

УДК 62-82:535528

## Дослідження кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів

Тарасенко Т. В., Макаренко Р. О.

Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

*В роботі приведено конструкцію кавітаційної камери для дослідження кавітаційної стійкості конструкційних матеріалів. Запропоновано у якості генератора кавітації використовувати дросельний насадок конфузотно-дифузотного типу, який працює у кавітаційному режимі. Запропонований генератор кавітації використовує енергію потоку і не потребує для генерації кавітації додаткового обладнання. Приведено результати експериментальних досліджень кавітаційної ерозії сплавів, які широко застосовуються у гідромашинобудуванні. Встановлено, що високу кавітаційну стійкість має нержавіюча сталь, сплави латуні і титану. Проведено аналіз способів захисту проточних поверхонь гідравлічних агрегатів від кавітаційної ерозії. Встановлено, що обробка проточної поверхні механічним способом, плазмовим напиленням, нанесенням полімерного захисного шару підвищує кавітаційну стійкість конструкційних матеріалів у декілька разів.*

*Ключові слова:* кавітація; кавітаційна ерозія; гідравлічна система; конструкційні матеріали; кавітаційний генератор.

Гідравлічні системи отримали широке розповсюдження у авіації, енергетиці, машинобудуванні, хімічній промисловості та ін. Характерними особливостями роботи гідравлічних систем є високий тиск, значна витрата робочої рідини, напружений тепловий режим. При дроселюванні потоку рідини із значним перепадом тиску виникає кавітація. Кавітація може виникнути у гідравлічній системі при значних рівнях вібрації, низькому тиску всмоктування насосів, та ін. Кавітація у гідравлічній системі супроводжується високочастотними коливаннями тиску високої інтенсивності, акустичним шумом, деградацією робочих поверхонь гідравлічних агрегатів (кавітаційна ерозія) і деградацією робочої рідини. Ці всі фактори можуть призвести до хибних спрацювань гідравлічних агрегатів, порушення параметрів потоку, суттєвого скорочення ресурсу агрегатів і руйнування гідравлічної системи в цілому.

Одним із факторів, що визначають надійність та довговічність конструкційних елементів гідроприводів є попередження в них ерозійних руйнувань внаслідок дроселювання робочої рідини з великим перепадом тиску. Особливо актуальним є вибір конструкційних матеріалів, стійких до кавітаційної ерозії, та покращення їх стійкості до ерозії шляхом обробки сплавів змінним магнітним полем високої частоти [1], плазмового азотування, дробоструменевої обробки, фрикційного перемішування і покриття поверхні полімерними матеріалами.

Дослідження кавітаційної ерозії здійснюється у кавітаційній камері (рис.1), в якій встановлено генератор кавітації дросельного типу. У якості генератора кавітації використовується конфузотно-дифузотний насадок, який працює у кавітаційному режимі. Генератор кавітації дозволяє перетворювати від 62% до 89% енергії потоку рідини у кавітацію [2].

У якості дослідних зразків для дослідження кавітаційної ерозії використовувались пласкі шайби із зовнішнім діаметром 25 мм, і отвором 4 мм з товщиною 0,7 – 20 мм. 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.

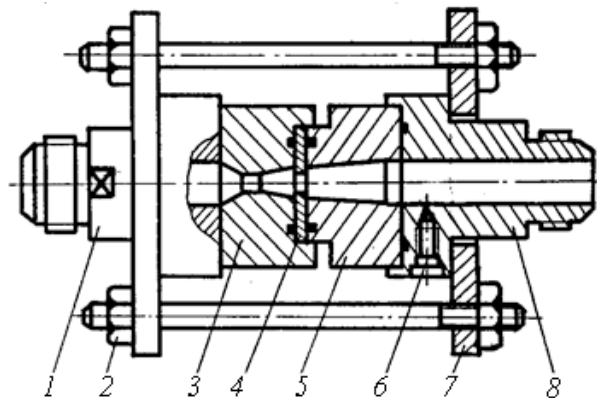


Рис. 1. Конструкція кавітаційної камери з конфузотно-дифузотним насадком:  
1 – штуцер підводу рідини; 2 – шпилька; 3 – конфузотно-дифузотний насадок; 4 – дослідний зразок; 5 – упор; 6 – приймач статичного тиску; 7 – стяжна пластина; 8 – штуцер відводу рідини

Зовнішній огляд руйнування дослідних зразків (рис. 2) 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 (виходячи з фото) перевищують межі пластичності [3] та міцності поверхневих шарів металу.

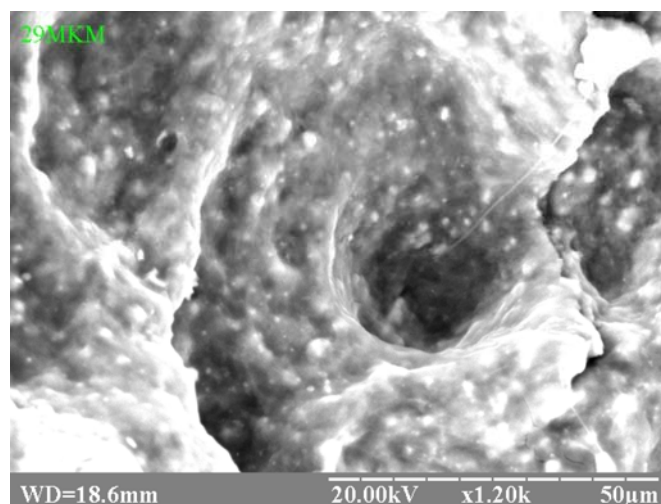


Рис. 2. Кавітаційна ерозія поверхні зрака, виготовленого із сплаву Д16АТВ, 1200-кратне збільшення:  $p_{вх} = 15$  МПа;  $\Delta p = 0,93$ ;  $T_p = 323$  К;  $t = 15$  хв.; генератор коливань – конфузотно-дифузотний насадок

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 [4]. На основі проведення експериментів побудовано гістограми, представлені на рис. 3.

Серед досліджуваних матеріалів найбільшою кавітаційну стійкість мають нержавіюча сталь, титану і латуні. Цей факт пояснюється структурними особливостями даних сплавів. 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 [4].

Для зменшення кавітаційної ерозії елементів гідравлічних агрегатів, поверхні проточних частин необхідно захищати шляхом обробки поверхонь механічним способом чи нанесенням захисного покриття.

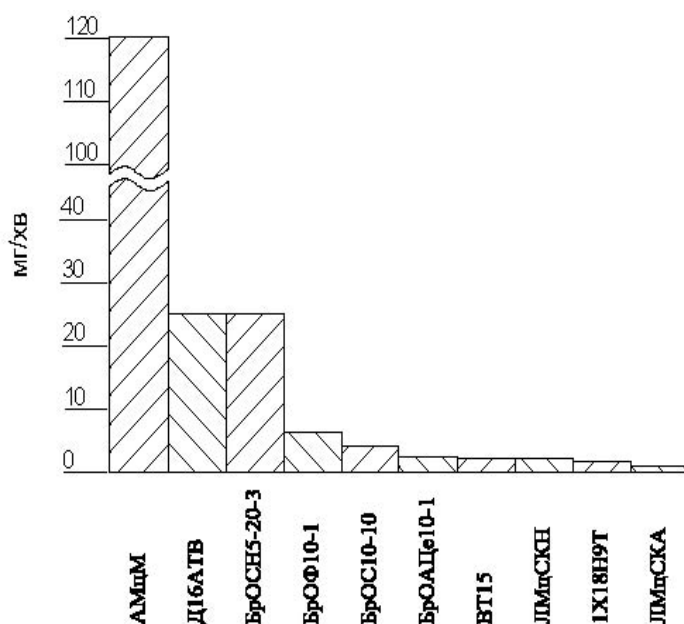


Рис. 3. Діаграма швидкості кавітаційної ерозії сплавів, що широко використовуються у машинобудуванні

Як стверджують автори [5] плазмове азотування може підвищити стійкість до кавітаційної ерозії приблизно вдвічі. Дробоструменева обробка або фрикційне перемішування може підвищити стійкість до кавітаційної ерозії до п'яти разів. Однак така обробка вносить у поверхневий шар напруги стиску, що знижує корозійну стійкість. Тестування в 3,5% розчині NaCl показало погіршення стійкості. Іншими ефективними методами запобігання ерозії є лазерна обробка (покращення від 1,15 разів до приблизно 7 разів), нанесення покриттів PVD (покращення до 40 разів) і покриттів HVOF або HVAF (покращення до 6,5 разів). Показано, що відношення твердості покриття до твердості підкладки також дуже важливе, і для значення твердості, що перевищує порогове значення, стійкість зменшується. Товсте, тверде та крихке покриття або легований шар може погіршити стійкість порівняно з необробленим матеріалом підкладки.

Автори роботи [6] вважають, що доцільно захищати проточні частини агрегатів від кавітаційної ерозії полімерними покриттями. Вони вважають, що існує два фактори, чому органічні полімерні покриття можуть протистояти кавітаційній ерозії: перший фактор полягає в тому, що хімічні властивості полімерних матеріалів нелегко піддаються корозії, і вони можуть утворювати бар'єр між рідиною та захищеними частинами. Другий фактор –



еластична стінка полімерного покриття взаємодіє з кавітаційними бульбашками і буферизує ударні хвилі. Покриття з низьким модулем пружності може буферизувати ударну хвилю, спричинену кавітаційними бульбашками. Але у такого покриття молекулярний ланцюг короткий і він легко розривається під дією ударної хвилі. Такі покриття погано опираються зношенню на ранній стадії кавітаційної ерозії. Покриття з високим модулем пружності мають слабку буферну дію на ударну хвилю при колапсі каверни, через високий ступінь зшивання молекулярного ланцюга і такий ланцюг непросто розірвати при колапсі каверни, тому такі покриття ефективні на ранній стадії ерозії. Чим більша молекулярна маса покриття, тим менша ймовірність руйнування молекулярного ланцюга під час кавітаційного впливу. Але при зростанні часу експозиції перевага високомолекулярного покриття слабшає і починає посилюватись ефект низького модуля пружності. Це можна пояснити тим, що енергія від колапсу каверни поглинається пружною деформацією покриття. Чим менший модуль пружності, тим більша пружна деформація буде створена і тим більше енергії буде поглинуто покриттям.

Для захисту проточних поверхонь гідравлічних систем від кавітаційної ерозії, необхідно обирати матеріали із високою стійкістю до кавітаційної ерозії і захищати проточні поверхні захисними покриттями різних типів в тому числі полімерними.

### Список літератури

1. 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.
2. Тарасенко Т.В. Випробування конструкційних матеріалів на кавітаційну стійкість / Т. Тарасенко, В. Бадах, М. Макаренко, І. Дубковецький // *Проблеми тертя та зношування* 2(103) – 2024. – с. 4-15.
3. 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.
4. 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.
5. A.K. Krella Degradation and Protection of Materials from Cavitation Erosion: A Review / A.K. Krella // *Materials* 2023, 16(5), 2058; <https://doi.org/10.3390/ma16052058>
6. Y. Wang Experiment investigation on effects of elastic modulus on cavitation erosion of silicone rubber / Y. Wang, Z. Li, L. Tian, Z. Shang // *Ultrasonics Sonochemistry*, 05 Jan 2023, 93:106290 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106290> PMID: 36634412 PMCID: PMC9841055

### Research into cavitation erosion of structural materials

**Tarasenko Taras; Makarenko Ruslan**

*The work presents the design of a cavitation chamber for studying the cavitation resistance of structural materials. It is proposed to use a choke nozzle of the confuser-diffuser type, which operates in the cavitation mode, as a cavitation generator. The proposed cavitation generator uses flow energy and does not require additional equipment to generate cavitation. The results of experimental studies of cavitation erosion of alloys widely used in hydraulic engineering are presented. It has been established that stainless steel, brass and titanium alloys have high cavitation resistance. An analysis of methods for protecting the flow surfaces of hydraulic units from cavitation erosion has been carried out. It has been established that mechanical treatment of the flow surface, plasma spraying, and application of a polymer protective layer increases the cavitation resistance of structural materials several times. A polymer coating with a low modulus of elasticity buffers the shock wave well.*

Keywords: cavitation; cavitation erosion; hydraulic system; structural materials; cavitation generator.