

## Використання графічного програмування при випробуваннях матеріалів на термічну втому та циклічну міцність

**В. В. Клипачевський, М. М. Теслюк**

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

*Описано модернізацію існуючих машин для випробувань зразків матеріалів на термічну втому та циклічну міцність. Модернізація машин полягає у використанні графічного програмування для задання режимів циклічного нагрівання або механічного навантаження та фіксації в електронному вигляді результатів випробувань. Приведено результати випробувань лабораторних зразків на термічну втому та циклічну тріщиностійкість за частоти навантаження 0,016 Гц.*

**Ключові слова:** термічна втома, циклічне навантаження, програмне забезпечення Lab VIEW, тензопідсилювач, циклічна міцність.

**Вступ.** Багато деталей й елементів енергетичного, металургійного, хімічного, машинобудівного та іншого обладнання працюють у складних умовах циклічного термічного і механічного малоциклового навантаження. Визначення характеристик опору матеріалів такому навантаженню й оцінка їхньої циклічної довговічності зумовлені використанням емпіричних розрахункових залежностей, в яких окремі характеристики та параметри отримують експериментально.

Для експериментального визначення характеристик опору термічній втомі використовують машини для термомеханічного навантаження [1], в яких синхронізують жорстке (із заданим рівнем деформацій) механічне навантаження та циклічне нагрівання лабораторного зразка, або спеціалізовані машини для випробувань на термічну втому [2, 3], де в заданому інтервалі циклювання температур напруження визначаються фізико-механічними властивостями матеріалу зразка та обмеженням його температурної деформації.

Для випробувань матеріалів на малоциклову втому використовують сучасні електромеханічні та електрогідравлічні машини. У той же час є класичні неенергоємні випробувальні машини, які більш прості, надійні і не потребують спеціального обслуговування та можуть безперервно працювати тривалий час. Такі машини доцільно використовувати при великих об'ємах тривалих серійних випробувань. Незважаючи на те що подібного класу машини морально застаріли, вони мають надійну механічну систему силонавантаження, але із-за недосконалості апаратної частини при управлінні циклічним навантаженням та відображенні отриманих результатів виникають суттєві недоліки.

На сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки організація керування технологічним процесом зведена до схеми: комп'ютер–контролер–виконавчий пристрій. Таким чином, використання комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням та сучасних датчиків дозволяє значно спростити апаратну частину і гарантувати високу точність і надійність в управлінні, вимірюванні і збереженні отриманих експериментальних даних.

У даній роботі описуються машини для випробувань на термічну втому та тривалу циклічну міцність, оснащені сучасним комп'ютером із відповідним обладнанням.

**Машина для випробувань на термічну втому.** Машини для випробувань на термічну втому побудовані за класичною схемою Коффіна, згідно з якою лабораторний зразок із досліджуваного струмопровідного матеріалу закріплюється у жорсткій рамі і піддається циклічному нагріванню шляхом безпосереднього пропускання електричного струму. Ініціювання напружень у зразку здійснюється внаслідок обмеження жорсткою рамою його температурних деформацій. Прилади для ініціювання заданих форм циклів (режимів) нагрівання мали певну інерційність і давали похибку при їх відтворенні та реєстрації даних випробувань.

Модернізація випробувальної машини полягає у заміні застарілого обладнання для ініціювання заданих форм циклів нагрівання й охолодження лабораторного зразка та приладів для виведення даних випробувань на сучасний комп'ютер із відповідним програмним забезпеченням.

Для побудови кривої термічної втому в заданому температурному інтервалі необхідно провести випробування серії зразків за різних значень обмеження їх температурних деформацій, що здійснюється шляхом установки послідовно зі зразком змінних шайб різної жорсткості. При обмеженні силовою рамою температурної деформації зразок підлягає пружно-пластичному деформуванню, циклічна дія якого призводить до його руйнування [4, 5]. Особливість випробувань на термічну втому полягає в тому, що напруження і деформації зразка, які в першу чергу цікавлять дослідника, є похідними від фізичних та механічних властивостей матеріалу, діапазону температур, жорсткості силової рами, а контрольованим параметром керування циклічним навантаженням є температура. Тому подібні випробування характеризуються значним розкидом експериментальних результатів у термінах циклічної довговічності у функції від напружень і деформацій, обумовленим точністю задання і підтримки необхідних значень температури протягом випробувань, локальністю і випадковістю процесів накопичення пошкоджень. Відзначена особливість випробувань на термічну втому потребує реалізації заходів щодо підвищення точності і повторюваності задання та підтримки необхідних значень температури, що визначає степінь достовірності отриманих результатів.

Управління циклічним нагріванням на двох існуючих в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України машинах здійснюється шляхом безпосереднього пропускання електричного струму через зразок за двома схемами. В одній машині використовується позиційна схема управління, згідно з якою за допомогою мікровимикачів, установлених на самописці ЕПП-09, що фіксує зміну температури на зразку від термопари, прикріпленої до його робочої частини, вмикалась та вимикалась подача електричного струму для нагрівання зразка. В іншій машині використовується "слідкуюча" схема управління, що дозволяє задавати більш складні форми режимів циклічного нагрівання за допомогою механіко-оптичного приладу (РУ5-02М), в якому на прозорий барабан наклеювався непрозорий трафарет із відповідною формою циклу нагрівання (трикутник, трапеція, синусоїда, блоки геометричних фігур із різними амплітудами і т.п.). Такі способи задання сигналу керування

температурою мали певну інерційність і давали велику похибку як абсолютних значень, так і повторюваності циклів нагрівання та реєстрації даних випробувань. Запис даних на електромеханічних самописцях також мав істотну похибку.

**Машина для випробувань на малоциклову втому.** Діюча в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України випробувальна машина ИП-4М призначена для випробувань матеріалів на повзучість та тривалу міцність при постійному або циклічному розтязі. Машина складається з двох незалежних секцій, що дозволяє одночасно проводити випробування двох лабораторних зразків за різних значень прикладеного навантаження.

Машина складається з силової рами, в якій розміщено навантажувальний пристрій з механізмами підтяжки верхнього захвату та підняття вантажу на навантажувальному важелі, пристроїв керування і вимірювання деформацій.

Навантажувальний силовий пристрій дозволяє прикладати на лабораторний зразок зусилля в межах 0,5...30 кН. Зусилля на зразку виникають завдяки висячому вантажу, який діє через плече важеля з відношенням 1:50, що забезпечує дотримання строго постійного навантаження протягом досліду. Механізм підняття вантажу на навантажувальному важелі дозволяє проводити циклічний розтяг зразка з асиметрією циклу  $R_\sigma = 0$ . Робочий хід захватів машини складає 2 мм, в межах якого відбувається навантаження з гарантованою постійністю. При деформаціях зразка більше ніж 2 мм потрібно проводити підтяжку верхнього захвату за допомогою спеціального механізму. Останній складається з гвинта і гайки і приводиться в дію електродвигуном із редуктором. Лабораторний зразок у силовому ланцюзі розташований на подовжувачах із захватами між силовим кінцем важеля та механізмом підтяжки. Подовжувачі із захватами мають кульові вузли для дотримання співвісності прикладання зусиль.

До модернізації машини під час циклічних випробувань зразка підняття й опускання вантажу на важелі при його циклічному навантаженні здійснювалося за допомогою спеціального механізму. Для управління електроприводом механізму підняття вантажу використовувався кулачковий механізм (із дуже обмеженими можливостями) із кінцевими перемикачами, де час вмикання та вимикання регулювався шляхом перестановки шестерень у редукторі кулачкового механізму.

Для побудови кривої малоциклової втоми при заданих параметрах циклів навантаження (зусилля на зразку, час витримки при максимальному навантаженні та без навантаження) необхідно провести випробування серії зразків за різних значень амплітуди напружень. Під час випробувань зразок деформується з різною швидкістю, і для підтримання амплітуди навантаження з гарантованою постійністю необхідно підтягнути верхній захват за допомогою механізму підтяжки. Вмикання приводу механізму підтяжки здійснюється від кінцевих вимикачів, які фіксують положення навантажувального важеля.

Такі способи задання параметрів циклів навантаження та контролю положення навантажувального важеля є трудомісткими і мають певні обмеження, враховуючи різну здатність матеріалів до пластичного деформування, недостатню стабільність і точність задання сигналу через вплив технічних чин-

ників (підгоряння контактів, проковзування або заїдання механізмів самописців, неспрацьованість або інерційність перемикачів).

**Модернізація діючих випробувальних машин.** Модернізація випробувальних машин полягає у використанні комп'ютера з програмним забезпеченням Lab View, плати АЦП-ЦАП та тензопідсилювачів.

При удосконаленні машини для випробувань на термічну втому використовуються пропорційно інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор температури АРТ4 і комп'ютер. Блок-схему модернізованої установки показано на рис. 1. Для керування циклічним нагріванням лабораторного зразка та збирання і збереження даних випробувань використовується персональний комп'ютер (ПК) AMD Athlon 64 Processor 3000+ з тактовою частотою 1,81 ГГц і оперативною пам'яттю 2 Гб. Завантаженість програмою Lab VIEW по процесору складає 60...70%, по операційній пам'яті – близько 8...10%. Отже, особливої уваги при виборі ПК потребує тактова частота процесора. 12-бітна плата АЦП-ЦАП має два канали на вихід та 16 незалежних каналів на вхід. Вхідні і вихідні канали працюють у межах  $\pm 10$  В і мають гальванічну розв'язку для захисту від перевантажень. Частота запитів по каналах дорівнює 44000 зап/с.

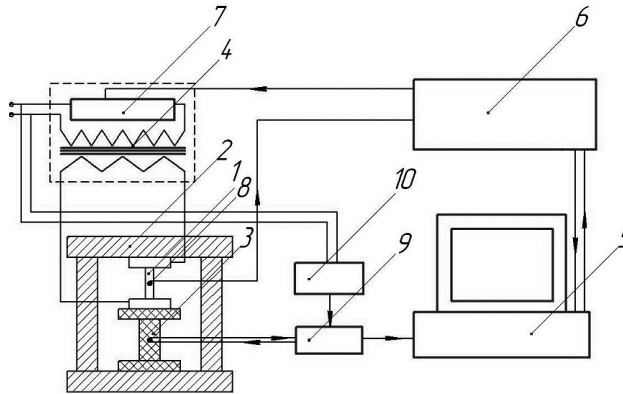


Рис. 1. Блок-схема машини для випробувань на термічну втому: 1 – зразок; 2 – рама; 3 – динамометр; 4 – трансформатор; 5 – комп'ютер; 6 – автоматичний регулятор температури АРТ4; 7 – тиристор; 8 – термопара; 9 – тензопідсилювач GS3016; 10 – блок живлення (27 В).

У машині використовується ПІД регулятор температури АРТ4 з двома вхідними каналами АЦП і одним вихідним каналом ЦАП. По вхідних каналах у комп'ютер вводяться сигнал зворотного зв'язку, який пропорційний температурі з регулятора температури (підсилений сигнал термопари), та сигнал від датчика (динамометра) вимірювання зусиль на зразку. На динамометрі встановлюється міст із чотирьох тензорезисторів (два активних і два пасивних). У тензопідсилювачі GS3016 коефіцієнт підсилення змінюється дискретно в діапазоні 0,01...10 В із дискретністю 50 мВ. Тензопідсилювач живиться від окремого блоку живлення 27 В і подає стабілізований електричний струм на тензоміст. Вихідний канал плати АЦП-ЦАП використовується для управління регулятором температури. Регулятор температури АРТ4 являє собою ПІД регулятор із перемикаючими параметрами пропорційної, інтегральної і диференціальної складової регулювання. У регуляторі порівнюється сигнал від хромель-алюмелевої термопари діаметром 0,2 мм, прикріпленої до

робочої частини зразка, із сигналом, пропорційним заданій температурі від внутрішнього потенціометра регулятора або від зовнішнього приладу (у даному випадку від комп'ютера). Різниця між сигналами надходить на ПІД регулятор, який керує тиристорним ключем трансформатора для прямого пропускання електричного струму через зразок. Нагрівання зразка зменшує різницю між сигналами від термопар та внутрішнього потенціометра регулятора або комп'ютера. Налагодження відповідності приладу управління температурою і ПК здійснюється за допомогою потенціометра.

Тарування силовимірювача (динамометра) проводиться шляхом дискретного навантаження зусиллям від зразкового динамометра до 30 кН у прямому і зворотному напрямках (рис. 2).

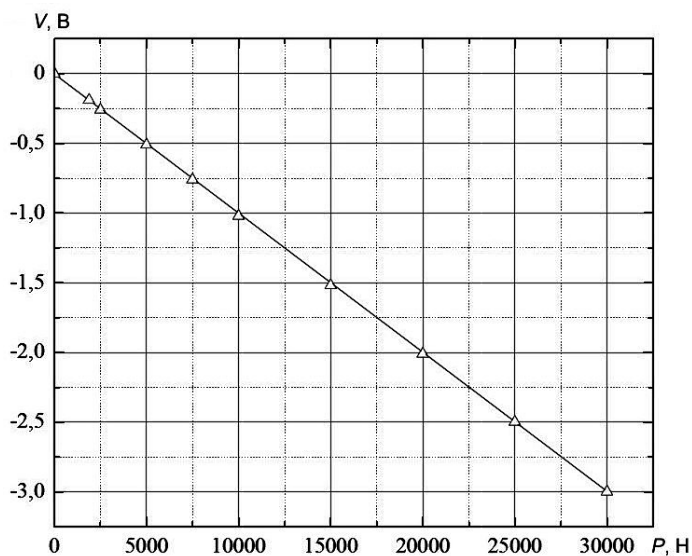


Рис. 2. Крива тарування динамометра.

Програма Lab VIEW (версія 8.2) дозволяє зв'язати віртуальні прилади з фізичними і забезпечити надійне керування циклічним нагріванням лабораторного зразка за кожним із наперед заданим законом зміни температури в часі і переривання процесу випробувань для обмежень на параметри, встановлені оператором, включаючи аварійні зупинки [6]. На рис. 3 представлено інтерфейс віртуального приладу, що використовується в установці. На панелі інтерфейсу розміщується блок введення даних для задання сигналу керування циклічним нагріванням (час нагрівання, час витримки при максимальній температурі, час охолодження та інші параметри у залежності від форми термоциклу). Там же є вікна для індикації числа циклів навантаження, відображення в інженерних одиницях заданих програмою Lab VIEW і виміряних за допомогою термопар значень температури, зміни в часі виникаючих у зразку зусиль і деформацій та графіків напруження–температура і деформація–температура.

Для плавності задання сигналу керування циклічним нагріванням частота опитування складає 100 Гц, що забезпечує приріст напруги  $\approx 5$  мВ (мінімальне значення) і дозволяє отримувати за 10 с керовану швидкість нагрі-

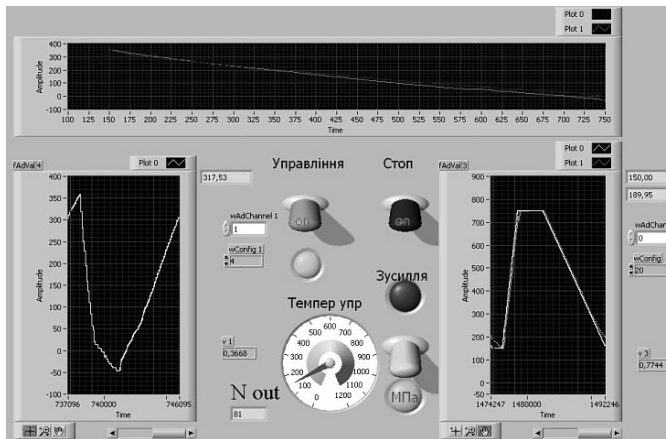


Рис. 3. Інтерфейс віртуального приладу Lab VIEW при випробуваннях на термічну втому.

вання у діапазоні  $0...1200^{\circ}\text{C}$  ( $0...5\text{ V}$ ). Для зменшення об'єму зберігання баз даних запис результатів вимірювання сигналів проводиться з частотою 1 Гц.

Аналогові сигнали, що надходять у комп'ютер, включають шкідливу дію зовнішніх приладів (наприклад, силового трансформатора), яка проявляється в нерегулярному відхиленні сигналу від реальних значень. Позбавитись цього ефекту можна програмним шляхом. Спочатку відокремлюється шум від корисного сигналу, а потім від загального потоку. У результаті залишається потрібний сигнал, який усереднюється. На рис. 3 графік зверху показує залежність напружень від температури, зліва внизу – зміну напружень протягом одного термічного циклу, праворуч внизу – зміну заданих і вимірюваних значень температури.

Ще одна конструкційна особливість програми Lab VIEW полягає в тому, що за бажанням оператора в процесі випробувань можна змінювати інтерфейс повністю або частково; додавати необхідні умови для зупинки випробування, якщо виникне потреба; моделювати будь-який управляючий сигнал, наприклад відтворити умови експлуатації деталі; завдяки зворотному зв'язку підтримувати у лабораторному зразку стабільні величини напружень, аналізуючи при цьому зміну температурного поля.

Для керування циклічним навантаженням та вимірюванням деформацій від тензометрів обох секцій випробувальної машини ИП-4М використовуються той же ПК AMD Athlon 64, програмне забезпечення Lab VIEW, плати АЦП-ЦАП та тензопідсилювачі. Плата АЦП-ЦАП дозволяє одночасно проводити реверсивне управління чотирма двигунами. Двигуни з редукторами підняття вантажу на важелі в залежності від устанавленого оператором часу навантаження і розвантаження вмикаються і вимикаються за цифровими командами 1 – “так” і 0 – “ні” в прямому і зворотному напрямку. Критичні положення важеля обмежують мікрореле, за допомогою яких через канали цифрового входу надходить інформація до програми загального управління процесом і строго фіксується положення важеля у заданих межах. За подібною схемою працюють і верхні двигуни підтяжки. Важіль у стані навантаження повинен займати горизонтальне положення, але при деформуванні зразка він опускається вниз, натискаючи на мікрореле, що регулює його положення в

навантаженому стані, і вмикає двигун для підтяжки верхньої траверси. Результати випробувань записуються в пам'яті комп'ютера через аналогові входи плати АЦП-ЦАП. Таким чином здійснюються автоматичне управління циклічним навантаженням та слідкування за горизонтальним положенням важеля навантажувального пристрою.

На рис. 4 приведено інтерфейс віртуального приладу Lab VIEW при випробуваннях на малоциклову втому. На його панелі знаходяться вікна для коригування "нульових" значень датчиків у мікронах і вольтгах та індикації фази навантаження і розвантаження, а також лічильник кількості циклів навантаження. При цьому обидві секції навантажувального пристрою можуть працювати автономно.

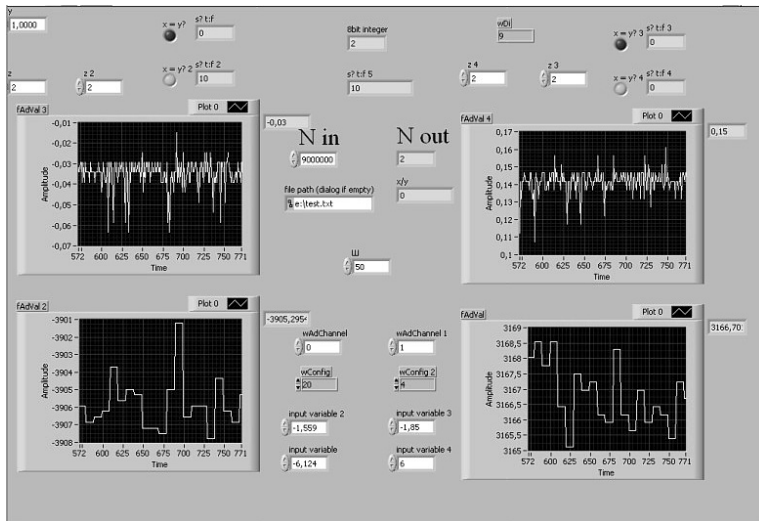


Рис. 4. Інтерфейс віртуального приладу Lab VIEW при випробуваннях на малоциклову втому.

**Результати пробних випробувань.** Нижче наведено результати випробувань матеріалів на термічну втому та циклічну тріщиностійкість. До модернізації машини результати вимірювання температури, зусиль та деформацій зразка записувалися електромеханічними самописцями на папір. Після модернізації всі результати шляхом передачі аналогового сигналу через плату АЦП-ЦАП в пам'яті комп'ютера фіксуються в електронному вигляді. Цей спосіб дає можливість проводити подальший аналіз даних, їх обробку і побудову необхідних залежностей. Система обробки результатів до модернізації машини вимагала детального аналізу оператором великих об'ємів записаних самописцем діаграм, при цьому точність залежала в великій мірі від людського фактора. Так, для прикладу на рис. 5 представлено графіки, які відображають кінетику зміни напружень у зразку під час випробувань.

Порівняння графіків показує, що в обох випадках фіксації даних має місце розкид значень, але їх абсолютне значення в чотири рази менше, ніж до модернізації машини. Після її модернізації з використанням комп'ютера на графіку (рис. 5,б) існує можливість відобразити значення кожного циклу, що дозволяє більш детально аналізувати кінетику зміни напружень, тоді як до модернізації дані записувалися дискретно з певним кроком.

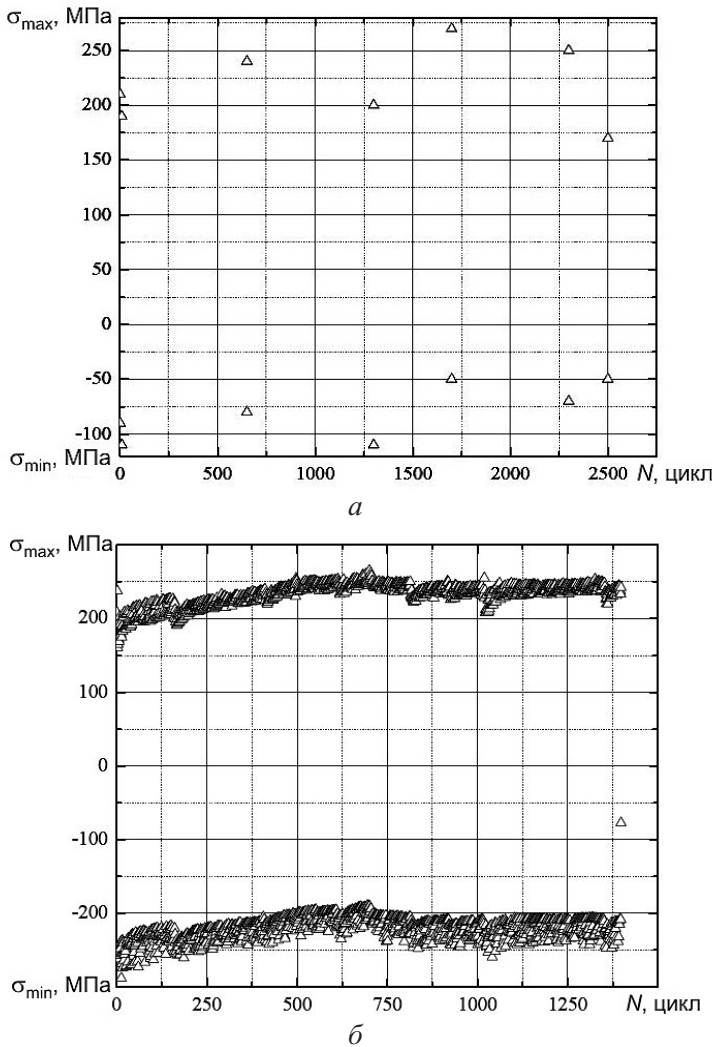


Рис. 5. Кінетика напружень у зразку під час випробувань до (а) і після (б) модернізації машини.

На рис. 6 наведено криві термічної втоми сталі 25Х1М1Ф при циклічному нагріванні зразка за трикутною та трапецієподібною формами термоциклу, на рис. 7 – кінетика циклічних напружень при нагріванні зразка за такими ж формами термоциклу (рис. 7).

Треба зазначити, що точність задання сигналу на обладнанні до модернізації була вкрай нестабільною через вплив технічних чинників на повторюваність циклів задання і відтворення режимів температури випробувань.

Результати випробувань компактних зразків із конструкційної сталі на циклічну тріщиностійкість при частоті навантаження 0,016 Гц отримані на модернізованій машині для випробувань на тривалу циклічну міцність ИП-4М (рис. 8). У даному випадку для отримання кінетичних діаграм втомного руйнування потрібно було приблизно 955 годин безперерних випробувань. Слід зауважити, що при швидкості росту тріщини втоми  $1 \cdot 10^{-7}$  м/цикл за



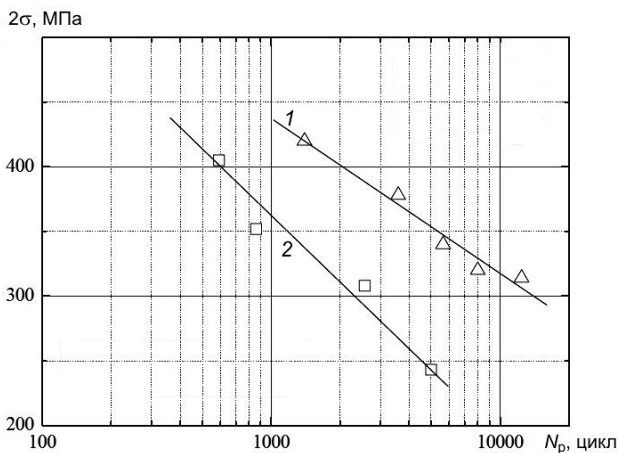
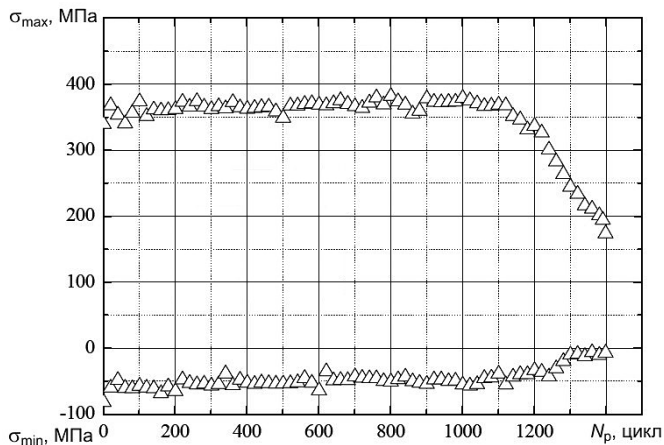
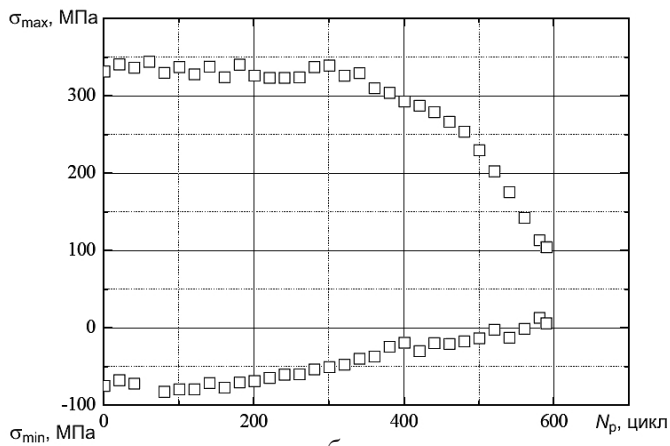


Рис. 6. Результати випробувань зразків зі сталі 25Х1М1Ф на термічну втому при нагріванні за трикутною (1) та трапецієподібною (2) формою термоциклу. ( $T_{\max} = 750^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\min} = 200^{\circ}\text{C}$ .)



а



б

Рис. 7. Кінетика напружень при випробуваннях зразків зі сталі 25Х1М1Ф на термічну втому при нагріванні за трикутною (а) і трапецієподібною (б) формою термоциклу. ( $T_{\max} = 750^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\min} = 200^{\circ}\text{C}$ .)

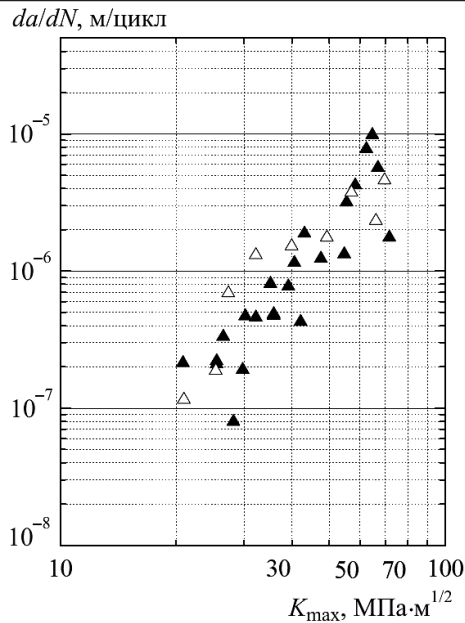


Рис. 8. Кінетична діаграма втомного руйнування конструкційної сталі при частоті навантаження 0,016 Гц.

частоти навантаження 0,016 Гц для її пророщування на 1 мм потрібно 166 годин (7 діб безперервних випробувань). На сучасних електрогідравлічних машинах проводити подібні випробування занадто дорого і складно у технічному плані з урахуванням вартості обслуговування і використання енергетичних та водних ресурсів. На випробувальній машині ИП-4М на кожній секції для циклічного підйому вантажу на силовому важелі встановлено електродвигун потужністю 500 Вт, час роботи якого складає 30% загальної тривалості випробувань при частоті циклічного навантаження 0,016 Гц.

**Висновки.** При проведенні випробувань на термічну втому модельований сигнал на базі програми Lab VIEW для керування температурою в кожному окремому циклі має абсолютну повторюваність, на відміну від моделювання циклів до модернізації. Цей фактор суттєво впливає на точність експерименту. Після модернізації точність задання та повторюваність циклів циклічного нагрівання суттєво покращились, що приводить до підвищення точності вимірювання експериментальних даних у три рази. Значно зменшилась імовірність зупинки випробувань унаслідок технічних чинників, пов'язаних із наявністю в системі управління електромеханічних пристроїв та недосконалих аналогових електронних приладів і людського фактора. Також у віртуальному приладі на основі програми Lab VIEW за бажанням оператора можна змінювати не лише інтерфейс, а й саму логіку побудови змодельованого сигналу управління, так як і математичну обробку отриманого сигналу. Модернізація установки не лише підвищила точність управління циклічним нагріванням лабораторних зразків, а й можливість проведення випробувань за будь-яким режимом нагрівання та внесення оператором змін у ході випробувань, які значно покращують достовірність отримуваних експериментальних результатів.

Модернізація машини ИП-4М дозволяє значно підвищити технічні можливості проведення тривалих випробувань при статичному і циклічному навантаженнях (без обмежень призначати тривалість і форму циклу механічного навантаження, включаючи комбінації трикутної та трапецієподібної форми), знизити їх собівартість. У деяких випадках використання такого типу машин може бути альтернативою для сучасних дорогих електрогідравлічних випробувальних машин.

## Резюме

Описана модернізація існуючих машин для испытаний образцов матеріалів на термічну усталість і циклічну міцність. Модернізація машин заключається в використанні графічного програмування для задання режимів циклічного нагріву або механічного навантаження, а також фіксації в електронному вигляді результатів испытаний. Приведені дані испытаний лабораторних образцов на термічну усталість і циклічну тріщиностійкість при частоті навантаження 0,016 Гц.

1. *Sasakia K. and Takahashi T.* Low cycle thermal fatigue and microstructural change of AC2B-T6 aluminum alloy // *Int. J. Fatigue.* – 2006. – **28.** – P. 203 – 210.
2. *Constantinescu A., Charkaluk E., Lederer G., and Verger L.* A computational approach to thermomechanical fatigue // *Ibid.* – 2004. – **26.** – P. 805 – 818.
3. *Гецов Л. Б., Добина Н. И., Рыбников А. И. и др.* Сопротивление монокристаллического сплава термической усталости // *Пробл. прочности.* – 2008. – № 5. – С. 54 – 71.
4. *Синявский Д. П., Гопкало А. П.* Прочность и долговечность материалов при малоцикловом неизотермическом нагружении. – Киев, 1984. – 66 с. – (Препр./АН УССР, Ин-т пробл. прочности).
5. *Гопкало А. П., Заслоцкая Л. А., Синявский Д. П., Чечель Н. М.* Методические особенности экспериментальных исследований термической усталости металлов // *Пробл. прочности.* – 1980. – № 9. – С. 25 – 30.
6. *Бутырин В. А., Васильковская Т. А., Каратаев В. В., Материкин С. В.* Автоматизация физических исследований и экспериментов: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе Lab VIEW7. – М.: Изд-во ДМК, 2005. – 265 с.

Поступила 12. 12. 2008