УДК 620.193532.528
DOI: 10.62717/2221-4550-2025-1-109

Склярський І.А.
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: igor.sklyarskiy21@gmail.com

Санін А.Ф.
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: sanin_a@365.dnu.edu.ua

ВПЛИВ ЕРОЗІЙНОЇ КАВІТАЦІЇ НА МАТЕРІАЛИ

Анотація. У роботі розглянуто механізм ерозійної кавітації та її вплив на матеріали гідродинамічного обладнання та ракетно-космічної техніки. Наведено порівняння стійкості різних матеріалів, зокрема традиційних та сучасних, до кавітаційного руйнування. Обговорено перспективи використання зносостійких матеріалів та покриттів для підвищення довговічності деталей, що працюють у складних гідродинамічних умовах.

Ключові слова: кавітація, ерозія, матеріали, титанові сплави, алюмінієві сплави, композити, насоси, гідродинаміка, РКТ.

I. Sklyarskyi
Oles Honchar Dnipro National University
E-mail: igor.sklyarskiy21@gmail.com

A Sanin
Oles Honchar Dnipro National University
E-mail: sanin_a@365.dnu.edu.ua

THE IMPACT OF EROSIVE CAVITATION ON MATERIALS

Abstract. The paper examines the mechanism of erosive cavitation and its impact on materials used in hydrodynamic equipment and rocket-space technology. A comparison is provided of the cavitation resistance of various materials, including traditional ones and modern ones. The prospects of using wear-resistant materials and coatings to improve the durability of components operating under severe hydrodynamic conditions are discussed.

Keywords: cavitation, erosion, materials, titanium alloys, aluminum alloys, composites, pumps, hydrodynamics, RST.

Виготовлення матеріалів для ракетно-космічної техніки (РКТ) потребує високих стандартів надійності та стійкості до складних експлуатаційних умов, серед яких особливе місце займає вплив ерозійної кавітації. Саме тому дослідження механізмів кавітаційного зношування та підбір матеріалів із підвищеною стійкістю до цього виду руйнування є актуальними для забезпечення довговічності вузлів РКТ та іншого гідродинамічного обладнання.

Кавітація є одним із найпоширеніших і найнебезпечніших явищ у гідродинамічних системах, що може призводити до серйозного пошкодження обладнання. Вона виникає через утворення й подальший колапс кавітаційних бульбашок у рідкому середовищі, що супроводжується локальними гідроударними навантаженнями. Особливо

руйнівним є вплив ерозійної кавітації, коли повторювані удари спричиняють пластичну деформацію, утворення мікротріщин і поступове руйнування матеріалу.

Ерозійна кавітація є серйозною проблемою для насосів, гідротурбін, суднових гвинтів та інших елементів, що працюють у складних умовах гідродинамічного навантаження. Внаслідок цього обладнання швидко зношується, що призводить до підвищених витрат на ремонт та обслуговування.

Актуальність цієї проблеми зростає у зв'язку з постійним збільшенням вимог до надійності та довговічності гідравлічного обладнання. Зношування, спричинене кавітацією, може значно скорочувати термін служби матеріалів, що особливо критично для промислових і енергетичних секторів. Тому вивчення механізмів ерозійної кавітації та розробка ефективних методів її мінімізації є важливими завданнями для інженерів та дослідників.

Механізм виникнення ерозійної кавітації базується на гідродинамічному законі Бернуллі зі зростанням швидкості потоку статичний тиск може знижуватися до рівня, нижчого за тиск насиченої пари, що спричиняє утворення кавітаційних бульбашок. Вони транспортуються потоком у зони підвищеного тиску, де схлопуються, генеруючи локальні удари з тиском у десятки тисяч атмосфер та температурою до кількох тисяч градусів Кельвіна

Руйнування матеріалу відбувається через:

— гідродинамічні мікрострумені, що формуються при несиметричному схлопуванні бульбашки;
— ударні хвилі, які утворюються при симетричному схлопуванні;
— втомне руйнування матеріалу через циклічні удари мікроструменів.

Для оцінки інтенсивності кавітаційного пошкодження використовують індекс кавітаційного руйнування. Якщо його значення перевищує критичне для матеріалу, починається ерозійний знос.

На початкових етапах відбувається пластична деформація поверхневого шару матеріалу, далі утворюються мікротріщини, що призводить до ламкого руйнування поверхні та втрати маси через винос частинок матеріалу.

Чутливість матеріалів до кавітаційної ерозії залежить від їхньої мікроструктури, механічних властивостей і здатності чинити опір ударним навантаженням. Білий чавун із високим вмістом хрому має високу твердість, але водночас схильний до мікротріщин і ламкого руйнування. Нержавіюча сталь демонструє кращу стійкість завдяки комбінації пластичності та корозійної стійкості. Леговані бронзи та латуні мають високі демпфуючі властивості, зменшуючи ризик руйнування, а тверді сплави на основі карбідів забезпечують максимальну зносостійкість, хоча й залишаються вразливими до раптового руйнування.

Таким чином, вибір матеріалів для роботи в умовах кавітаційного навантаження має враховувати баланс між твердістю, пластичністю та ударною в'язкістю. Покращення мікроструктури, оптимізація гідродинамічного режиму та застосування зносостійких покриттів є перспективними напрямами продовження терміну служби деталей насосів, трубопроводів та елементів РКТ.

Окрім традиційних матеріалів, у ракетно-космічній техніці все ширше застосовуються титанові (наприклад, Ti-6Al-4V) та алюмінієві сплави (7075, 6061), а також композити на основі полімерних і керамічних матриць. Титанові сплави мають високу питому міцність і корозійну стійкість, але схильні до утворення мікротріщин під дією локальних гідроударів. Алюмінієві сплави демонструють кращу пластичність, але мають нижчу твердість, що робить їх більш вразливими до кавітаційного зносу. Композити,

особливо керамічні, мають високу зносостійкість, але можуть бути крихкими, що обмежує їхнє застосування у вузлах з інтенсивним гідродинамічним навантаженням.

Список використаних джерел

1. Brennen, C.E. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, 1995.
2. Knapp, R.T., Daily, J.W., Hammitt, F.G. Cavitation. McGraw-Hill, 1970.
3. Franc, J.-P., Michel, J.-M. Fundamentals of Cavitation. Kluwer Academic Publishers, 2004.
4. Kato, H. Cavitation phenomena in materials Mechanisms and effects. Wear, 2000, 233-235, 211-219.
5. Chahine, G.L., Hsiao, C.T. Modelling cavitation erosion using fluid–structure interaction. Journal of Fluids Engineering, 2015, 137(1), 010801.