sup>1</sup>, І.В. ДУБКОВЕЦЬКИЙ<sup>2</sup><sup>1</sup>Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна<sup>2</sup>Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

## ВИПРОБОВУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА КАВІТАЦІЙНУ СТІЙКІСТЬ

У статті приведено результати експериментальних досліджень кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів, що широко застосовуються авіаційних гідравлічних приводах. Визначено вплив насичення робочої рідини повітрям на інтенсивність кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів. Запропоновано у якості генератора кавітації при дослідженні кавітаційної стійкості конструкційних матеріалів, використовувати дросельний пристрій, який працює у режимі розвинутої кавітації. Оцінено ефективність дросельних кавітаційних генераторів на основі їх витратно-перепадних характеристик. Визначено інкубаційний період конструкційних матеріалів, які широко використовуються у гідромашинобудуванні та їх кавітаційну стійкість. Досліджено швидкість кавітаційної ерозії від перепаду тиску на дросельному пристрої. Запропоновано підвищувати втомну довговічність конструкційних матеріалів шляхом кавітаційної обробки їх поверхні.

**Ключові слова:** кавітація, кавітаційна ерозія, колапс каверн, кавітаційні коливання тиску, дросельний пристрій, втомна довговічність.

**Вступ.** Гідродинамічна кавітація супроводжується інтенсивними високочастотними коливаннями тиску [1,2,3], значним акустичним шумом, та призводить до хибних спрацювань гідравлічних агрегатів, виходу їх з ладу, руйнуванню і зміни властивостей робочої рідини, і викликає кавітаційну ерозію елементів гідравлічної системи. Але кавітацію можна використовувати і в корисних цілях: для випробовування конструкційних матеріалів на кавітаційну стійкість, прискорення ресурсних випробувань гідравлічних пристроїв, очищення поверхонь від забруднень, для гомогенізації чи диспергації різних сумішей, та для підвищення міцності металів, тому необхідно розуміння механізму виникнення кавітації та особливостей перебігу кавітаційної ерозії, а також впливу параметрів рідини на перебіг кавітаційної ерозії.

Для підвищення інтенсифікації ерозійних властивостей кавітаційного струменя, необхідно дослідити механізми кавітаційної ерозії на конструкційні матеріали і вплив різних експлуатаційних факторів на розвиток кавітаційної ерозії. Відомо, що піки високого тиску, які виникають внаслідок колапсу бульбашок викликають пошкодження конструкційних матеріалів. Кавітаційна ерозія спричиняється головним чином за рахунок групового колапсу бульбашок поблизу поверхні твердого тіла [4]. Кавітаційна ерозія залежить від конструктивних і експлуатаційних факторів. Серед цих факторів: геометрія простору навколо кавітаційного струменя, геометрія дросельного пристрою, що генерує кавітацію, час кавітаційної експозиції, відстань від кавітаційного струменя до поверхні, тиск живлення кавітаційного генератора та протитиск у ерозійній зоні, кут між кавітаційним струменем і по верхньою, шорсткість поверхні, в'язкість і температура робочої рідини, вміст розчиненого і нерозчиненого повітря у рідині [5] та ін. На сьогодні існують два механізми

руйнування поверхні внаслідок імплзії від колапсу бульбашок. Це є механізм створення ударної хвилі під час колапсу бульбашки чи хмари і механізм кумулятивного струменя, викликаного окремою бульбашкою. Група авторів [4, 5] наводить дані, що незважаючи на те, що тиск гідроудару може спричинити вдвічі більшу максимальну пластичну деформацію порівняно з ударною хвилею, об'єм удару дуже малий. З іншого боку, ударна хвиля, створена в результаті колапсу бульбашки, може пластифікувати у 800 разів більший об'єм, що призводить до вищої швидкості ерозії.

Окрім мікромасштабної динаміки мікробульбашок, оцінка кавітаційної ерозії поверхонь потребує аналізу великомасштабних гідродинамічних механізмів. В роботі [6] представлено розробку інструменту оцінки ризику ерозії, спричиненої кавітацією, який пов'язує прогнози моделювання багатофазного потоку з інтенсивністю ерозії матеріалу. Розвиток багатофазного потоку в каналі було змодельовано за допомогою моделі стисливої суміші, де зміна фази була представлена за допомогою однорідної моделі релаксації, а розвиток турбулентного потоку було змодельовано за допомогою підходу динамічної структури для симуляції великих вихрів. Автором оцінювався інкубаційний період кавітаційної ерозії за методом накопиченої енергії. Локалізація ерозії відбувалась у дросельному каналі. Але автором не наведено даних про перебіг кавітаційної ерозії поза дросельним каналом. Дослідження локалізації кавітаційної ерозії поза дросельним каналом дозволить ефективно випробовувати конструкційні матеріали на кавітаційну стійкість, та створити ефективну технологію очищення поверхонь від забруднень, емульгування сумішей тощо.

**Метою дослідження** є встановлення впливу параметрів робочої рідини на закономірності перебігу кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів при високонапірному дроселюванні.

**Результати досліджень та їх аналіз.** Одним із факторів, що визначають надійність та довговічність конструкційних елементів гідроприводів є попередження в них ерозійних руйнувань внаслідок високонапірного дроселювання робочої рідини. Тому особливої актуальності набуває вибір ерозійностійких матеріалів елементів конструкції гідроприводів, а також покращення їх кавітаційної стійкості шляхом обробки сплавів змінним магнітним полем високої частоти [7].

У гідроприводах ерозія найчастіше породжується кавернами, що переміщуються, колапс яких супроводжується високочастотними коливаннями тиску [8]. Каверни виникають і руйнуються в міру проходження потоком через зони низького та відновленого тиску. Каверни в дросельних каналах руйнуються відразу за зоною найбільшого стиснення потоку, де тиск починає відновлюватися. Кавітаційна ерозія локалізується в обмеженій зоні малої протяжності.

На противагу – вихрова кавітація, породжена струменевою течією, відрізняється більшою протяжністю, оскільки струмінь ініціює ріст і колапс каверн вздовж усього струменя.

Ерозійний ефект зростає багатогранно, якщо кавітаційні зони першого та другого виду існують одночасно. У першій зоні генеруються первинні каверни, потім процес посилюється внаслідок виникнення вихрових каверн. Приєднані

каверни періодично зриваються від крамок, на яких вони виникають, що породжує появу руйнування поверхні, вже від каверн, що переміщуються.

Класична форма кривої інтенсивності кавітації у функції часу має характерні ділянки рис.1.

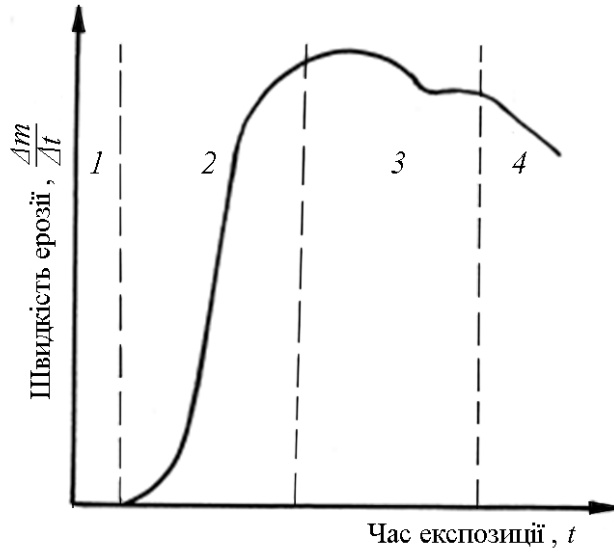


Рис.1. Форма залежності кавітаційної ерозії від часу експозиції:

1 – інкубаційний період; 2 – період накопичення руйнувань; 3 – період постійної швидкості ерозії; 4 – період послаблення швидкості ерозії

Для конструкційних матеріалів гідроприводів особливо важливим є визначення так званого "інкубаційного періоду", коли видимих руйнувань поверхні металу ще немає.

При інкубаційному періоді 1 і періоді накопичення руйнувань 2, ерозія незначна, оскільки потрібен час накопичення пошкоджень. Деякі метали в цей період зазнають періоду зміцнення. Потім ерозія йде із постійною швидкістю (ділянка 3). Поверхня набуває шорсткості. Концентрація напруг зростає та провокує нові руйнування. Є межа швидкості ерозії за часом, після чого швидкість зношування металу зменшується (ділянка 4), що можна пов'язати з виникненням рідинної подушки в зоні кавітаційного зношування, що послаблює дію ударних хвиль.

Кореляція між опором до кавітаційної ерозії та механічними характеристиками матеріалів дуже складна. Такі характеристики, як межа міцності, твердість та ударна міцність не відображають складного комплексу динамічного навантаження при кавітації. Отже, залишається один шлях точного визначення кавітаційної стійкості, шляхом прямого експериментального визначення. Найкращим параметром, який корелює зі стійкістю до кавітаційної ерозії, є відношення межі міцності матеріал до модуля пружності при розтягуванні.

Кавітаційна ерозія визначається насамперед механічними явищами. Однак якщо одночасно діють корозійний та хімічний фактори, то ерозія протікає прискорено. Кавітація та корозія металу доповнюють одна одну. Продукти корозії (окислені плівки), які зазвичай створюють захисний бар'єр, інтенсивно видаляються кавітацією. Газова кавітація постійно насичує зону руйнування киснем, що посилює корозію. Вклад хімічного чинника, проте, обмежений і перевищує 15-20% від загальної втрати металу.

При пошуку нових технологій, пов'язаних із застосуванням кавітаційних струменів, одне з першочергових завдань полягає у отриманні коливань певної частоти та інтенсивності. Основними елементами в отриманні коливань при обробці кавітації є насадки, що працюють в кавітаційному режимі – кавітаційні генератори. Геометрія кавітаційного генератора проста – короткий циліндричний канал чи канал конфузотно-дифузотного типу [9].

За формою енергії, що підводиться – кавітаційні генератори, типові гідравлічні пристрої, оскільки вони використовують енергію тиску потоку робочої рідини. На виході цих пристроїв використовується як кінетична енергія струменів, а й головним чином енергія коливань тиску рідини. Кавітаційний генератор таким чином може бути класифікований як функціональний перетворювач, на вхід якому подається гідравлічна енергія, а на виході знімається енергія хвиль пульсуючого тиску рідини [10].

Для дослідження кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів у якості генераторів кавітаційного потоку було досліджено дросельні пристрої різної конфігурації. На виході цих пристроїв при колапсі каверн використовується не тільки кінетична енергія струменів, але і енергія коливань тиску рідини. Таким чином, дросельний кавітаційний генератор коливань тиску класифікується як функціональний перетворювач, на вхід якому подається гідравлічна енергія, на виході якого генерується енергія хвиль пульсуючого тиску. При виборі геометрії кавітаційного генератора з метою дослідження конструкційних матеріалів на кавітаційну стійкість, генератор має задовольняти таким вимогам: 1) якомога більша частина енергії потоку має бути витрачено на створення кавітації; 2) зона ерозійної дії має бути максимальною.

Про ефективність даних дросельних пристроїв як кавітаційних генераторів коливань тиску можна судити за їх енергетичними витратно-перепадними характеристиками

$(\bar{Q})^2 = f(\bar{p}, \Delta p)$ , де  $(\bar{Q})^2 = \left( \frac{Q}{Q_{розр}} \right)^2$  – квадрат безрозмірної

витрати рідини, що проходить через дросельний пристрій;  $\bar{p}$  – відносний перепад тиску на дросельному пристрої (рис. 2) [6].

Із аналізу наведених енергетичних витратно-перепадних характеристик насадків різних типів випливає, що кавітація наступить раніше у насадку конфузотно-дифузотного типу, потім у насадку Борда, а потім у інших насадків. З цього можна зробити висновок, що насадки конфузотно-дифузотного типу ефективніше перетворюють енергію потоку у кавітаційні коливання тиску, ніж інші дросельні пристрої. Найнижчу кавітаційну потужність має діафрагма, так як кавітація у ній настає в при найбільших значеннях  $\bar{p}$ . На рис. 2 наведено значення стабілізованих витрат, що дозволяє оцінювати енергію, яка підводиться до потоку рідини.

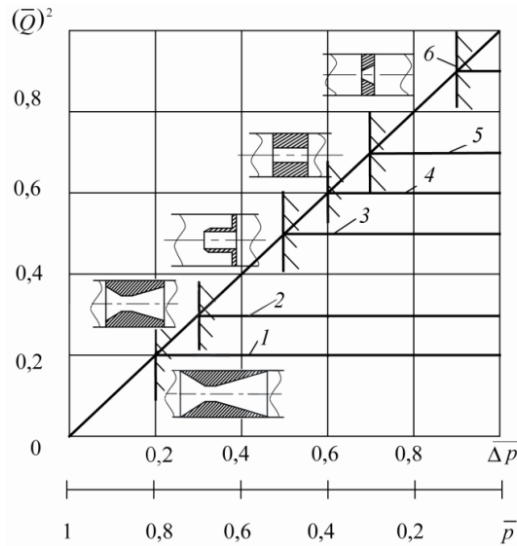


Рис. 2. Енергетичні витратно-перепадні характеристики  $(\bar{Q})^2 = f(\bar{p}, \bar{\Delta p})$  дросельних кавітаційних генераторів (робоча рідина – АМГ-10): 1 – насадок конфузорно-дифузорного типу; 2 – насадок конфузорно-дифузорного типу укорочений; 3 – насадок Борда; 4 – циліндричний насадок; 5 – насадок із прямокутним каналом; 6 – діафрагма

Порівняльний аналіз витратно-перепадних характеристик дросельних пристроїв різних типів показує, що у якості генераторів кавітаційних коливань тиску доцільно використовувати насадки конфузорно-дифузорного типу і циліндричні насадки Вентурі, оскільки вони мають просту конструкцію і невеликий гідравлічний опір.

Скорочений конфузорно-дифузорний насадок відповідає вимогам максимальної зони ерозії. Кавітаційний факел виходить за межі дросельного каналу на торець генератора і локалізація кавітаційної ерозії відбувається за межами дросельного каналу. Обробка таким кавітаційним факелом дослідного зразка дозволяє досягнути високого значення кавітаційної ерозії.

Енергія, що підводиться до потоку із зростанням  $\bar{\Delta p}$  понад критичної величини, витрачається на утворення кавітаційних розривів суцільності. Подальше збільшення перепаду понад  $\bar{\Delta p}_{кр}$  призводить до збільшення довжини кавітаційного факела при постійній витраті рідини. Автомодельність отриманих характеристик за числом Рейнольдса настає з моменту досягнення  $Re = 8000$ .

Енергетичні характеристики генераторів можуть розраховуватись за значеннями коефіцієнтів витрати  $\mu_I$  і  $\mu_{II}$ . Енергія, яка підводиться до потоку при кавітаційному витіканні рідини, складає:

$$N_{під} = p_{вх} Q_{стаб},$$

де  $Q_{стаб}$  – стабілізована кавітаційна витрата.

Із врахуванням того, що при кавітації потужність потоку, що витрачається, складає:

$$N_{кав} = p_{вх} (1 - \bar{\Delta p}_{кр}) Q_{стаб},$$

а при нульовому протитиску витрачається вся енергія, частина кавітаційної енергії дорівнює:

$$\frac{N_{\text{кав}}}{N_{\text{під}}} = \frac{p_{\text{вх}}(1 - \overline{\Delta p}_{\text{кр}})Q_{\text{стаб}}}{p_{\text{вх}}Q_{\text{стаб}}} = 1 - \overline{\Delta p}_{\text{кр}}$$

На підставі розрахунків за даною формулою встановлено, що в дросельному кавітаційному генераторі типу насадок Вентурі для розвитку і підтримки зони кавітації може перетворитись 43% енергії потоку у кавітацію, у генераторі типу конфузотно-дифузотною насадком скороченому типу – 62% енергії потоку, а у генераторі типу повнорозмірний конфузотно-дифузотний насадок – від 62% до 89% енергії потоку, але локалізація кавітаційної ерозії може відбуватись у дросельному каналі.

У якості дослідних зразків при дослідженні кавітаційної ерозії використовувались зразки типу А (рис.3.) з різних металів, виконані у вигляді шайб із зовнішнім діаметром 25 мм, внутрішнім 4 мм і зразки типу Б без отвору з товщиною 0,7...2,0 мм. Робоча площа зразків становила 37,7 мм для типу А.

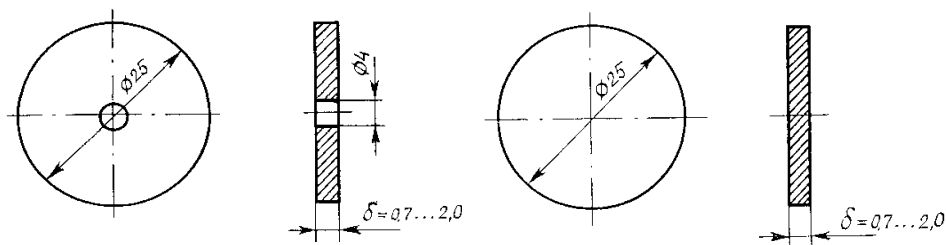


Рис.3. Загальний вигляд експериментальних зразків типу А і типу Б для дослідження кавітаційної ерозії

Дослідні зразки типу А розташовувались безпосередньо у кавітаційній камері (рис. 4.). Струмінь рідини витікає під рівень у затоплений простір, і в зоні зсуву струменя утворює кільцеві вихори.

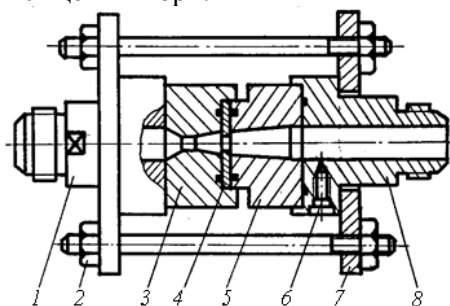


Рис.4. Конструкція кавітаційної камери у вигляді трубки Вентурі;

1 – штуцер підводу рідини; 2 – шпилька; 3 – трубка Вентурі; 4 – дослідний зразок; 5 – хвостовик трубки Вентурі; 6 – приймач статичного тиску; 7 – штуцер відводу рідини

Дослідні зразки попередньо промивались і просушувались у сушильній шафі на протязі 30 хв. при температурі 373 °К, потім зважувались не менше

трьох разів на аналітичних вагах типу АДВ-200. Зважування проводилось до і після випробувань. Випробування проводились за температури 323 °К і робочого тиску 15 МПа. При проведенні експериментів витрата рідини через дросельні пристрої визначалася об'ємним способом за допомогою мірного бака об'ємом 2000 см<sup>3</sup> (ціна поділки 0,1 л.). Час заповнення мірного бака визначався стрілочним секундоміром.

Розгляд отриманих експериментальних результатів почнемо з аналізу кавітаційних руйнувань полірованих поверхонь дослідних зразків зі сплаву Д16АТВ, який використаний в експерименті як модельний матеріал.

Слід зазначити, що сплав Д16АТВ досить м'який та пластичний матеріал, що дозволяє реєструвати кавітаційні кратери від колапсу окремих бульбашок. Таким чином, використання цього матеріалу як модельного, дозволяє візуально судити про характер інтенсивності кавітаційної ерозії.

Зовнішній огляд руйнування дослідних зразків (рис.5) дає підстави припускати, що окремі дефекти і западини розподілені випадковим чином і можуть бути описані за допомогою законів математичної статистики з використанням ПЕОМ. Однак, у нашому випадку доцільно застосовувати ваговий спосіб визначення зміни маси через встановлені інтервали часу кавітаційної експозиції.

Характер поверхні дослідного зразка свідчить про багаторазовий вплив колапсуючих каверн і дрібних бульбашок, що призводить до руйнувань поверхні. Такий характер впливу типовий для гідравлічних мікроударів при колапсі кавітаційної бульбашки. Тиски, що виникають при мікроударах за своєю величиною (судячи з фото) перевищують межі пластичності [11] та міцності поверхневих шарів металу.

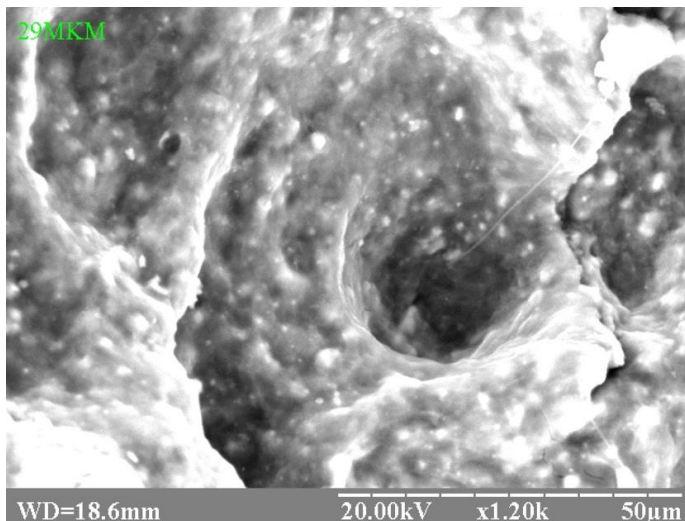


Рис. 5. Кавітаційна ерозія поверхні зрака, виготовленого із сплаву Д16АТВ, 1200-кратне збільшення:  $p_{\text{вх}} = 15$  МПа;  $\overline{\Delta p} = 0,93$ ;  $T_p = 323$  °К;  $t = 15$  хв.; генератор коливань – конфузорно-дифузійний насадок

Практичний інтерес для дослідження кавітаційної ерозії представляє порівняльний аналіз кавітаційної стійкості конструкційних матеріалів, які широко використовуються у гідромашинобудуванні. У якості параметрів оцінки кавітаційної стійкості було вибрано час інкубаційного періоду і швидкість зміни маси матеріалу у період розвинутої кавітації. На основі проведення експериментів побудовано гістограми, представлені на рис. 6, 7.

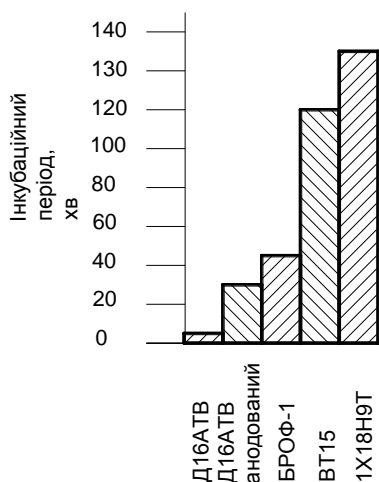


Рис. 6. Порівняльна діаграма інкубаційного періоду сплавів, що найбільш частіше застосовуються у гідромашинобудуванні

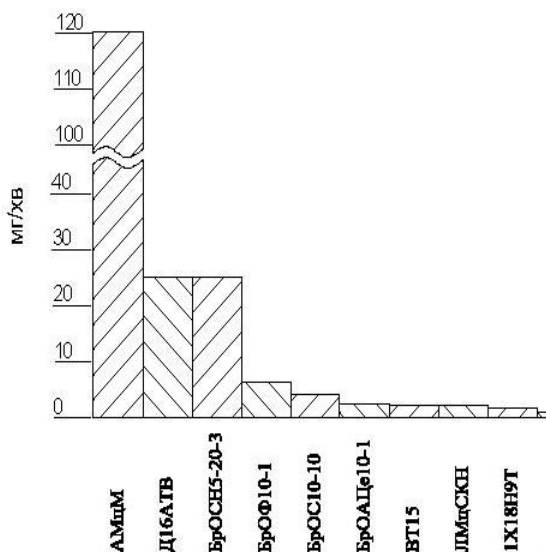


Рис. 7. Діаграма швидкості кавітаційної ерозії сплавів, що широко використовуються у машинобудуванні.

Для досліджуваних матеріалів отримані наступні емпіричні залежності швидкості зміни маси зразків від тиску:

$$\Delta m = a p_{ex}^n,$$

де  $\Delta m$  - зміна маси, мг/год;  $a$  - розмірний коефіцієнт, мг/МПа·год;  $n$  - показник степені;  $p_{ex}$  - абсолютний тиск на вході в насадок, МПа.

Для сплаву Д16АТВ:  $a = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ мг/МПа} \cdot \text{год}$ ;  $n = 4,08$ ; Для сплаву АМцМ:  $a = 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ мг/МПа} \cdot \text{год}$ ;  $n = 4,04$ .

Серед досліджуваних матеріалів найбільшою кавітаційну стійкість має нержавіюча сталь. Це пояснюється подовженим інкубаційним періодом (рис. 6) і структурними особливостями даного сплаву.

Кавітаційна ерозія з плином часу розвивається для пластичних матеріалів майже по лінійній залежності. Причому її інтенсивність залежить від насичення рідини повітрям. При збільшенні тиску насичення рідини газом, кавітаційна ерозія стає менш інтенсивною, при зменшенні тиску насичення газом – пришвидшується (рис.8).

Для металів різної твердості кавітаційна ерозія протікає по різному. Для пластичних матеріалів спостерігається практично лінійна залежність зменшення маси мішені від тривалості кавітаційної експозиції. При збільшенні твердості і

крихкості сплавів спостерігається нелінійна залежність зменшення маси дослідного зразка в залежності від часу кавітаційної експозиції (рис.9).

Кавітаційна ерозія розпочинається із інкубаційного періоду. В цьому періоді метал накопичує деформації від колапсуючих бульбашок. Потім поверхня тіла, найчастіше металева, стає шорсткою, з'являється рельєфність, розвиваються западини і нерівності. При достатньому часі дії кавітації руйнування розповсюджується углиб і може бути навіть наскрізним, що приводить до виходу з ладу відповідальних деталей. Ерозія внаслідок кавітації локалізується в місцях колапсу бульбашок.

Ерозія, в основному, є наслідком механічної дії бульбашок, що колапсують, на метал. Високий локальний тиск, що виникає поблизу колапсу бульбашок приводить до пластичної деформації металу, а потім і до його руйнування внаслідок втоми. Таким чином, початковий період протікання кавітаційної ерозії можна використовувати для обробки конструкційних матеріалів – збільшення їх втомної довговічності. Так група авторів [12] за допомогою лазера створювала кавітаційну область для зміцнення сталі Q235.

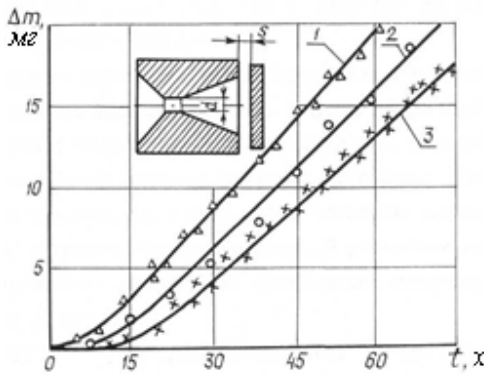


Рис.8. Залежність зміни маси зразків із Д16АТВ від часу експозиції ( $\Delta\bar{p}=0,93$ ; рідина АМГ-10;  $d_f=1,5$  мм;  $S=11$  мм;  $T_p=323^0\text{K}$ ;  $p_{\text{вх}}=15$  МПа): 1 – при вакумуванні  $p_{\text{абс}}=0,05$  МПа; 2 – при атмосферному тиску  $p_{\text{абс}}=0,1$  МПа; 3 – при наддуві  $p_{\text{абс}}=0,2$  МПа

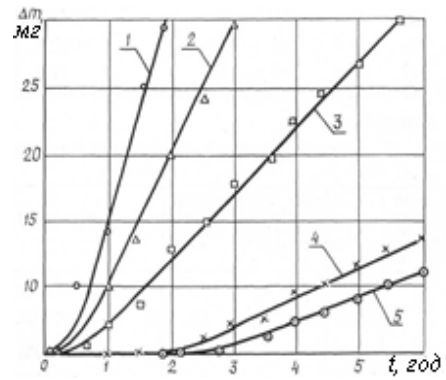


Рис.9. Залежність зміни маси зразків різних сплавів від часу ( $p_{\text{вх}}=15$  МПа,  $\Delta\bar{p}=0,93$ ;  $T_p=323^0\text{K}$ ; рідина АМГ-10;  $p_{\text{нас}}=0,5$  МПа; конфузорно-диффузорний насадок;  $\alpha_k=60^0$ ;  $\alpha_d=16^0$ ): 1 – Д16АТВ; 2 – Д16АТВ анодований; 3 – БРОФ10-1; 4 – ВТ15; 5 – 1Х18Н9Т

Для дослідження втомної довговічності сплаву Д16АТВ у якості зразків були вибрані листи  $300 \times 40 \times 0,8$  мм з циліндричним отвором діаметру 4 мм (рис. 10). Зразки моделювали частину обшивки фюзеляжу літака із отвором під заклепку. Обробці кавітації піддавалася циліндрична поверхня самого отвору і поверхня листа біля отвору. На рис. 11 наведена діаграма залежності значень втомної довговічності зразків з алюмінієвого сплаву Д16АТВ від тривалості їх обробки кавітаційним струменем мінеральної рідини АМГ–10. Ступінь розвитку кавітації складав  $\Delta\bar{p}=0,80$ , а тривалість обробки змінювалася від 15 до 360 с.

Втомна довговічність зразка визначалася за числом циклів навантаження, що викликають його руйнування. Кількість циклів, що відповідають руйнуванню контрольних зразків у стані постачання, виділена горизонтальною прямою.

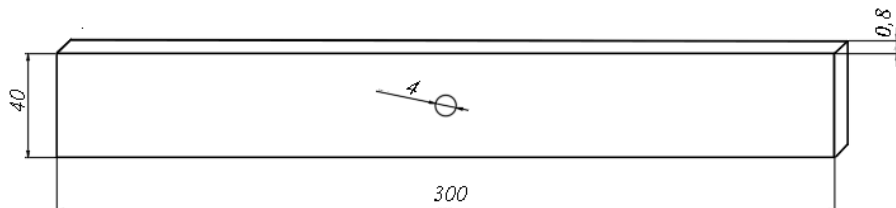


Рис. 10. Дослідний зразок, який імітує обшивку літака

Область отриманих значень втомної довговічності характеризується періодичним зменшенням і збільшенням міцності матеріалу обшивки фюзеляжу літака.

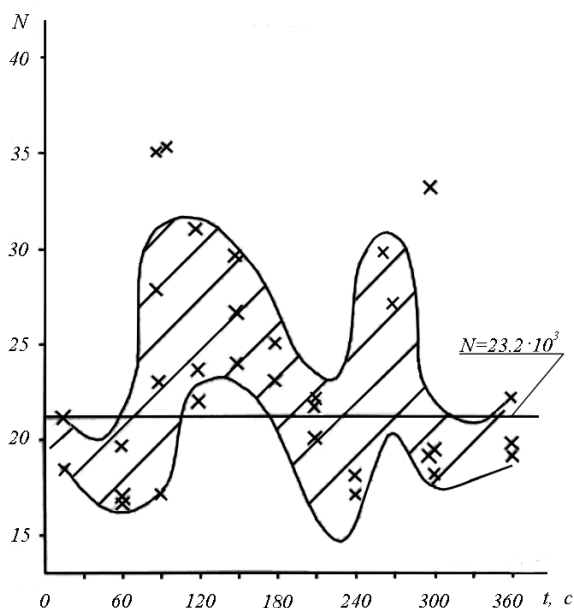


Рис. 11. Залежність втомної довговічності від часу експозиції дослідного зразка

Перший пік збільшення довговічності отримано в діапазоні 90 до 150 с. дії кавітаційного струменя. Візуальний огляд зразків показав відсутність помітних слідів ерозії, а вимірювання мікротвердості підтвердила наявність зміцнення поверхні матеріалу зразка в кільцевій зоні навколо отвору.

Другий пік зміцнення зафіксований після обробки кавітаційним струменем тривалістю близько 270 с. Не дивлячись на наявність незначного ерозійного руйнування поверхні біля отвору зафіксовано зміцнення поверхневого шару матеріалу. Окрім цього гостра кромка отвору – концентратор напруги – округляється.

Подальше збільшення тривалості обробки приводить до руйнування зразків при меншій кількості циклів навантаження. Поверхня металу в зоні дії струменя характеризується значним ерозійним зношуванням.

Таким чином, ерозія матеріалу при кавітації пов'язана зі зменшенням його втомної довговічності.

**Висновки.** Проведені дослідження показали високу ефективність дросельних кавітаційних генераторів коливань тиску.

Встановлено раціональні конфігурації кавітаційних генераторів коливань тиску, це є насадок Вентурі і конфузорно-дифузорний насадок, у них у кавітацію перетворюється від 62% до 89% енергії потоку рідини.

Досліджено залежність кавітаційної ерозії від часу кавітаційної експозиції в залежності від тиску насичення робочої рідини газом. При вакуумуванні баку з робочою рідиною, інтенсивність кавітаційної ерозії збільшується. При збільшенні тиску наддуву бака – інтенсивність кавітаційної ерозії зменшується.

Встановлено інтенсивність розвитку кавітаційної ерозії в залежності від марки конструкційного матеріалу. Для м'яких конструкційних матеріалів розвиток кавітаційної ерозії відбувається майже по лінійному закону. Для твердих конструкційних матеріалів кавітаційна ерозія має нелінійний характер.

Визначено конструкційні матеріали, що мають високу кавітаційну стійкість, які широко застосовуються у гідравлічному машинобудуванні, БрОС10-10, БрОАЦе10-1, ВТ-15, ЛМцСКН, 1Х18Н9Т, ЛМцСКА. Зазначені матеріали використовуються для виготовлення блоків циліндрів аксіально-поршневих насосів, гідравлічної апаратури, напірних трубопроводів.

Встановлено, що початкова стадія кавітації покращує характеристики втомної довговічності конструкційних матеріалів, що використовуються у авіабудуванні.

### Список літератури

1. Тарасенко Т.В. Кавітаційне витікання рідини через дросельний пристрій / Т.В. Тарасенко, В.М. Бадах // *Mechanics and Advanced Technologies* 3 (81), 2017. – С. 82 – 91.
2. Oba, R. and Miyakura, Stochastic behavior (randonness) of acoustic pressure pulsses in the near subcavitating range / R. Oba, X. Miyakura // *Intern. Journal*, pp. 581 – 586, DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1987.30.581>.
3. Тарасенко Т.В. Дослідження локалізації і інтенсифікації кавітаційної ерозії при високонапірному дроселюванні рідини в гідравлічних пристроях / Т.В. Тарасенко, В.М. Бадах // *Проблеми тертя та зношування*. №2 (83) – 2019. С. 93 – 103.
4. Themistoklis M. Cavitation erosion risk assessment for a marine propeller behind a Ro–Ro container vessel / M. Themistoklis, S. Soren, Tom J.C. van Terwisga // *Physics of Fluids*. Vol. 35, Issue 1, January 2023, 013342.
5. Глазков М.М. Кавитация в жидкостных системах воздушных судов / М.М. Глазков, В.Г. Ланецкий, Н.Г. Макаренко и др. КИИГА, Киев, 1987. – 61 с.
6. Magnotti M. Development and validation of the cavitation-induced erosion risk assessment tool / M. Magnotti, M. Battistoni, K. Saha, S. Som // *Transportation Engineering*. Vol. 2, December 2020. 100034.

7. Babutskyi, A. Improvement of cavitation erosion resistance of structural metals by alternating magnetic field treatment / A. Babutskyi, S. Akram, M. Bevilacqua, A. Chrysanthou, D. Montalva, M.J. Whiting, N. Pizurova // *Materials & Design*. Vol. 226, February 2023, 111630.

8. Глазков М.М. Математична модель розмаху кавітаційних пульсацій тиску / М.М. Глазков, В.Г. Ланецький, Т.В. Тарасенко // *Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Авіа - 2007» Том.2. НАУ, Київ.* – С. 60 – 62.

9. Tarasenko, T.V., Badach, O., Puzik, K. (2013), Krayushkina Functional units based on cavitation effects for hydraulic systems of vehicles, *Science / T. Tarasenko, V. Badach, O. Puzik, K. Krayushkina // Future of Lithuania: 16th Conference for Junior Researchers, May 8, 2013, Vilnius, Lithuania*, pp. 50-54.

10. Пилипенко В.В. Кавитационные колебания / В.В. Пилипенко – Київ, Наукова думка, 1989. – 316 с.

11. Joshi S. Sph modelling of a cavitation bubble collapse near an elasto-visco-plastic material / S. Joshi, J. P. Franc, G. Ghigliotti, M. Fivel, // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. Vol. 125, April 2019. p. 420–439.

12. Jiayang G. Study on processing and strengthening mechanisms of mild steel subjected to laser cavitation peening / G. Jiayang, L. Chunhui, M. Pingchuan, X. Xinchao, W. Yue, R. Xudong // *Applied Surface Science*, Vol. 562, October 2021, 150242.

**Тарасенко Тарас Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри гідрогазових систем Національного авіаційного університету, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел/факс: +38 044 408 45 54, E-mail: [nauggs18@ukr.net](mailto:nauggs18@ukr.net). <https://orcid.org/0000-0002-8287-4873>

**Бадах Валерій Миколайович** — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри гідрогазових систем, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел/факс: +38 044 408 45 54, E-mail: [bad44@ukr.net](mailto:bad44@ukr.net). <https://orcid.org/0009-0009-2361-1123>

**Макаренко Микола Григорович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій, дизайну і графіки Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, +38(050)0504727, E-mail: [mykola.makarenko@npp.nau.edu.ua](mailto:mykola.makarenko@npp.nau.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0002-2089-6620>

**Дубковецький Ігор Володимирович** - кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і апаратів харчових виробництв Національного університету харчових технологій, вулиця Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601, +39(098)7191396, E-mail: [dubkov78@ukr.net](mailto:dubkov78@ukr.net). <https://orcid.org/0000-0002-3403-6103>

---

T. V. TARASENKO, V. M. BADAKH, M. G. MAKARENKO, I.V. DUBKOVETSKYY

---

## TESTING OF CONSTRUCTION MATERIALS FOR CAVITATION RESISTANCE

The article presents the results of experimental studies of the cavitation erosion of structural materials widely used in aviation hydraulic drives. The effect of the air saturation of the working fluid on the intensity of the cavitation erosion of structural materials was determined. It is proposed to use as a cavitation generator a throttle device functioning in the mode of developed cavitation when investigating the cavitation resistance of structural materials. The effectiveness of throttle cavitation generators was evaluated based on their flow-difference characteristics. The design of the cavitation chamber for testing structural materials for cavitation resistance is presented. A mechanism of cavitation erosion is proposed, in which the mechanical influence of shock waves and microjets on the surface of the test sample dominates. The incubation period of structural materials that are widely used in hydraulic engineering and their cavitation resistance are determined. The rate of cavitation erosion caused by the supply pressure on the cavitation generator was studied. It was determined that the cavitation erosion of plastic materials occurs almost linearly, while for solid materials the nonlinear dependence is observed. It is proposed to increase the fatigue life of structural materials, which are widely used in aircraft construction, by cavitation treatment of their surface within the incubation period of the cavitation.

**Keywords:** cavitation, cavitation erosion, cavern collapse, cavitation pressure fluctuations, throttle device, fatigue life.

### Referenses

1. Tarasenko T.V. Kavitatsiine vytkannia ridyny cherez droselniy prystrii / T.V. Tarasenko, V.M. Badakh // *Mechanics and Advanced Technologies* 3 (81), 2017. – S. 82 – 91.
2. Oba, R. and Miyakura, Stochastic behavior (randonness) of acoustic pressure pulsses in the near subcavitating range / R. Oba, X. Miyakura // *Intern. Journal*, pp. 581 – 586, DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1987.30.581>.
3. Tarasenko T.V. Doslidzhennia lokalizatsii i intensyfikatsii kavitatsiinoi erozii pry vysokonapirnomu droseliuvanni ridyny v hidravlichnykh prystroiakh / T.V. Tarasenko, V.M. Badakh // *Problemy tertia ta znoshuvannia*. №2 (83) – 2019. S. 93 – 103.
4. Themistoklis M. Cavitation erosion risk assessment for a marine propeller behind a Ro-Ro container vessel / M. Themistoklis, S. Soren, Tom J.C. van Terwisga // *Physics of Fluids*. Vol. 35, Issue 1, January 2023, 013342.
5. Hlazkov M.M. Kavytatsiia v zhydkostnykh systemakh vozdushnykh sudov / M.M. Hlazkov, V.H. Lanetskyi, N.H. Makarenko y dr. KYVHA, Kyev, 1987. – 61 s.
6. Magnotti M. Development and validation of the cavitation-induced erosion risk assessment tool / M. Magnotti, M. Battistoni, K. Saha, S. Som // *Transportation Engineering*. Vol. 2, December 2020. 100034.
7. Babutskyi, A. Improvement of cavitation erosion resistance of structural metals by alternating magnetic field treatment / A. Babutskyi, S. Akram, M. Bevilacqua, A. Chrysanthou, D. Montalvao, M.J. Whiting, N. Pizurova // *Materials & Design*. Vol. 226, February 2023, 111630.
8. Hlazkov M.M. Matematychna model rozmakhu kavitatsiinykh pulsatsii tysku / M.M. Hlazkov, V.H. Lanetskyi, T.V. Tarasenko // *Materialy IKh mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Avia - 2007»* Tom.2. NAU, Kyiv. – S. 60 – 62.
9. Tarasenko, T.V., Badach, O., Puzik, K. (2013), Krayushkina Functional units based on cavitation effects for hydraulic systems of vehicles, *Science* / T. Tarasenko, V. Badach, O. Puzik, K. Krayushkina // *Future of Lithuania: 16th Conference for Junior Researchers*, May 8, 2013, Vilnius, Lithuania, pp. 50-54.

---

10. Pylypenko V.V. Kavytatsyonnye kolebanyia / V.V. Pylypenko – Kyiv, Naukova dumka, 1989. – 316 s.

11. Joshi S. Sph modelling of a cavitation bubble collapse near an elasto-visco-plastic material / S. Joshi, J. P. Franc, G. Ghigliotti, M. Fivel, // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 125, April 2019. p, 420–439.

12. Jiayang G. Study on processing and strengthening mechanisms of mild steel subjected to laser cavitation peening / G. Jiayang, L. Chunhui, M. Pingchuan, X. Xinchao, W. Yue, R. Xudong // Applied Surface Science, Vol. 562, October 2021, 150242.

**Tarasenko Taras Valeriyovych** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydrogas Systems of the National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, phone/fax: +38 044 408 45 54, E-mail: nauogs18@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-8287-4873>

**Valery Mykolayovych Badakh** — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Hydrogas Systems of the National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, phone/fax: +38 044 408 45 54, E-mail: bad44@ukr.net . <https://orcid.org/0009-0009-2361-1123>

**Mykola Hryhorovych Makarenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Technologies, Design and Graphics of the National Aviation University, Lyubomyr Huzar Avenue, 1, Kyiv, Ukraine, 03058, +38(050)0504727, E-mail: mykola.makarenko @npp.nau.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-2089-6620>

**Ihor Volodymyrovych Dubkovetsky** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Apparatus of Food Production of the National University of Food Technologies, Volodymyrska Street, 68, Kyiv, Ukraine, 01601, +39(098)7191396, E-mail: dubkov78@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-3403-6103>