

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНІЦІЙОВАНОГО РУЙНУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Є. Т. Бурдун, проф., канд. техн. наук;
С. В. Копійка, доц., канд. техн. наук

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розроблено стенд для експериментального дослідження динамічних процесів руйнування матеріалів плавучості глибоководних технічних засобів методом акустичної емісії при одночасному впливі гідростатичного тиску 0...160 МПа та ударної хвилі від дії високовольтного електричного розряду.

Ключевые слова: блок плавучості, сферопластик, прогнозування, експлуатаційні параметри, міцність при гідростатичному стисканні, експеримент.

Анотация. Разработан стенд для экспериментального исследования динамических процессов разрушения материалов плавучести глубоководных технических средств методом акустической эмиссии при одновременном действии гидростатического давления 0...160 МПа и ударной волны от высоковольтного электрического разряда.

Ключові слова: блок плавучості, сферопластик, прогнозування, експлуатаційні параметри, міцність при гідростатичному стисканні, експеримент.

Abstract. Apparatus for experimental researches of the dynamic damaged buoyancy composite materials for underwater technical means under a hydrostatic pressure of 0...160 MPa and the action of high-voltage discharge's shock wave is investigated.

Keywords: buoyancy block, sphere plastic, forecasting, performance parameters, resistance during hydrostatic compression, experiment

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сферопластики як матеріали плавучості є необхідними елементами глибоководних технічних засобів. До основних експлуатаційних характеристик сферопластиків належать: гідростатична міцність, уявна густина матеріалу, рівень водопоглинання. Підвищення конкурентоздатності виробленого сферопластику потребує вирішення двох основних задач. Перша — підвищення його гідростатичної міцності та зниження водопоглинання шляхом покращання механічних властивостей складових, друга — зниження його уявної густини. Гідростатична міцність визначає для сферопластиків

максимальну глибину експлуатації та є найбільш дослідженою характеристикою [1, 6]. Уявна густина сферопластику, що використовується при проектуванні блоків плавучості, в даній роботі залишена поза увагою. Водопоглинання вважається визначальною характеристикою при розрахунку ресурсу роботи сферопластиків та призначенні запасів міцності. Зважаючи на обмежену кількість робіт з вивчення водопоглинання сферопластиків, останнє вибрано об'єктом дослідження.

При експлуатації блоків плавучості вода поступає в масив полімерного сполучного за рахунок набухання смоли та проникає в

порожнини, що утворилися при руйнуванні мікросфер. Кількість сполучного в сферопластику складає не більше 40 % за об'ємом [4], максимальне поглинання води полімерними матрицями — 1...2 % [1], тому загальна кількість води у сполучному сферопластику може становити не більше 0,4...0,8 % за об'ємом і є невеликою в порівнянні з об'ємом води, який накопичується у матеріалі за рахунок пошкодження мікросфер. Найбільшу увагу слід приділити саме руйнуванню мікросфер.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Експериментальні та теоретичні роботи щодо характеристик композиційних матеріалів зі сферичними включеннями представлені досить широко [5]. Результати цих досліджень змінювалися з розвитком структури та властивостей сферопластиків. Прикладом експериментального вивчення є робота [11], в якій емпіричним шляхом визначено основні характеристики блоків плавучості зі сферопластику з фенольним сполучним. Унаслідок значної густини сполучного такі сферопластики сьогодні вже не використовуються, тому робота має в основному історичне значення. У роботі [2] експериментально досліджено вплив експлуатаційних факторів, зокрема глибини експлуатації, тривалості експлуатації, на залишкові значення характеристик матеріалів блоків плавучості, таких, як густину матеріалу плавучості, гідростатичну міцність, водопоглинання. Загальні методики експериментального вивчення властивостей матеріалів плавучості описані в [3, 8].

Одна з проблем дослідження сферопластиків — вивчення їх лавиноподібного руйнування під дією гідростатичного тиску рідини. Попередні результати [4] показують, що випадкове руйнування окремої сфери проходить дуже швидко, за рахунок втрати стійкості скляної стінки, а також супроводжується поширенням ударної хвилі пружності.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ — розробка випробувального апаратного комплексу та методики експерименту, що впливає з необхідності оперативного вивчення динамічних

процесів при руйнуванні сферопластиків та визначення їх експлуатаційних характеристик. Для виконання умов дослідження комплекс повинен забезпечити такі параметри: підтримку гідростатичного тиску в області зразка сферопластику, ініціювання процесу руйнування окремих сфер, фіксацію процесу вторинного руйнування сфер під дією ударної хвилі.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Гідростатичний тиск рідини створюється пресом за допомогою сталеві камери та штока. Зовнішній діаметр камери — 120 мм, діаметр штока — 25 мм, висота циліндричного каналу — 170 мм. Робочою рідиною може бути мінеральне масло, дистильована чи морська вода. Для контролю тиску використовується технічний манометр 0...160 МПа. Максимальний експлуатаційний тиск у гідростатичній камері становить 160 МПа, що відповідає глибини занурення зразка сферопластику на 16 км. До камери приєднано датчик тиску на базі манометра із чутливим елементом у вигляді тензодатчиків. Таким чином, при навантаженні камери датчик утворює електричний сигнал, пропорційний гідростатичному тиску в зоні випробувань. Датчик тиску працює в комплекті з тензо-станцією Топаз 3-01, яка є джерелом живлення датчика, комутує та підсилює електричні сигнали від тензодатчиків. Підсилений сигнал від датчика тиску подається на самопис для реєстрації значення тиску рідини. Схема випробувальної камери представлена на рис. 1.

Система імітації ударної хвилі для ініціювання руйнування сфер побудована на принципі високовольтного електричного розряду в діелектричній рідині. Унаслідок розряду в рідині утворюється ударна хвиля, аналогічна хвилі від руйнування сфери [7, 10]. Параметри розряду були оптимізовані виходячи з вимог до експерименту та обмежень обладнання.

Енергія, що виділяється при руйнуванні сфери радіусом r під дією гідростатичного тиску p , $Q_r = 2\pi pr^3$. Зважаючи на те, що при руйнуванні сфери енергія ударної хвилі діє

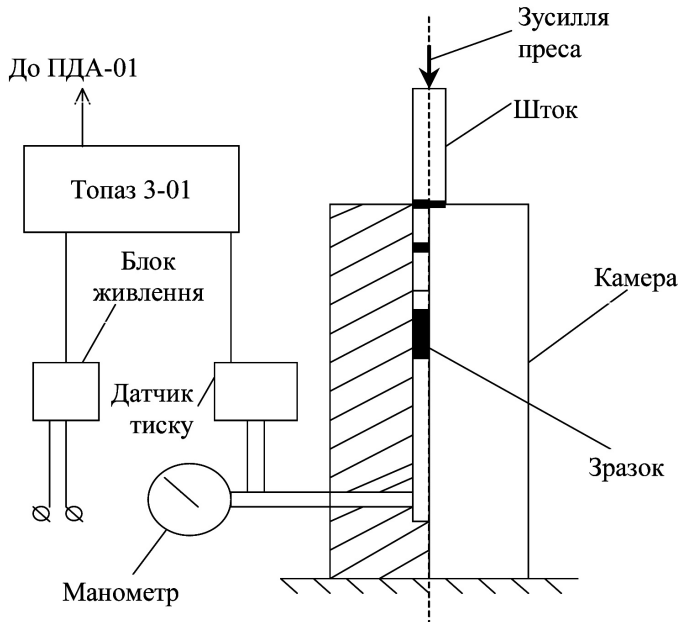


Рис. 1. Гідростатична камера

безпосередньо на границі порожнини, яка залишається в сферопластику, питома енергія рівномірно розподіляється по сферичній поверхні S з радіусом r :

$$q = \frac{Q_r}{S} = p \frac{r}{2}$$

Енергія, що виділяється внаслідок електричного розряду конденсатора з ємністю C , напруженням U , $Q_E = U^2 C / 2$ [9]. Питома енергія рівномірно розподіляється по сферичній поверхні фронту хвилі та на відстані L від центру розряду, з врахуванням коефіцієнта корисної дії (ККД) η

$$q_E = \frac{\eta Q_E}{S} = \frac{\eta U^2 C}{8\pi L^2}$$

Адекватність заміни механічного руйнування на електричний процес забезпечується рівністю питомої енергії ударної хвилі в обох процесах $q = q_E$ у момент початку дії на масив сферопластику:

$$\frac{\eta U^2 C}{8\pi L^2} = p \frac{r}{2}$$

Це дає можливість розрахувати відстань від точки розряду до поверхні сферопластику

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{CU^2\eta}{\pi pr}}$$

Для умов руйнування сфери з радіусом $5 \cdot 10^{-5}$ м під дією тиску 100 МПа, умов моделювання $C = 8$ мкФ, $U_{розр} = 1000$ В, $\eta = 0,6$ (ККД взято згідно з [7]) необхідна відстань від точки розряду до поверхні сферопластику $L = 8,7 \cdot 10^{-3}$ м = 8,7 мм. У конструкції розрядника, зважаючи на неточність визначення розміру зруйнованих сфер, прийнято $L = 10$ мм.

Як елемент для накопичення енергії використовувався електричний конденсатор ($C = 8$ мкФ, $U_{max} = 2000$ В). Для отримання «короткого» електричного розряду (час на рівні десятків мікросекунд) була застосована імпульсна розрядна лампа. Для введення електричного струму розряду в гідростатичну камеру застосовано спеціально розроблений герметичний ввід, що розрахований на максимальний електричний потенціал 5 кВ.

Розрядний пристрій, розташований поблизу від зразка в гідростатичній камері, являє собою два співвісні латунні електроди з радіусом закруглення робочої частини 2 мм. Відстань між електродами вибрана експериментально для рідини розряду – мінерального масла – та становила 0,1 мм. При збільшенні відстані спостерігається різке зростання мінімального потенціалу розряду (що зменшує діапазон регулювання енергії

розряду) та збільшується час розряду. При відстані менше за 0,1 мм катастрофічно зростає зношуваність електродів. У зв'язку зі зношуваністю робочих поверхонь електродів розрядний зазор під час експерименту періодично повинен корегуватися різьбовим з'єднанням одного з електродів. Розрядний пристрій ізольовано від середовища випробувальної камери тонкою гумовою мембраною товщиною 10 мкм, яка практично не поглинає енергію ударної хвилі, що дозволяє довільно вибирати рідину випробувань у гідростатичній камері. Регулювання енергії вибуху (імітація зміни глибини вибуху) проводиться за рахунок зміни електричного потенціалу розряду та відстані до об'єкта дослідження. Принципову схему системи імітації ударної хвилі показано на рис. 2.

Аналіз динамічних процесів руйнування мікросфер зразка можливий за допомогою методу акустичної емісії (АЕ) [1]. Він передбачає приймання, посилення та обробку акустичних сигналів від поширення хвиль пружності, що утворилися внаслідок руйнування окремих

сфер. Із цією метою в складі стенда застосовується прилад АФ-15 з двома каналами приймання сигналу в діапазоні 20...2000 кГц. Він дозволяє після приймання сигналу визначити інтенсивність емісії, тобто кількість акустичних сигналів в одиницю часу (це відповідає кількості зруйнованих мікросфер в одиницю часу), отримати електричний сигнал, пропорційний поточному значенню інтенсивності емісії, в цифровому й аналоговому вигляді для подальшої фіксації та обробки зовнішніми засобами. Згідно з попередніми дослідженнями з'ясовано, що частота коливань сигналу акустичної емісії від руйнування мікросфер у сферопластику лежить у межах 100...500 кГц [4]. Тому настроювання приладу проводиться для вказаного частотного діапазону. Настроювання дозволяє видалити з акустичного потоку побічні коливання для збільшення точності вимірювань. Для збільшення чутливості методу приймач коливання (п'єзодатчик) встановлюється в гідростатичній камері. Дія гідростатичного тиску на датчик викликає появу постійного електричного потенціалу,

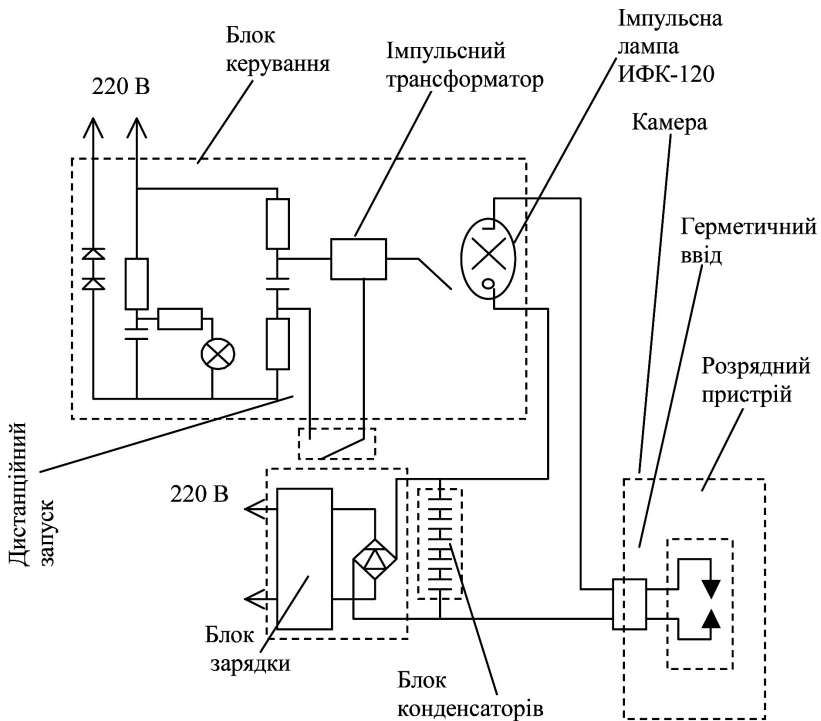


Рис. 2. Схема системи імітації ударної хвилі

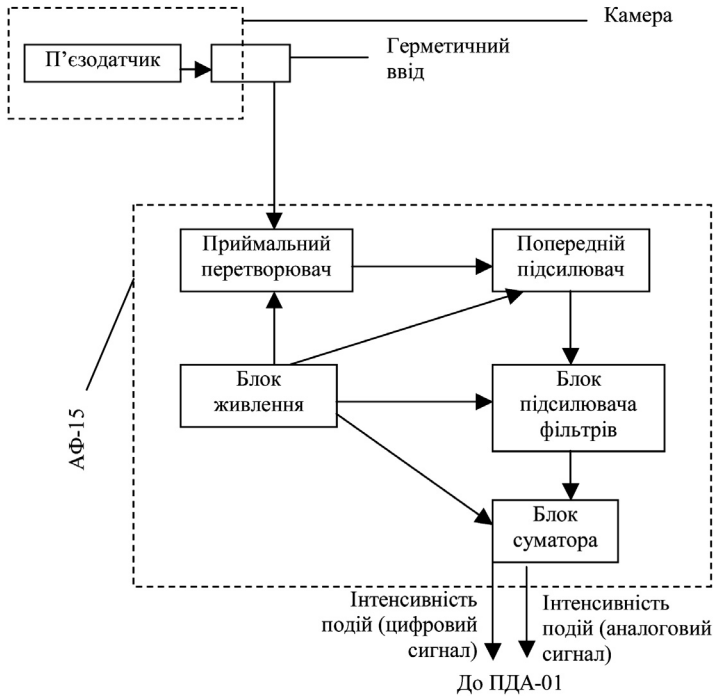


Рис. 3. Функціональна схема приладу акустичної емісії

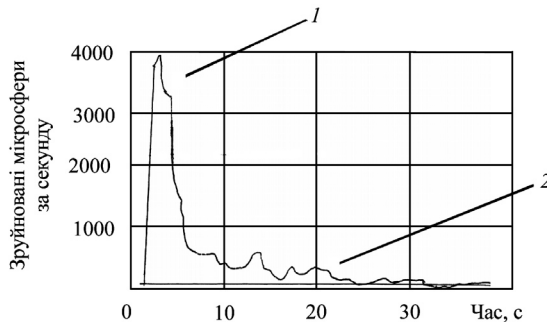


Рис. 4. Динаміка руйнування зразка сферопластику під дією ударної хвилі:
1 — вплив ударної хвилі на зразок; 2 — ділянка згасання процесу руйнування

який може бути видалений з потоку сигналів засобами приладу АФ-15. Коаксіальний електричний кабель від датчика проходить у поздовжньому отворі крізь шток, герметизується та приєднується до приладу. Функціональна схема приладу акустичної емісії представлена на рис. 3.

Для одночасної реєстрації двох параметрів динамічних процесів застосовано аналоговий самопис ПДА-01, який дозволяє на бланку з міліметрової папи отримати діаграми в координатах «тиск–інтенсивність

АЕ», «час–інтенсивність АЕ» та аналогічних. Самопис має можливість виведення масштабованих даних на ПЕОМ.

На рис. 4 як приклад роботи стенда показано діаграму динаміки зміни інтенсивності руйнування мікросфер в умовах гідростатичного тиску 60 МПа під дією електричного розряду з потенціалом 800 В на відстані 10 мм від поверхні зразка сферопластику, виробленого в НУК, що складається з епоксидної смоли УП-3116Б, отверджувача МДФА, мікросфер МСВП-А9 гр. 2.

Діаграма побудована в координатах «інтенсивність АЕ—час». На ній видно основні процеси, що відбуваються при руйнуванні матеріалу: перша ділянка відповідає впливу первинної ударної хвилі на мікросфери, ділянка стабілізації — впливу вторинних хвиль. Поступове зниження інтенсивності АЕ пов'язане з високим коефіцієнтом згасання коливань у полімерних матеріалах, що приводить до швидкого зменшення питомої енергії вторинних ударних хвиль та відповідно зниження із часом частоти руйнування сфер.

ВИСНОВКИ

З метою дослідження динамічних процесів при руйнуванні сферопластиків розроблений випробувальний апаратний комплекс. Він забезпечує такі параметри: підтримку гідростатичного тиску в області зразка сферопластику, ініціювання процесу руйнування окремих сфер, фіксацію процесу вторинного руйнування сфер під дією ударної хвилі.

Перевірка роботи вузлів стенда показала правильність зроблених фізичних та кон-

структивних припущень. Аналіз результатів вимірювань дозволяє визначати розмір ділянки стабілізації та передбачати рівень водопоглинання сферопластику змінного складу в різних умовах експлуатації без довготривалих та дорогих випробувань з визначення поверхневого водопоглинання. За результатами дослідження можна зробити висновок про задовільність стенда, хоча ще не вичерпані всі можливості оптимізації елементів установки. Використання аналогово-цифрового перетворювача з високою частотою обробки інформації в комплекті з ПЕОМ дозволило б докладно вивчити форму одиночного імпульсу та ще більше наблизити дію системи імітації ударної хвилі до реальних процесів руйнування сферопластику.

Уперше отримано можливість дослідження процесів руйнування сферопластиків безпосередньо під впливом експлуатаційних навантажень. Уперше створено апаратну основу неруйнуючих випробувань зразків та конструкцій зі сферопластику при короткостроковому визначенні водопоглинання блоків плавучості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Бурдун Е.Т., Головченко Ю.Б.* Установка акустической эмиссии, применительно к гидростатическим испытаниям композитных материалов // Труды Николаевского кораблестроительного института. — Вып. 188. — Строительная механика корабля. — Николаев: НКИ, 1982. — С. 88–93.
- [2] *Бурдун Е.Т., Титов Г.В.* Влияние эксплуатационных факторов на свойства сферопластиків // Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических сред: Тез. докл. межвузовской науч.-техн. конф. — Николаев: НКИ, 1989. — С. 44–46.
- [3] Влияние длительного гидростатического давления на физико-механические характеристики сферопластиків / В.А. Никитин, И.А. Сазонов, В.Ю. Субботин, Н.Н. Федонюк // Композиционные материалы в конструкциях глубоководной техники: Тез. докл. Всесоюзной науч.-техн. конф. — Николаев: НКИ, 1991. — С. 111–112.
- [4] *Головченко Ю.Б.* Концентрация напряжений в неоднородных средах со сферическими включениями: Дис. канд. физ.-мат. наук; ИПП НАН Украины, 1984. — 197 с.
- [5] *Копійка С.В.* Прогнозування міцності та ресурсу роботи конструкцій плавучості підводних апаратів: Дис. канд. техн. наук; НУК ім. адм. С.О. Макарова; Затверджено президією ВАК 28.04.09, протокол 109-08-1. — Миколаїв, 2008. — 232 с.
- [6] *Кржечковский П.Г.* К механике разрушения сферопластиків // Проблемы прочности. — 1982. — № 2. — С. 110–115.
- [7] *Малюшевский П.П.* Источник генерируемых электрическим разрядом жидкостных струй // Электрический разряд в жидкости и его применение. — К.: Наукова думка, 1977. — С. 26–34.

- [8] *Титов Г.В., Бурдун Е.Т.* Экспериментальное определение ресурса сферопластика ЭДС-7А // Композиционные материалы в конструкциях глубоководной техники: Тез. докл. Всесоюзной науч.-техн. конф. — Николаев: НКИ, 1991. — С. 142–143.
- [9] *Толстых А.Б.* Исследование возможности тонкого измельчения электропроводящих материалов электрогидравлическим способом // Электрический разряд в жидкости и его применение. — К.: Наукова думка, 1977. — С. 157–165.
- [10] *Шишалов Ю.П., Айзен Б.М.* О расчете упругих сферических оболочек на устойчивость // Строительная механика и расчет сооружений. — 1983. — № 3. — С. 37–41.
- [11] *Okuno K., Woodhams R.T.* Mechanical Properties and Characterization of Phenolic Resin Syntactic Foams // Journal of CELLULAR PLASTICS. — September/October, 1974. — P. 237–244.