НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА НАН УКРАЇНИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник директора
Фізико-механічного інституту
ім. Г.В.Карпенка з НР

_____ Мирослав ХОМА
"09" _____ 2026 р.

Інструкція з експлуатації модернізованої корозійно-втомної установки УРТ-10М

Зав. відділом корозії
та протикорозійного захисту

_____ Сергій КОРНІЙ

Львів — 2026

1. Призначення установки

Модернізована випробувальна установка УРТ-10М призначена для дослідження кінетики поширення втомних тріщин у конструкційних матеріалах на плоских малогабаритних зразках при пульсуючих циклічних навантаженнях за постійного значення коефіцієнта інтенсивності напружень у її вершині в умовах дії водних корозійних середовищ без та з додаванням інгібіторів корозії.

Частота навантаження ─ 1-10 Гц

Потужність електродвигуна постійного струму ─ 500 Вт

Об'єм робочої камери ─ 200 см²

Габаритні розміри установки: довжина ─ 700 мм; ширина ─ 650 мм; висота ─ 1300 мм

2.Механічна частина установки

Механічна частина установки УРТ-10М призначена для нерухомого закріплення нижнього кінця досліджуваного зразка, створення заданого циклічного навантаження шляхом консольного згину зразка, реєстрації довжини тріщини, що розвивається в зразку під час циклічного навантаження, та підрахунку кількості циклів навантаження. Основними елементами механічної частини установки є нижній нерухомий затискач для закріплення зразка, приводний механізм циклічного переміщення його вільного кінця, електродвигун, конструкційні елементи передавання руху, пристрій для вимірювання амплітуди переміщення вільного кінця зразка та лічильник циклів навантаження.

2.1. Зразок для дослідження кінетики підростання тріщини

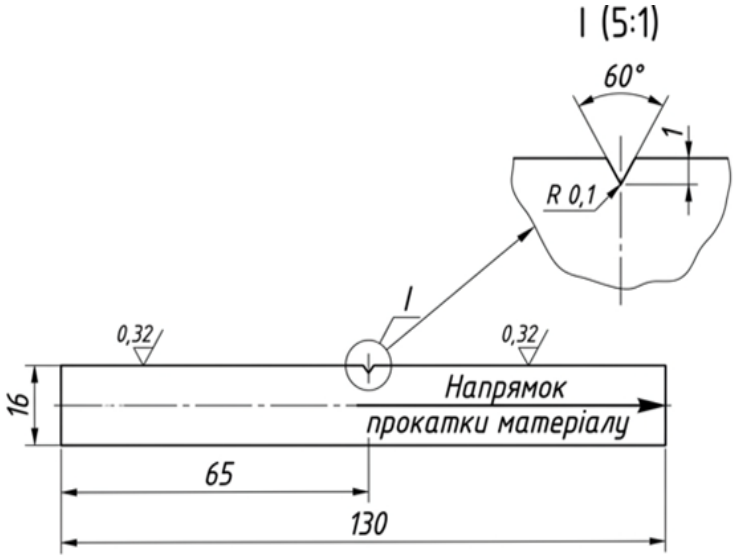


Рис. 1. Креслення зразка для корозійно-втомних досліджень на установці УРТ-10М

Геометричні параметри зразка для проведення корозійно-втомних досліджень наведено на рис. 1. Для дослідження кінетики росту втомної тріщини за циклічного навантаження використовують плоский пластинчастий зразок, виготовлений з алюмінієвого сплаву. Зразок має прямокутну форму, загальну довжину 130 мм, ширину 16 мм і товщину 5 мм згідно з наведеним кресленням. Довжина робочої ділянки становить 65 мм. У центральній частині робочої ділянки зразка передбачено початковий надріз для ініціювання тріщини. Надріз має V-подібну форму з кутом розкриття 60° та радіусом заокруглення у вершині 0,1 мм. Положення надрізу визначає початкову точку розвитку втомної тріщини під час циклічного навантаження. На кресленні також зазначено напрямок прокатки матеріалу, який необхідно враховувати під час виготовлення та встановлення зразка. Поверхні зразка мають бути оброблені відповідно до вимог креслення, із зазначеною шорсткістю 0,32 мкм. Зразок закріплюють у затискачах установки таким чином, щоб під час циклічного консольного згину забезпечувалися задані умови навантаження та можливість вимірювання довжини тріщини в процесі її поширення.

2.2. Установка УРТ-10М для дослідження росту втомних тріщин

Випробувальна установка розміщена на сталевій станині розмірами 440х680 мм^2. Схема установки для дослідження росту втомних тріщин приведена на рис. 2. Привід машини здійснюється від двигуна постійного струму 1 типу П-21 з незалежним збудженням.

Фіксація втулки здійснюється опорною гайкою, а болти слугують для регулювання ексцентрика 2 під час встановлення амплітуди деформації. Вказівник величини відхилення осі розташований на ободі втулки і ексцентрика 2. За допомогою важеля 4 приводиться в рух планшайба 7, до якої приєднується рухомий верхній захват 8. Нижній нерухомий захват 10, динамометр і втулка, наглухо з’єднані між собою, разом із електродвигуном 1 кронштейном підшипника обертання планшайби 7 встановлені на базовій плиті. Закріплений у захватах зразок 9 піддається згину шляхом повертання планшайби навколо осі, яка проходить через геометричний центр зразка. Циклічне деформування експериментальних зразків здійснюється в основному при зміні навантаження від нуля до максимального значення, тобто у нульовому циклі. Частота циклічного навантаження задається частотою обертання рухомого валу двигуна постійного струму. Задана асиметрія циклу досягається зміною довжини важеля.

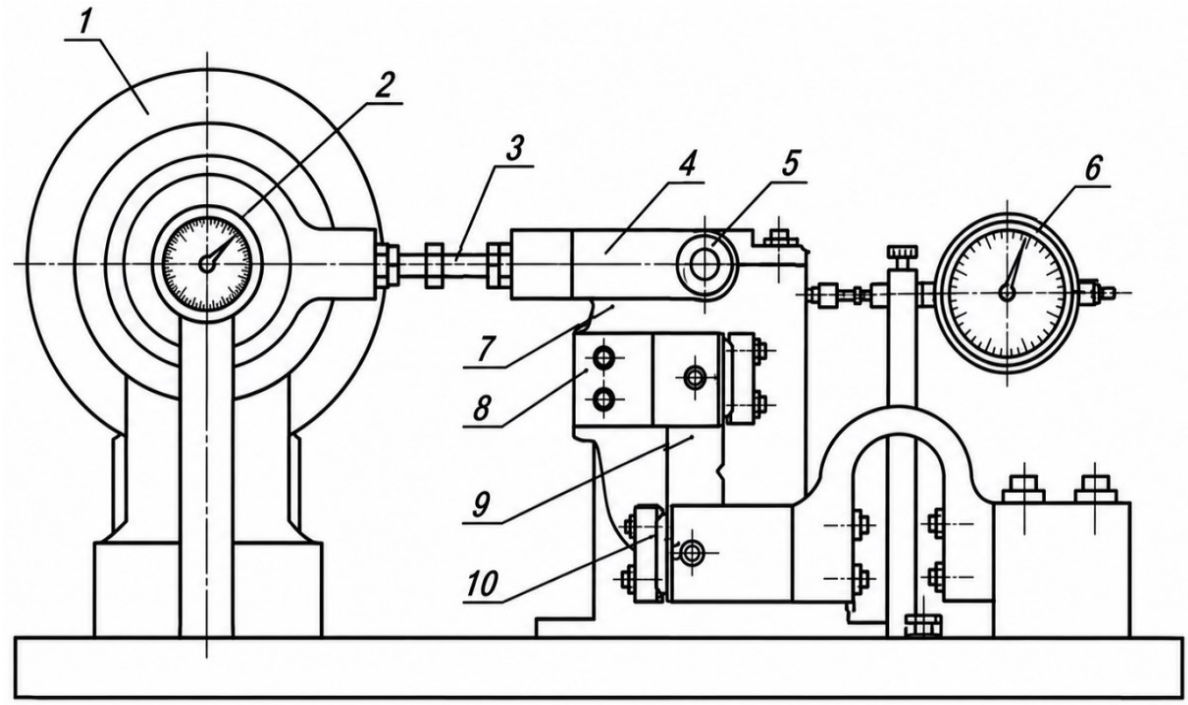


Рис. 2. Схема установки УРТ-10М: 1 – електричний двигун постійного струму типу П-21 з незалежним збудженням; 2 – ексцентриковий механізм (із регульованим ходом); 3 – зворотно-поступальна тяга; 4 – важіль навантаження; 5 – шарнір (вісь важеля); 6 – індикатор годинникового типу; 7 – планшайба із верхнім затискачем; 8 – верхній рухомий затискач; 9 – плоский зразок (див. рис. 1); 10 – нижній нерухомий затискач.

2.3. Розрахунок коефіцієнта інтенсивності напружень (КІ)

В основу методики розрахунку покладено рішення задачі для крайових тріщин в прямокутних пластинах при повороті їх відносно середньої лінії. Характер зміни КІ по мірі росту втомної тріщини в основному визначається відношенням довжини робочої частини зразка Y_0 до її ширини $2X_0$. Встановлено [1,2], що за відношення довжини робочої частини зразка до її ширини, рівного 2,4, ми отримуємо постійне значення коефіцієнта інтенсивності напружень у вершині тріщини незалежно від її довжини. Експериментально це підтвердила лінійна залежність довжини тріщини від кількості циклів навантаження (рис.3) [1]. На втому і корозійну втому під жорстким навантаженням за схемою деформування Блюма (рис.4) [2] на установці УРТ-10М випробовують пластинчасті зразки 130х16х4 мм з одностороннім вирізом завглибшки 1 мм на середині робочої частини висотою 28,8 мм і радіусом у вершині ρ=0,1 мм. Це забезпечувало незалежність коефіцієнта інтенсивності напружень КІ у вершині підростаючої тріщини на певній її довжині. Зразки знакозмінно деформували з частотою 0,1-10 Гц за віднульового циклу

(KI=Kmax). Коефіцієнт інтенсивності напружень КІ у вершині тріщини/надрізу (МПа·$\sqrt{м}$ або кгс/мм$^{3/2}$) розраховували за формулою [1]:

$$KI = \frac{1{,}44\mu\theta X_0^{3/2}}{Y_0},$$

де μ − модуль зсуву матеріалу зразка, ГПа; для алюмінієвого сплаву $\mu = 27{,}4$ ГПа [3];
θ − кут деформації зразка (рис. 4) у радіанах.

Обчислення кута деформації зразка θ:

Для малих кутів повороту застосовуємо спрощення tg(2θ)≈2θ:

$$\text{tg}2\theta = A/98 = 2\theta \Rightarrow \theta = A/196$$

де: А − виміряна за допомогою індикатора годинникового типу (точність 0,01) амплітуда механічних коливань (деформації) зразка під час резонансного навантаження установки (у мм); 98 − плече прикладання навантаження або геометрична база захватів випробувальної установки УРТ-10 (у мм).

Знаючи кут деформації зразка θ, за відповідною формулою знаходимо величину коефіцієнта інтенсивності напружень KI у вершині тріщини в циклі навантаження.

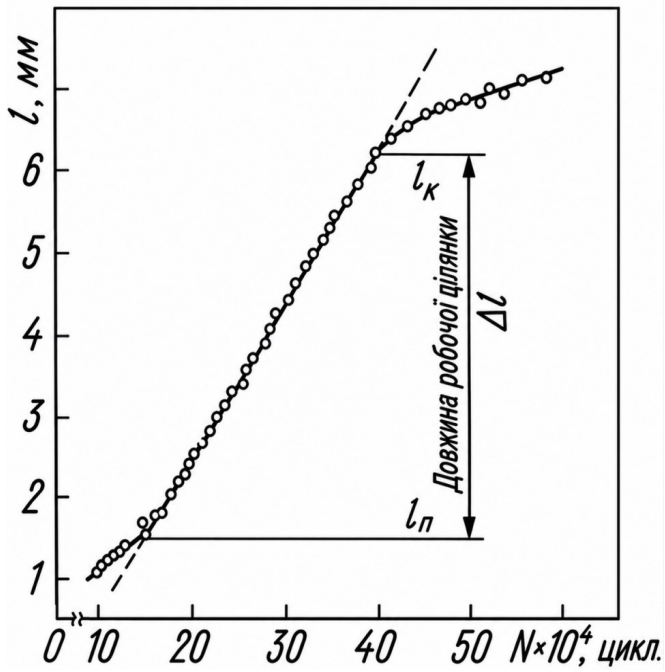


Рис.3. Залежність довжини тріщини l від кількості циклів навантаження зразка.

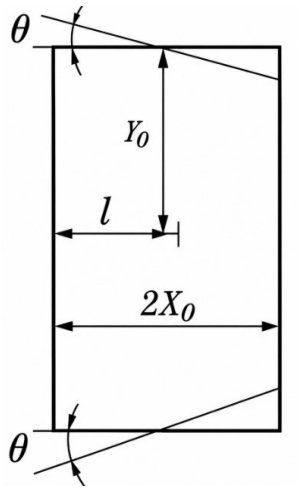


Рис. 4. Схема деформування пластинчатого зразка: $2X_0$ – ширина зразка, мм; Y_0 – відстань від верхнього захвата до площини тріщини, мм; l - довжина тріщини; θ – кут деформації зразка у радіанах.

2.4. Облік кількості циклів навантаження

Для обліку кількості циклів згину в установці використовують двоканальний лічильник CI2 виробництва REGMIK. Лічильник реєструє електричні імпульси, що надходять від герконового датчика, встановленого на електродвигуні.

Принцип роботи герконового датчика такий (рис. 5). Диск із магнітом закріплений на валу двигуна й обертається разом із ним. Герконовий датчик є нерухомим і встановлений поруч так, щоб магніт під час кожного оберту проходив повз нього. Коли магніт наближається до геркона, його контакти замикаються, формуючи короткий імпульс для входу лічильника CI2.

Для формування стабільного електричного сигналу використовують резистор R, який запобігає виникненню невизначеного («висячого») стану входу лічильника за розімкненого геркона. На табло лічильника може відображатися швидкість обертання електродвигуна або кількість імпульсів за одиницю часу залежно від режиму роботи приладу.

За прийнятої схеми приводу кількість циклів згину N відповідає кількості обертів електродвигуна. Перед початком випробування лічильник встановлюють у вихідний стан та перевіряють правильність реєстрації імпульсів.

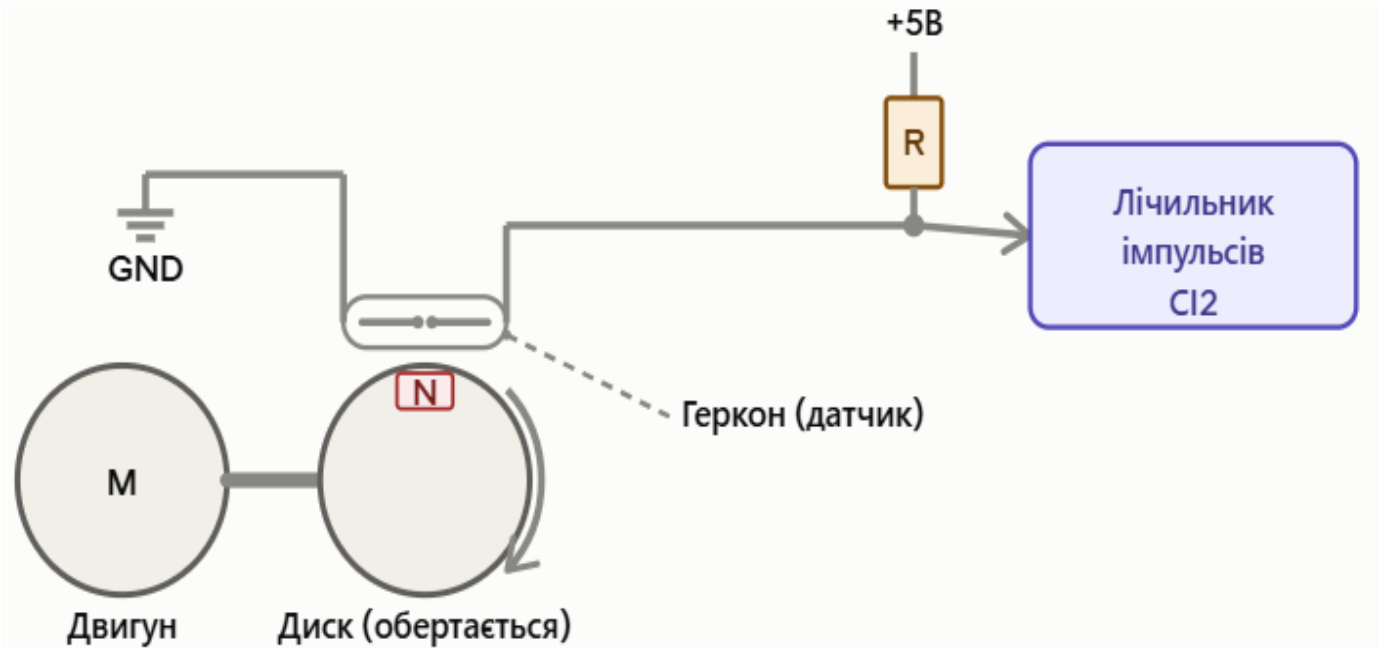


Рис. 5. Схема обліку кількості циклів деформації зразка на установці УРТ-10М.

2.5. Вимірювання довжини тріщини

Завдяки прозорості використовуваного корозійного середовища та робочої камери, виготовленої з органічного скла, довжину втомної тріщини вимірюють безпосередньо під час випробування за допомогою цифрового оптичного мікроскопа Andostar AD246 S-M, встановленого на установці (рис. 6). Вимірювання проводять із точністю до 0,02 мм, періодично фіксуючи поточну довжину тріщини в процесі її поширення. Одночасно реєструють відповідну кількість циклів навантаження за показами лічильника. За результатами послідовних вимірювань визначають приріст довжини тріщини Δl та кількість циклів ΔN, протягом яких відбувся цей приріст. Середню швидкість росту тріщини на відповідному інтервалі обчислюють як відношення приросту її довжини до кількості циклів навантаження: $v = \Delta l / \Delta N$. Отримані значення дають змогу простежити зміну швидкості поширення тріщини впродовж випробування.

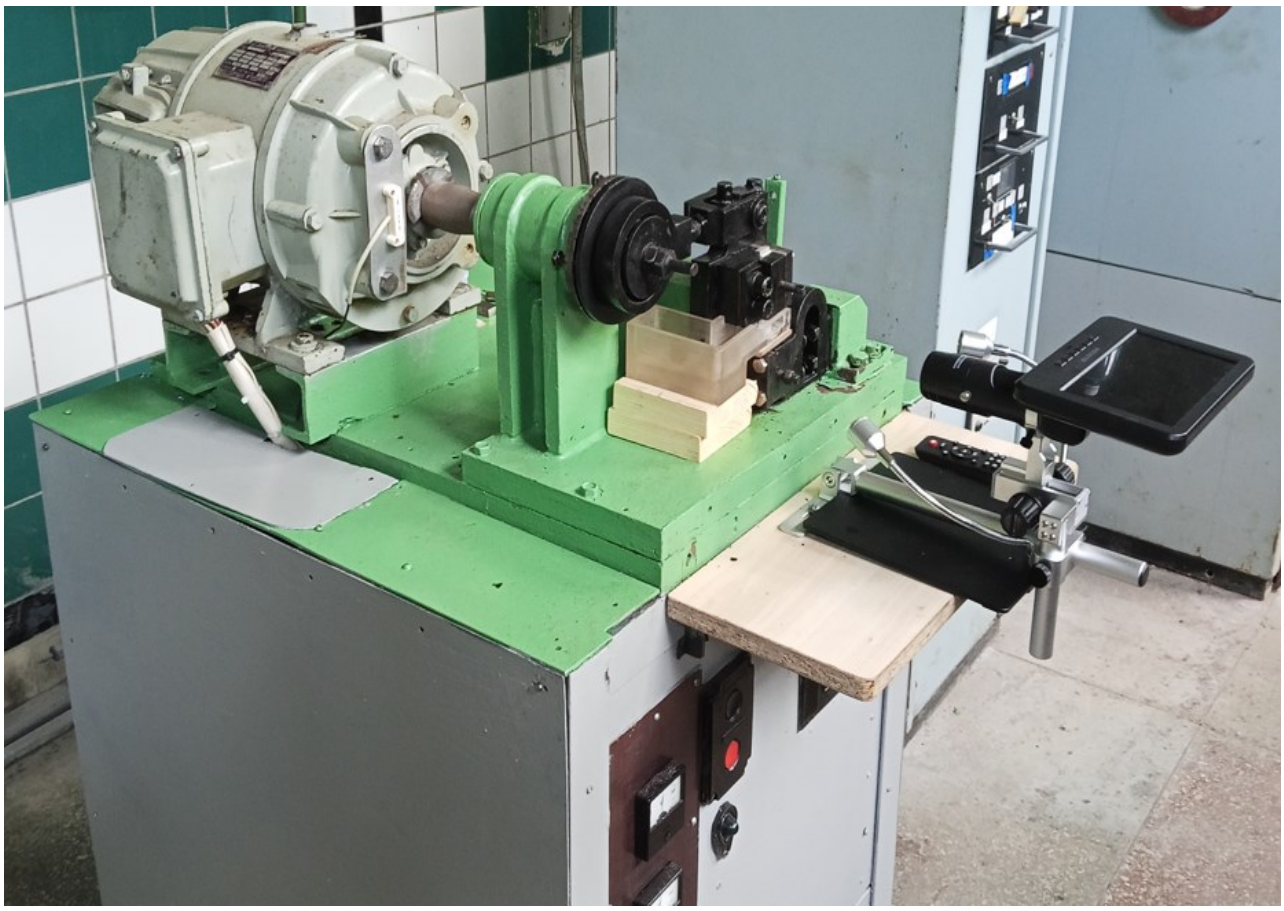


Рис. 6. Установка УРТ-10М з цифровим оптичним мікроскопом Andostar AD246 S-M.

3. Електрохімічна частина

Електрохімічна частина установки УРТ-10М призначена для проведення електрохімічних вимірювань на зразку, який одночасно піддається циклічному механічному навантаженню в корозійному середовищі.

До складу електрохімічної системи входять корозійна камера з органічного скла, досліджуваний зразок як робочий електрод, електрод порівняння, допоміжний електрод та потенціостат VersaSTAT3F з програмним забезпеченням VersaStudio 2.63.3 для реєстрації й оброблення електрохімічних даних.

Під час монтажу електрохімічної частини необхідно забезпечити електричну ізоляцію допоміжного та електрода порівняння від металевих елементів установки, надійний електричний контакт робочого зразка з клемою WE потенціостата та стабільне розташування електродів у корозійному середовищі.

3.1. Монтаж камери з корозійним середовищем

Корозійну камеру (рис. 7) встановлюють на установці таким чином, щоб робоча частина досліджуваного зразка була занурена в корозійне середовище, а механізм циклічного згину міг вільно переміщувати вільний кінець зразка. Металевий зразок проходить наскрізь через дно корозійної камери і герметизується в ній за допомогою прокладки з вакуумної гуми та закріплюється нижнім кінцем у плиті установки. Перед заповненням камери перевіряють її герметичність, надійність кріплення та відсутність контакту корозійного розчину з електричними компонентами, для яких такий контакт не передбачений конструкцією. У камеру заливають підготовлене корозійне середовище заданого складу об’ємом 200 мл. Положення камери має забезпечувати постійне змочування робочої поверхні зразка протягом усього випробування. Після встановлення камери перевіряють вільний хід зразка та відсутність механічного контакту між зразком, стінками камери й електродами під час циклічного переміщення.

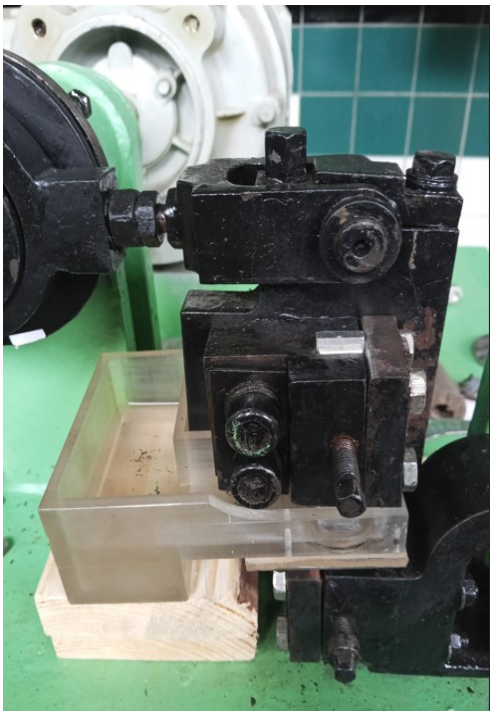


Рис. 7. Вигляд камери для корозійного середовища на втомній установці УРТ-10М

3.2. Електрохімічні вимірювання підчас циклічного навантаження зразка

Електрохімічні вимірювання виконують із використанням триелектродної схеми. Досліджуваний металевий зразок підключають до робочої клеми WE потенціостата та використовують як робочий електрод.

Електрод порівняння підключають до відповідної клеми потенціостата та розміщують у корозійному середовищі поблизу робочої поверхні зразка. Допоміжний електрод, виготовлений із платини, підключають до клеми CE потенціостата та занурюють у корозійний розчин.

Розташування електродів має забезпечувати стабільний електричний контакт із розчином і не створювати механічних перешкод для циклічного переміщення зразка.

Перед початком вимірювань перевіряють правильність підключення робочого, допоміжного та електрода порівняння, полярність і надійність електричних контактів. Особливу увагу необхідно приділити тому, щоб клема WE була електрично з'єднана саме з досліджуваним зразком, а клема CE — із платиновим допоміжним електродом.

Результати електрохімічних вимірювань зберігають на твердому диску для подальшого аналізу. У разі проведення серії досліджень умови вимірювання, склад корозійного середовища, параметри циклічного навантаження та кількість циклів мають бути однаковими або чітко зафіксованими для кожного експерименту.

Після завершення випробування електродвигун вимикають, припиняють електрохімічне вимірювання, за необхідності видаляють корозійний розчин із камери та демонтують зразок. Поверхню зразка оглядають і фіксують характер руйнування та стан робочої поверхні відповідно до програми дослідження.

Перелік літератури

1.V.I.Pokhmurskii, N.M.Kundrat, L. M. Bilyi et al. Constancy of the stress intensity factor at the tip of a crack during its propagation is a rectangular plate. Strength of Materials. 1984. – V.16. – P.1714–1717.

2. Bloom J.M. Single-edge crack in rectangular sheet subjected to end rotations / Journal of Applied Mechanics. 1966. – V.33, №3. – P. 689–691.

3. https://www.spacematdb.com/spacemat/datasearch.php?name=AA2024-T3

Інструкцію розробили:

_____ пров.н.с. І.М. Зінь

_____ гол.інж. В.М. Мочульський

_____ ст.н.с. Л.М. Білий

_____ ст.н.с. Б.М. Дацко

Модернізація установки проведена за використання обладнання та матеріалів, закуплених по Проєкту № 2025.07/0048 «Розроблення нових екологічно безпечних інгібувальних композицій для захисту від трибокорозії та корозійної втоми конструкцій з алюмінієвих сплавів»