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 УВД-М

Зав. відділом корозії
та протикорозійного захисту

_____ Сергій КОРНІЙ

Львів — 2026

1. Призначення установки

Корозійно-втомна установка УВД-М призначена для проведення досліджень корозійної та корозійно-втомної поведінки плоских металевих зразків, що піддаються циклічному навантаженню консольним згином у корозійному середовищі.

Установка забезпечує закріплення плоского зразка одним кінцем у нерухомому затискачі та періодичне переміщення його вільного кінця приводним механізмом. Навантаження здійснюється в одному напрямку від нульового положення з подальшим поверненням зразка до вихідного положення. Таким чином формується асиметричний цикл циклічного згину.

Установка може застосовуватися для визначення довговічності металевих зразків за циклічного згину в корозійному середовищі, дослідження зміни електрохімічних характеристик металу в процесі циклічного навантаження, а також встановлення взаємозв'язку між механічним навантаженням і корозійними процесами.

Електрохімічна частина установки дає змогу виконувати вимірювання потенціалу корозії та струму поляризації, а також проводити потенціодинамічні, потенціостатичні та імпедансні дослідження.

Робота установки передбачає одночасне механічне циклічне навантаження зразка та електрохімічний контроль його стану в корозійному середовищі. Кількість циклів навантаження реєструється електронним лічильником, а після руйнування зразка електродвигун автоматично вимикається кінцевим вимикачем.

2. Механічна частина установки

Механічна частина установки УВД-М забезпечує закріплення досліджуваного зразка, створення заданого циклічного навантаження консольним згином, реєстрацію кількості циклів навантаження та автоматичне припинення роботи приводу після руйнування зразка.

Основними елементами механічної частини є нерухомий затискач для закріплення зразка, приводний механізм циклічного переміщення вільного кінця зразка, електродвигун, елементи передавання руху, пристрій для встановлення та регулювання амплітуди переміщення, лічильник циклів і кінцевий вимикач, що забезпечує автоматичне відключення електродвигуна.

2.1. Зразок для корозійно-втомних досліджень

Для проведення корозійно-втомних досліджень використовують плоский металевий зразок із робочою ділянкою, у якій передбачено концентратор напружень (рис. 1). Геометричні розміри зразка та його робочої частини визначають відповідно до конструкції, прийнятої для конкретного дослідження.

Один кінець зразка нерухомо закріплюють у затискачі установки. Вільний кінець зразка з'єднують із захватом приводного механізму циклічного згину. Надійність закріплення має забезпечувати відсутність проковзування зразка під час роботи установки.

Перед установленням зразка необхідно перевірити його поверхню, геометричні розміри та відсутність пошкоджень, які не передбачені програмою дослідження. Особливу увагу приділяють зоні концентратора, оскільки саме в ній очікується підвищення локальних напружень і, відповідно, можливе зародження втомної тріщини.

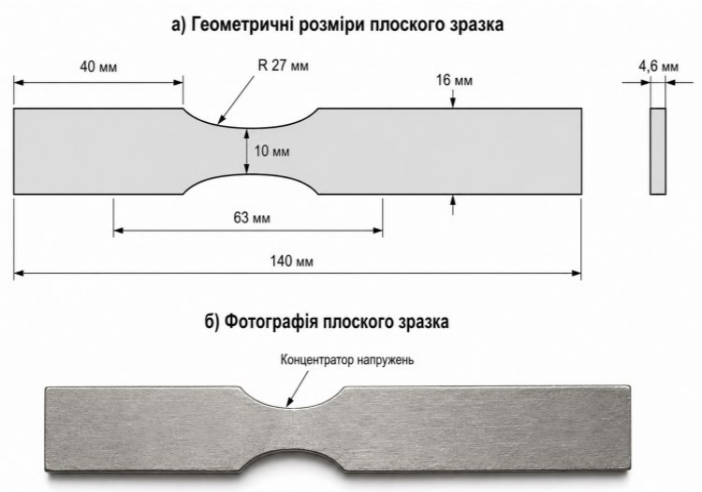


Рис. 1. Креслення зразка для корозійно-втомних досліджень

2.2. Схема механічного циклічного навантаження на установці

Циклічне навантаження зразка здійснюється приводним механізмом, який періодично переміщує його вільний кінець. За один цикл вільний кінець зразка переміщується від нульового положення до заданого положення та повертається назад.

Амплітуду переміщення встановлюють відповідно до необхідного рівня напруження в робочій частині зразка. Під час роботи необхідно забезпечити плавність переміщення та відсутність ударних навантажень, які можуть впливати на результати корозійно-втомного випробування. Схема циклічного навантаження зразка консольним згином наведена на рис. 2.

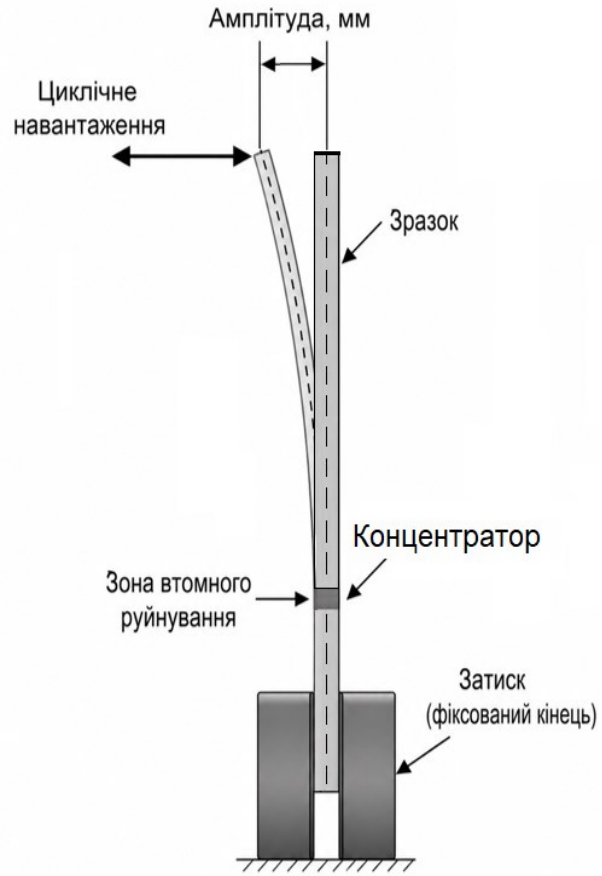


Рис. 2. Схема циклічного навантаження зразка консольним згином на корозійно-втомній установці УВД-М.

2.3. Тарування установки та визначення напруження на зразку

Перед проведенням корозійно-втомних досліджень виконують тарування установки. Метою тарування є встановлення відповідності між переміщенням вільного кінця зразка, величиною прикладеного навантаження та напруженням у його робочому перерізі.

Тарування установки виконують на калібрувальному пристрої (рис. 3). До вільного кінця консольного зразка послідовно прикладають відомі навантаження P і вимірюють відповідне переміщення вільного кінця A за допомогою мікроіндикатора годинникового типу. Для кожного значення навантаження записують величину переміщення та будують тарувальну залежність. Порядок проведення тарування наведено на рис. 4.

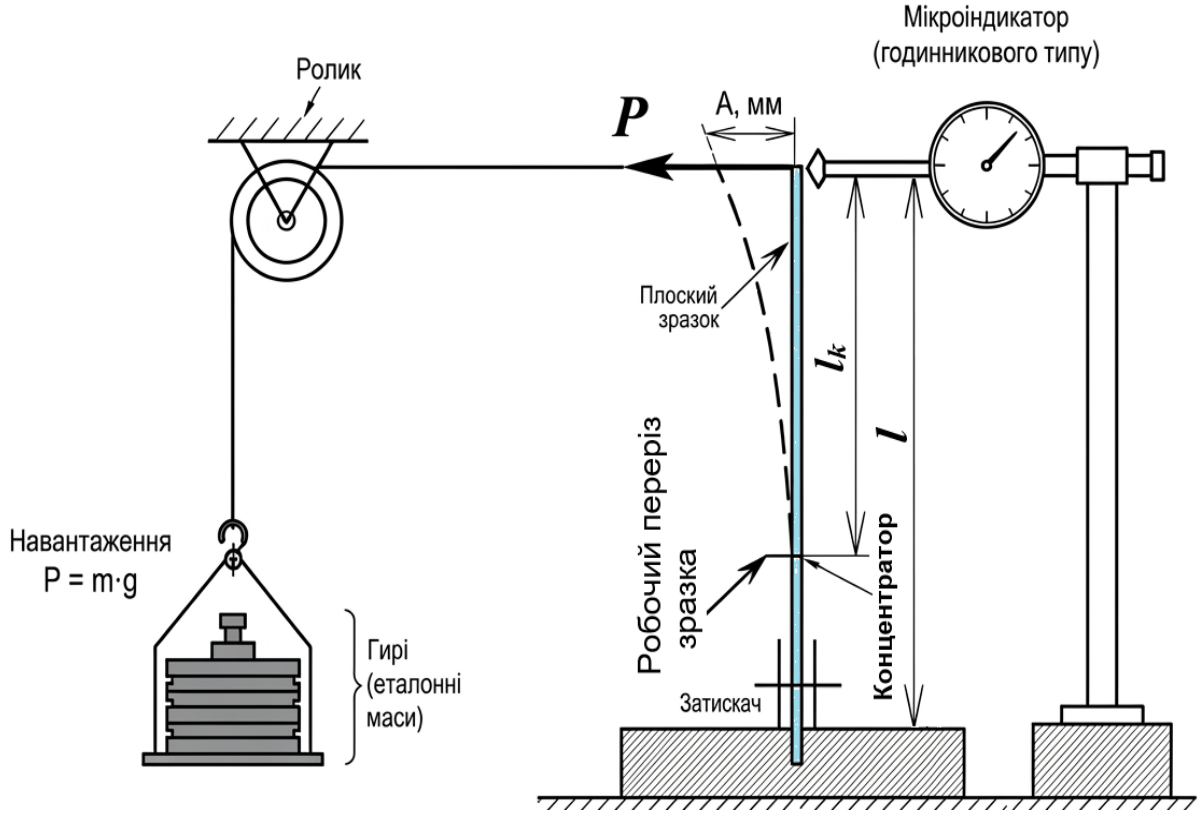


Рис. 3. Схема тарування втомної установки консольного типу УВД-М:

P – сила згинання, Н; A – переміщення вільного кінця, виміряне мікроіндикатором, мм; l_k – відстань від вільного кінця зразка до концентратора, мм; l – відстань від затискача до точки прикладання сили P.

За результатами вимірювань будують тарувальну криву (рис. 5), яка використовується для визначення необхідного переміщення вільного кінця зразка для заданого рівня напруження.

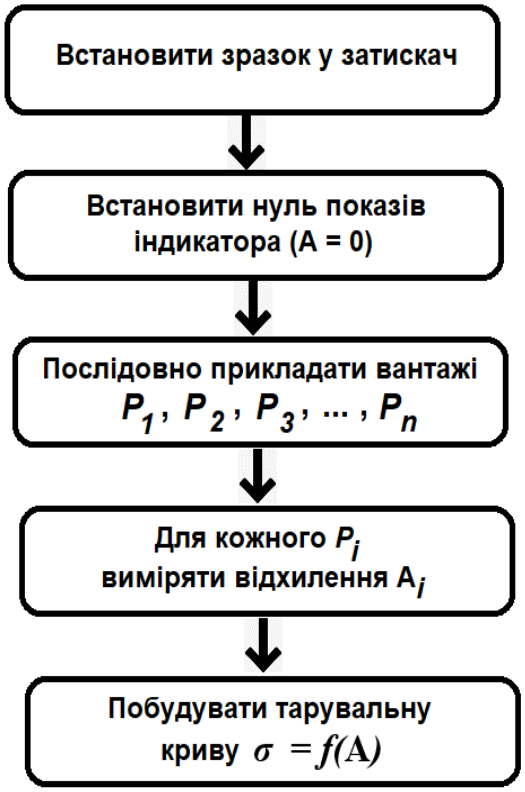


Рис. 4. Порядок тарування втомної установки УВД-М

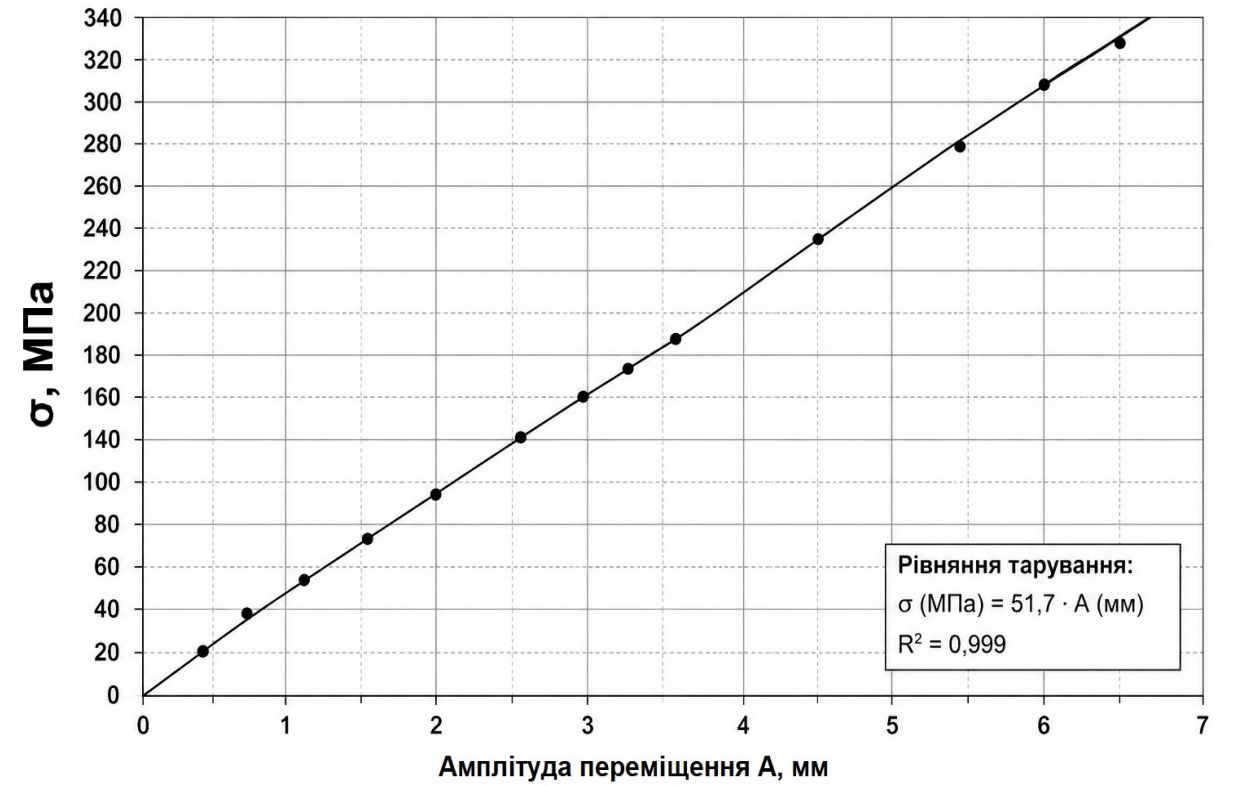


Рис. 5. Тарувальна крива для визначення напруження на плоскому зразку алюмінієвого сплаву

Під час розрахунків нормального напруження σ при консольному згині плоского зразка використовують співвідношення, наведене у підручнику Тимошенко [1]:

$$\sigma = \frac{6Pl_k}{bh^2}, \text{ МПа}$$

де $\boldsymbol{\sigma}$ – нормальне напруження згину, МПа; P – навантаження, Н; l_k – відстань від концентратора до точки прикладання сили P, мм; b – ширина зразка в найменшому перерізі, мм; h – товщина зразка, мм; A – амплітуда переміщення вільного кінця пластини, виміряна мікроіндикатором, мм.

Під час підготовки конкретного випробування значення амплітуди переміщення встановлюють за тарувальною кривою. Отримане значення повинно забезпечувати заданий рівень механічного навантаження без перевищення допустимої амплітуди переміщення приводного механізму.

2.4. Визначення коефіцієнта концентрації напружень K_{tn} на зразку [2]

Використовуємо формулу Петерсона (Chart 2.4, розтяг) [2]

Геометричні параметри зразка:

- H=D=16 мм, d= 10 мм, r=27 мм, t= (H-d)/2=3 мм
- t/R=3/27=0.1111; 2t/H=0.375

Для діапазону $0.1 \leq$ t/R < 2.0:

$$K_{tn} = C_1 + C_2\left(\frac{2t}{H}\right) + C_3\left(\frac{2t}{H}\right)^2 + C_4\left(\frac{2t}{H}\right)^3$$

$$C_1 = 0{,}955 + 2{,}169\sqrt{t/r} - 0{,}081(t/r) = 1{,}669$$

$$C_2 = -1{,}557 - 4{,}046\sqrt{t/r} + 1{,}032(t/r) = -2{,}791$$

$$C_1 = 4{,}013 + 0{,}424\sqrt{t/r} - 0{,}748(t/r) = 4{,}071$$

$$C_4 = -2{,}461 + 1{,}538\sqrt{t/r} - 0{,}236(t/r) = -1{,}975$$

Обчислюємо значення коефіцієнта K_{tn}:

$$K_{tn} = 1.669 + (-2.791)(0.375) + 4.071(0.375)^2 + (-1.975)(0.375)^3$$

$$K_{tn} = 1.669 - 1.047 + 0.573 - 0.104$$

$$K_{tn} \approx 1.09$$

2.5. 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. 6). 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 при розімкненому герконі. 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.

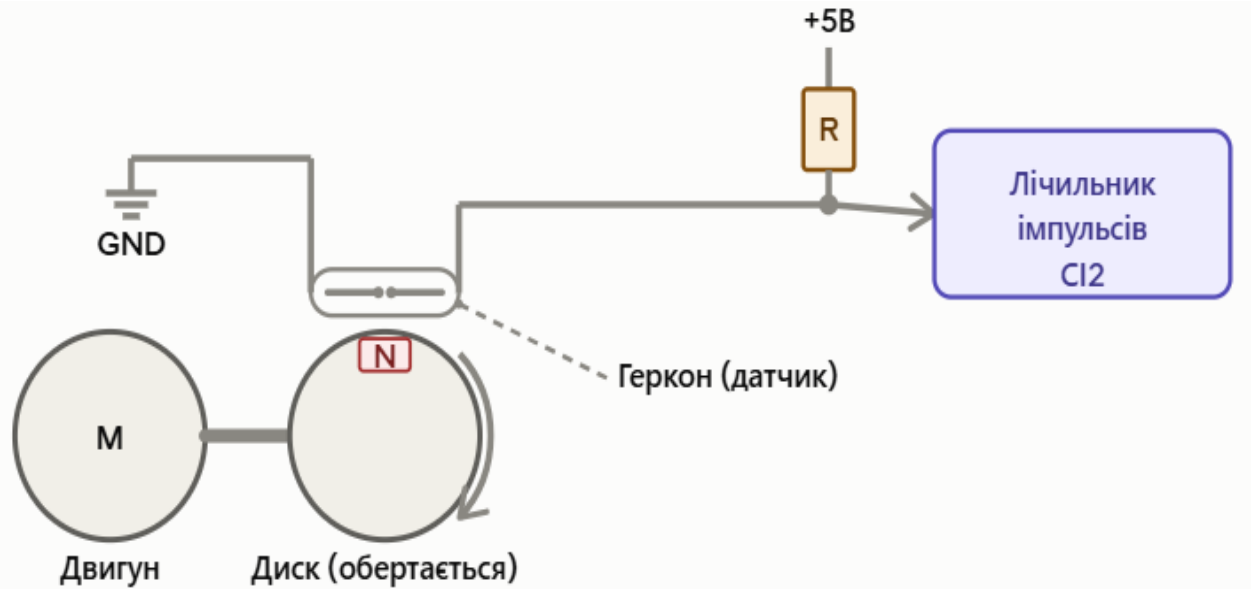


Рис. 6. Схема обліку кількості циклів згинання зразка на установці УВД-М.

2.6. Автоматичне відключення двигуна в момент ламання зразка

Для автоматичного відключення електродвигуна в момент руйнування зразка застосовують кінцевий вимикач-мікровимикач. Пристрій призначений для припинення циклічного навантаження та запобігання подальшій роботі механізму після зламу зразка.

Схема автоматичного вимикання двигуна наведена на рис. 7. У момент зламу зразка його нижня частина залишається затиснутою в нижньому нерухомому затискачі, тоді як верхня частина під дією пластинчастого пружного елемента переміщується вгору. При цьому пружний елемент переміщує важіль із притискною пластиною, яка зіскакує з кнопки

мікровимикача. Спрацьовування мікровимикача розмикає електричне коло керування електродвигуном, унаслідок чого двигун автоматично вимикається.



Рис. 7. Система автоматичного відключення електродвигуна в момент зламу зразка.

Перед початком випробування необхідно перевірити працездатність мікровимикача та правильність його взаємодії з важелем. Перевірку виконують без навантаження або відповідно до встановленої процедури підготовки установки до роботи.

3. Електрохімічна частина

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

До складу електрохімічної системи входять корозійна камера, досліджуваний зразок як робочий електрод, електрод порівняння, допоміжний електрод та потенціостат із програмним забезпеченням 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. 8) 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.

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 та об’єму. Положення камери має забезпечувати постійне змочування робочої поверхні зразка протягом усього випробування.



Рис. 8. Встановлення камери для корозійного середовища на втомну установку УВД-М

Після встановлення камери перевіряють вільний хід зразка та відсутність механічного контакту між зразком, стінками камери й електродами під час циклічного переміщення.

3.2. Схема електрохімічних вимірювань на циклічно навантаженому зразку алюмінієвого сплаву

Електрохімічні вимірювання виконують із використанням триелектродної схеми (рис. 9). 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 також занурюють у корозійний розчин.

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

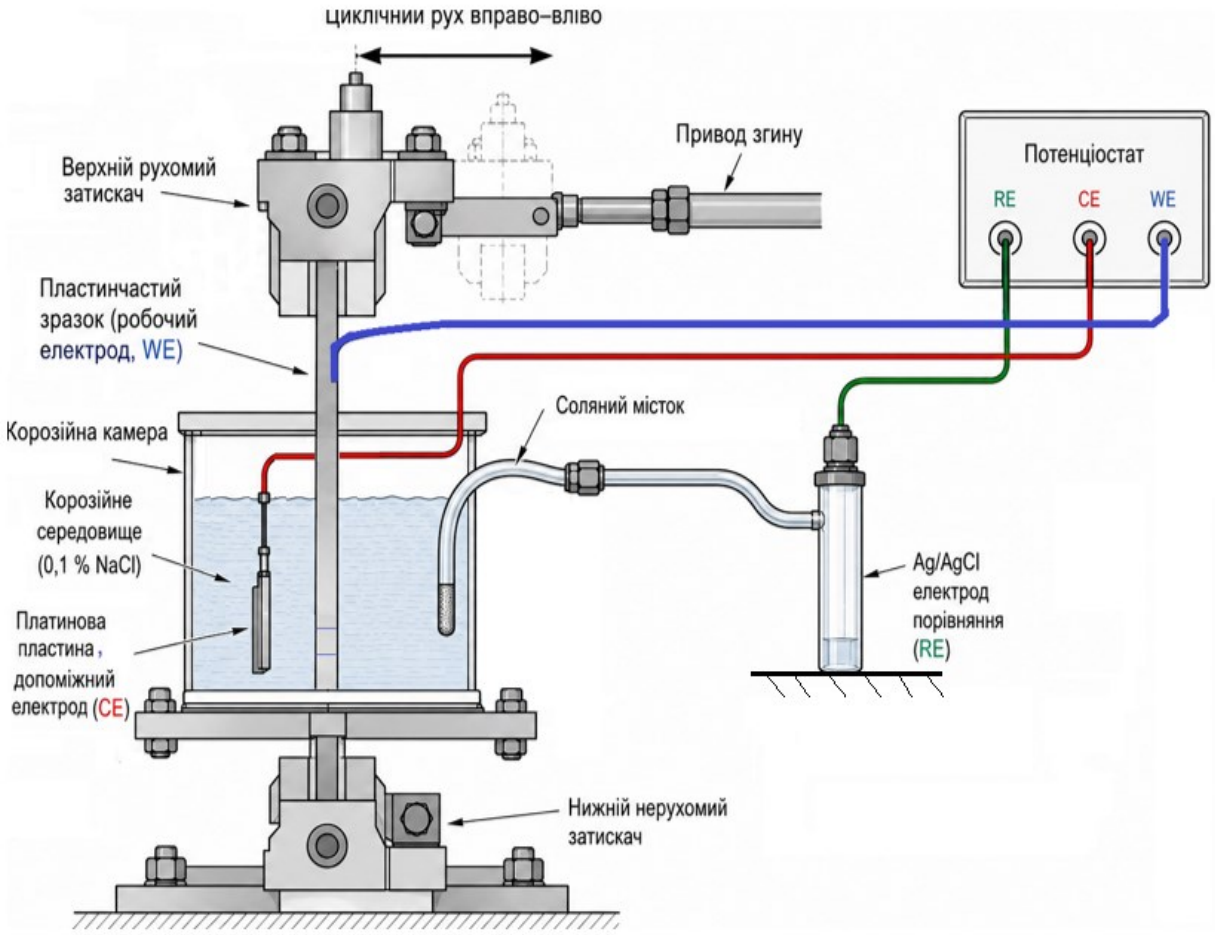


Рис. 9. Принципова схема підключення потенціостату VersaStat3 з програмним забезпеченням VersaStudio 2.63.3 до установки УВД-М

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.

3.3. Електрохімічні дослідження на корозійно-втомній установці УВД-М

Електрохімічні дослідження проводять до початку циклічного навантаження, під час навантаження та після заданої кількості циклів залежно від мети експерименту. У процесі випробування можуть реєструватися потенціал корозії, струм поляризації та інші електрохімічні параметри.

Потенціал корозії реєструють як функцію часу або кількості циклів навантаження. Така залежність дає змогу простежити зміну електрохімічного стану поверхні зразка під дією циклічного механічного навантаження та корозійного середовища.

Для потенціодинамічних досліджень задають необхідний діапазон потенціалів і швидкість розгортки потенціалу, після чого реєструють поляризаційну залежність струму. За необхідності вимірювання повторюють для зразка без циклічного навантаження та після заданої кількості циклів для оцінювання впливу механічної активації на електрохімічну поведінку металу.

Приклад залежності потенціалу корозії алюмінієвого сплаву Д16Т від кількості циклів навантаження наведено на рис. 10.

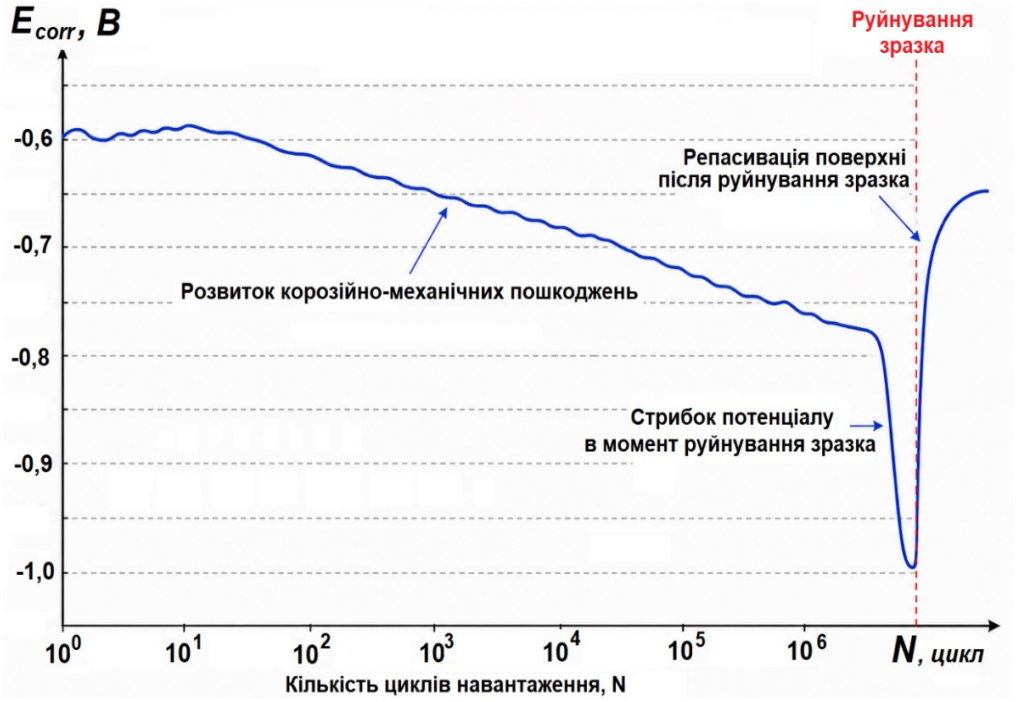


Рис. 10. Залежність потенціалу корозії алюмінієвого сплаву Д16Т від кількості циклів навантаження консольним згином в інгібованому хлоридвмісному розчині при σ = ±180 МПа.

Приклад потенціодинамічних поляризаційних залежностей до та після циклічного навантаження наведено на рис. 11.

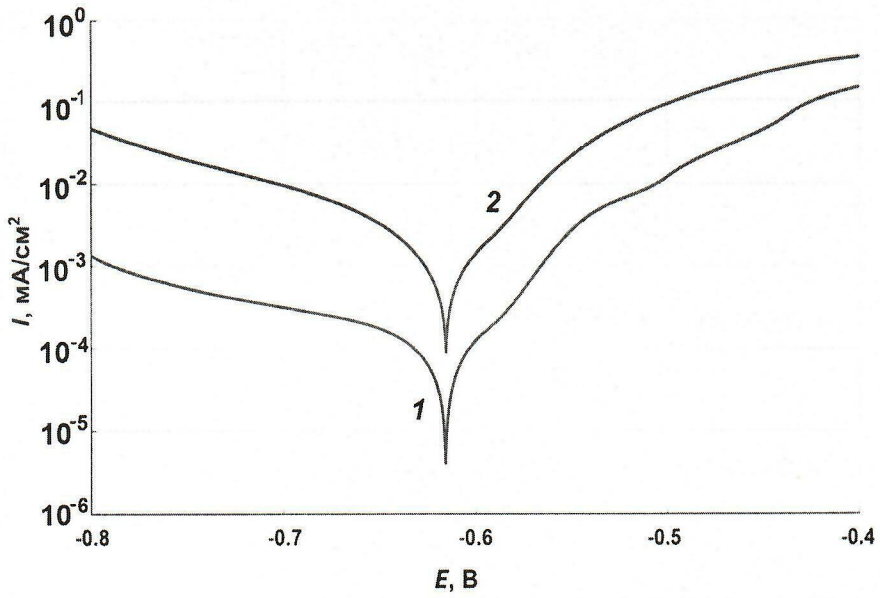


Рис. 11. Потенціодинамічні поляризаційні залежності алюмінієвого сплаву В95, отримані без циклічного навантаження (1) та після 3200 тисяч циклів навантаження в 0,1 % розчині NaCl (2) з цинкфосфатним інгібітором корозії при σ = ±180 МПа.

Результати електрохімічних вимірювань зберігають у програмному забезпеченні потенціостата для подальшого аналізу та порівняння. 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] Timoshenko, S. P. Strength of Materials. Part I: Elementary Theory and Problems. 2nd ed. New York: D. Van Nostrand Company, 1947, pp. 208–209.

[2] Peterson's Stress Concentration Factors. Fourth Edition. Walter D. Pilkey, Deborah F. Pilkey, Zhuming Bi. John Wiley & Sons, Inc. 2020. 632 p.

Інструкцію розробили:

пров.н.с. І.М. Зінь

ст.н.с. Л.М. Білий

ст.н.с. Б.М. Дацко

гол.інж. В.М. Мочульський