

Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, В. В. ЛИСЕНКО, В. О. МЕТЕЛЬОВ, О. А. ТАТАРІНОВА, О. В. ФЕСЮКОВ

КОНСТРУКЦІЯ, АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Надано опис конструкції, системи управління та програмної реалізації управління тепловим режимом експериментальної установки для випробувань на повзучість, яку розроблено в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут». В результаті проведення тестування автоматизованої системи управління та контролю температури було встановлено основні характеристики системи. Визначено, що діапазон завдання регулювання температури від 0 до 999°C. Робочий діапазон нагрівання від 100 до 500°C. Встановлено, що при виконанні умов розміщення зразку і забезпеченні потрібної термоізоляції камери нагрівання, абсолютне значення середньої похибки регулювання температури має значення, що не перевищує $\pm 2^\circ\text{C}$. Середнє-квадратичне значення похибки регулювання не більш $\pm 1,6^\circ\text{C}$. Визначено, що стабільність підтримання температури залежить від місця розміщення зразку: в центральній зоні камери значення коливань температури є меншими, ніж при нижньому розміщенні зразку. Час циклу вимірювання і регулювання температурного режиму 1,0012 сек. Потужність нагрівачів складає 2x1200 Вт (при фазному включенні) і 2x3500 Вт (при лінійному). Мікроконтролер, задіяний у системі, має ресурси для підключення додаткових модулів і первинних перетворювачів, що надає змогу розширення функціональних можливостей системи шляхом організації додаткових вимірювальних каналів. Наведено перші результати тестування при дослідженні повзучості плоских зразків з алюмінієвих сплавів. Характер отриманої за вимірами деформації зразків кривої повзучості повністю відповідає класичним її формам з трьома ділянками. Надано вигляд фрагменту зруйнованого зразку. Модульна конструкція, універсальність і високі технічні характеристики системи та установки у цілому дозволяють її використання при проведенні різноманітних експериментів у наукових дослідженнях і в навчальному процесі.

Ключові слова: експериментальна установка, високотемпературні випробування, повзучість, управління тепловим режимом, апаратне забезпечення, мікроконтролер, програмне забезпечення, зразки.

A description of the design, control system, and software implementation of the thermal mode control of the experimental creep testing machine developed at the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" is given. As a result of testing the automated temperature control system, the main characteristics of the system were established. It was determined that the range of the temperature regulation task is from 0 to 999°C. The working range of heating is from 100 to 500°C. It was established that when the conditions for placing the specimen and ensuring the required thermal insulation of the heating chamber are met, the absolute value of the average temperature adjustment error has a value that does not exceed $\pm 2^\circ\text{C}$. The root-mean-square value of the adjustment error is no more than $\pm 1.6^\circ\text{C}$. It was determined that the stability of temperature maintenance depends on the location of the specimen: in the central zone of the chamber, the values of temperature fluctuations are smaller than when the specimen is placed at the bottom. The cycle time of measuring and adjusting the temperature regime is 1.0012 seconds. The power of the heaters is 2x1200 W (in phase switching) and 2x3500 W (in linear mode). The microcontroller used in the system has resources for connecting additional modules and primary converters, which enables expanding the functionality of the system by organizing additional measurement channels. The first results of testing in the study of creep of plane specimens made from aluminum alloys are presented. The character of the creep curve obtained from the strain measurements of the specimens fully corresponds to its classical forms with three sections. A view of a fragment of the destroyed specimen is provided. The modular design, versatility and high technical characteristics of the system and the testing machine as a whole allow its use in various experiments in research projects and in the educational process.

Key words: testing machine, high temperature testing, creep, thermal control, hardware, microcontroller, software, specimens.

Вступ. Математичне моделювання процесів деформування та руйнування сучасних конструкційних матеріалів, що працюють при підвищених температурах, вимагає побудови рівнянь стану, які адекватно описуватимуть такі процеси. У свою чергу, така побудова вимагає наявності даних щодо деформування та довготривалої міцності матеріалів, що описуються. Ці дані є можливим отримати тільки завдяки проведенню експериментальних випробувань. Для них використовується спеціалізоване експериментальне обладнання.

Більшість сучасних установок, що призначені для вивчення процесів високотемпературного деформування та руйнування, побудовано для проведення експериментів при простому напруженому стані на одновимірних зразках [1, 2]. Такі установки є стандартизованими та промислово випускаються відносно великими партіями [1, 3]. Також в останні роки інтенсивно розвивається технологія випробувань на повзучість з використанням серій зразків малого розміру [4].

Дані, отримані при одновісних експериментах, є вкрай необхідними для побудови рівнянь стану, що й

виконується у переважній більшості випадків [5]. Але з кожним роком збільшується кількість матеріалів з новими, досить складними властивостями, що характеризують їхню поведінку при складному напруженому стані. У зв'язку з цим виникає потреба в проведенні експериментальних випробувань при дво- або тривимірному напруженому стані. Це, безумовно, ускладнює як саме експериментальне устаткування, так й методику проведення досліджень.

У теперішній час існує декілька реалізацій установок для випробувань на повзучість при високих температурах.

Стандартом [6] описуються основні підходи та методи для побудови експериментального обладнання та проведення експериментів на повзучість, в тому числі й при складному напруженому стані, який реалізується у судинах високого тиску, елементах з концентраторами напружень тощо.

Авторами монографії [7] описано підходи до аналізу повзучості при складному напруженому стані. Аналізуються постановки та результати проведення досліджень у зразках з надрізами та тріщинами, компонентів під тиском зі зварними швами тощо.

В роботі С. Холдсворта [8] проаналізовано експериментальні процедури визначення опору повзучості з урахуванням циклічності навантаження з витримками. Авторами роботи [9] обговорюються питання впливу структури металу та взаємодії пов'язаних з нею механічних властивостей у зварному виробі під впливом багатоосьових напружень. Аналізуються питання врахування розглянутої взаємодії при оцінюванні існуючого конструктивного елемента.

Одним з найбільш ефективних типів експериментів є аналіз багатовісної повзучості трубок, які можуть бути навантажені внутрішнім тиском, розтягом та крутінням. Дослідженням таких зразків з різними діаметрами трубчастих складових, що моделюють елементи ядерного реактору, присвячено роботу [10]. У роботі [11] наведено результати експериментального дослідження повзучості трубчастих зразків із феритної сталі при складному напруженому стані. Визначено залежність швидкості сталої повзучості й межі повзучості від типу напруженого стану.

Дану статтю присвячено опису конструкції, системи управління, програмної реалізації управління тепловим режимом експериментальної установки для випробувань на повзучість зразків та моделей, яку розроблено в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».

Конструкція експериментальної установки.

На першому етапі робіт з розробки та апробації експериментальної установки для випробувань зразків та моделей на повзучість та довготривалу міцність було прийнято рішення обмежитись виготовленням установки для проведення випробувань одновимірних зразків. Модульна конструкція нагрівальної печі з чотирьох бокових стінок, що незалежно монтуються, дозволяє їхню заміну на дві таких, в яких передбачено додаткові отвори для системи навантаження, наприклад, для розтягу у двох напрямках. Загальний вигляд розробленої установки представлено на рис. 1.



Рис.1 – Експериментальна установка. Момент монтажу зразку перед встановленням останньої стінки печі

В установці реалізовано пряме навантаження зразку при розтязі набором масивних елементів заданої маси. Переміщення зразку або моделі, розташованих в електричній нагрівальній печі та навантажених розтягом, вимірюються за допомогою стандартної системи екстензометрів. Дані отримуються за допомогою датчиків годинникового типу з роздільною можливістю 0.01 мм. Вимірювання температури виконується за допомогою трьох термопар, які прикріплені на зразку.

Апаратна та програмна реалізація системи управління тепловим режимом

Основною проблемою при виготовленні експериментальної установки було створення надійної сучасної системи вимірювання та підтримки температурного режиму у печі. Для її вирішення було створено автоматизовану систему.

Автоматизована система вимірювання та контролю температури у печі «ТЕРМО-2022» (рис. 2) призначена для використання при проведенні експериментальних досліджень зразків та моделей з метою визначення їхніх механічних властивостей (насамперед, повзучості та довготривалої міцності) в різноманітних температурних умовах. Важливими особливостями системи є спроможність отримання високих температур нагрівання дослідного зразка, висока точність встановлення і підтримування потрібної температури, достатньо значна потужність безконтактних нагрівачів.



Рис. 2 – Зовнішній вигляд системи управління нагріванням та підтримки температури печі експериментальної установки

До основних технічних характеристик належать наступні:

Інформаційні канали вимірювання температури у кількості 5 одиниць, з яких 3 призначені для вимірювання температури зразку, що досліджується. До цих каналів відносяться первинні температурні перетворювачі (ППП) – термопари типу К (ТХА) [12], схеми компенсації «холодного спаю» і аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). Діапазон вимірювання температур від 0 до 800° С. Похибка вимірювань, не більш 2°С. Відстань від точок вимірювань до основного блока системи 2 м.

Датчик значень потрібної температури нагріву (ЦЗТ) – цифровий. Діапазон значень від 0 до 999°С, крок завдання – 1°С.

Відображення значень заданої і вимірюваних температур, стану і потужності нагрівачів проводиться на рідкокристалічному індикаторі РКІ (2 рядки по 16 символів).

Передача значень заданої і вимірюваних температур, стану ТЕН відбувається до персонального комп'ютера (ПК) по послідовному інтерфейсу RS-232 (USB) зі швидкістю 9600 бод, без контролю паритету з 1 стоп-бітом при символному кодуванні в коді ASCII. Інтервал передачі блока даних складає 1 с.

Електричний пристрій нагрівання (ТЕН) складається з двох керамічних нагрівачів типу ЕНКк 160-200. Для забезпечення потрібної температури нагрівання була вибрана напруга живлення 380 В. Спосіб управління процесом нагрівання – широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) з забезпеченням гальванічної розв'язки сигналів керування від силових кіл. Стан включення ТЕН має світлову індикацію.

Силова частина кіл включення ТЕН має елементи захисту від аварійних ситуацій (перевантажень, коротких замикань).

Обробка вимірюваних даних, управління процесом нагрівання, забезпечення потрібної індикації і передачі даних здійснюється за допомогою засобів мікропроцесорної техніки.

Програмне забезпечення системи має відкритий код і можливість подальшого корегування і модифікації. Мова програмування – С. Алгоритм роботи програми виконує функцію ПІ - регулювання.

Живлення мікроконтролерного модуля МК, а також плат АЦП і РКІ здійснюється від інтерфейсу USB або за допомогою зовнішнього блоку живлення (постійна напруга в діапазоні 7 - 12 В). Струм споживання: не більш 400 мА.

Відповідно до технічних вимог на систему, у якості первинного температурного перетворювача ПТП застосовані термопар типу ТХА (міжнародне позначення - К). При цьому вихідний сигнал – напруга, при температурі точки вимірювання 800°C - 33.275 мВ (при температурі вільних кінців 0°C), що потребує попереднього підсилення. Другою особливістю використання термопар є необхідність застосування елементів компенсації температури холодного спаю ПТП [13].

Для забезпечення вимірювань температури зі застосуванням термопар типу К, використовуються модулі на базі мікросхем МАХ6675 [13].

Відмінні особливості модулів:

- компенсація холодного спаю;
- простий, сумісний із SPI, послідовний інтерфейс;
- 12-розрядна роздільна здатність ($0,25^{\circ}\text{C}$);
- діапазон температур, що вимірюються: 0 - 1024°C градуси Цельсія;
- точність вимірювання температури: ± 1.5 градуси Цельсія.

Використання модулів одного типу дає змогу об'єднання сигналів управління CS і SCK для всіх п'яти модулів. Це надає можливість суттєвого зменшення кількості портів МК для підключення.

Сервісні та управляючі елементи системи. У зв'язку з необхідністю забезпечення відображення незначного об'єму вимірювальної і службової інформації, до складу системи входить 16x2 LCD модуль РКІ з блакитним підсвічуванням екрану. Контролер модуля – мікросхема HD44780 [14].

В силовій частині системи для регулювання потужністю нагрівачів ТЕН використовуються силові семістори з елементами оптичної гальванічної розв'язки. Відповідно до вимог технічного завдання, такими є твердотільні реле SSR-40DA [15], які забезпечують включення навантаження з максимальним струмом 40 А при напрузі до 400 В.

Додатковою перевагою модулів SSR є наявність світлодіоду, розміщеного на верхній кришці, який дає змогу візуально стежити за процесом включення цього елемента.

Для забезпечення високої швидкодії і функціональності у якості плати МК з вбудованим перетворювачем інтерфейсу, елементами вторинного живлення і інше, було вибрано модуль Arduino-ATmega2560 [16] з характеристиками:

- мікроконтролер ATmega2560;
- цифрові входи/виходи - 54;
- цифрові / аналогові входи – 16;
- Flash-пам'ять 256 КБ (ATmega2560), з яких 8 КБ використовуються завантажувачем;
- SRAM 8 КБ (ATmega2560);
- EEPROM 4 КБ (ATmega2560);
- тактова частота 16 МГц;
- наявність вбудованого USB інтерфейсу.

Структурну схему системи управління представлено на рис.3.

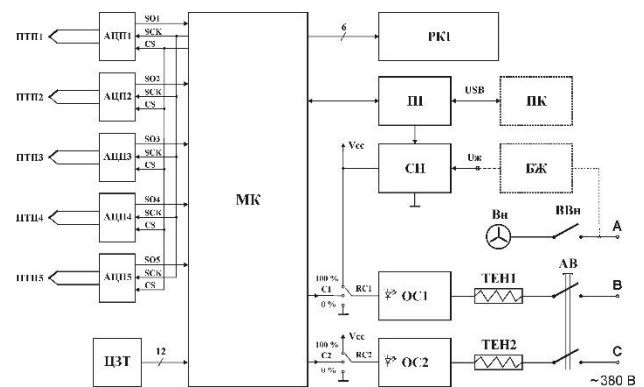


Рис. 3 – Структурна схема системи управління тепловим режимом печі

Канали вимірювання температури складаються з первинних температурних перетворювачів (ПТП) - термопар, які підключені до аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) типу МАХ6675. Отримання вимірювальної інформації мікроконтролером МК від модулів МАХ6675 здійснюється одночасно в послідовному коді по лініях SO1 - SO5. При цьому МК забезпечує відповідно до часової діаграми видачу сигналів вибору АЦП - CS і сигналу стробування - SCK. З метою підвищення швидкодії вимірювань

запуск АЦП і послідовна видача кодів виконується одночасно для всіх АЦП за сигналом стробування SCK.

Значення заданої температури задається на цифровому задавачі ЦЗТ і поступає у двійково-десятичному коді на цифрові входи мікроконтролера.

Рідкокристалічний індикатор РКІ має стандартне (6-ти дровове) підключення і забезпечує якісне відображення вимірювальної і сервісної інформації. Перетворювач інтерфейсу ПІ забезпечує апаратну реалізацію USB інтерфейсу між МК і персональним комп'ютером ПК при виконанні операцій програмування МК і передачі даних. Елементи силової частини мають два канали включення елементів нагрівання. До складу них входять: трьохпозиційний перемикач управління потужністю (100%, 0% і автоматичний режим – С), оптодіодом індикації включення. Термоелектричний нагрівач ТЕН підключається до силової мережі послідовно через ОС. Канали нагрівання включаються на різні фази через автоматичний вимикач АВ, який забезпечує захист силових кіл.

Живлення всіх низьковольтних модулів системи може забезпечуватися від персонального комп'ютеру (по інтерфейсу USB) або зі зовнішнього блока БЖ (+9–12 В) через вбудований стабілізатор напруги СН.

Загальний алгоритм роботи системи враховує вимоги повного автоматизованого управління процесом нагрівання дослідного зразка, забезпечення завдання потрібної температури, інформативності даних про температури у контрольних точках, передачі даних про задані і виміряні параметри і додаткової службової інформації. У зв'язку з запропонованим методом управління (ПІ-регулювання) і відповідно до вимог технічного завдання, алгоритм роботи складається з основної частини, яка побудована на послідовному циклічному виконанні потрібних операцій і дій, та підпрограми обробки переривань, яка забезпечує безпосереднє управління силовими елементами ТЕН. Час виконання робочого циклу T_c програми повинен складати 1 секунду. Тривалість цього часу забезпечується апаратними (таймером – лічильником, налаштованим на внутрішні переривання) і програмними засобами.

При проведенні доведення установки було визначено, що варіант управління температурою нагрівання зразка по даним температури ТЕН є недоцільним, тому новий алгоритм роботи програми має лише один варіант управління – по значенню середньої температури зразка. Блок-схема алгоритму показана на рис. 4. Стисло наведемо пояснення змісту основних модулів.

Програмний модуль 1 – виконання операцій початкового налаштування: призначення портів на введення/виведення, налаштування таймеру-лічильника переривань ТС2, налаштування універсального прийомо-передавача УАПІ, налаштування контролера РКІ.

Програмний модуль 2 – виконання операцій отримання значення заданої температури зі цифрового задавача.

Програмний модуль 3 – виконання операцій вимірювання температури: отримання даних о температурі 5 точок зі модулів МАХ6675.

Програмний модуль 4 – розрахунок значення широтно-імпульсного управління ШІМ по значеннях середньої температури зразку.

Програмний модуль 5 – запис значення t_{on} нагрівача, перезавантаження таймера-лічильника переривань, включення ТЕН при умові що $t_{on} > 0$.

Програмний модуль 6 – індикація на РКІ даних щодо результатів вимірювання температури (ТЕН і зразок), значення заданої температури, відхилення температури зразку від заданого значення, потужність ТЕН у відсотках.

Програмний модуль 7 – передача до ПК даних щодо результатів завдання і вимірювання температури, стану управління ТЕН.

Програмний модуль 8 – процедура очікування завершення циклу процесу управління, який дорівнює 1 секунді. Це визначається таймером-лічильником переривань і передається програмним шляхом.

Основний цикл роботи повторюється без кінця.

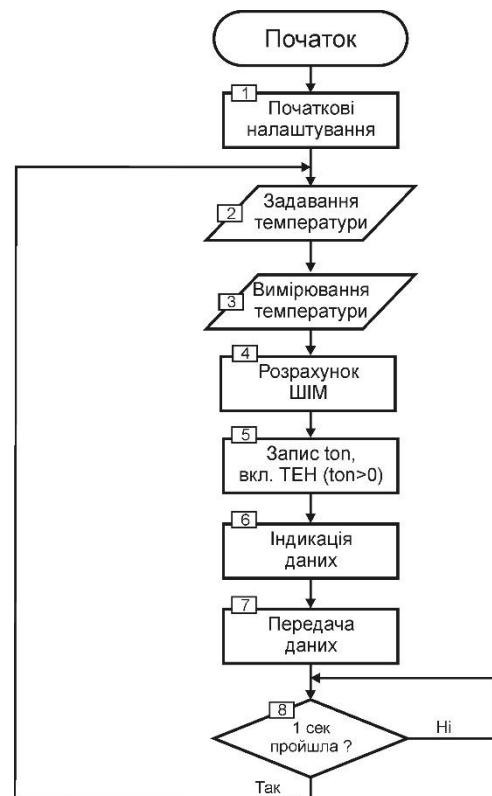


Рис. 4 – Блок-схема алгоритму основної програми

При доведенні системи виконано тестування розроблених програмних модулів (функцій) забезпечення роботи з модулями АЦП МАХ6675, цифровим задавачем температури, налаштування і організація переривань, розрахунку значення широтно-імпульсного управління ШІМ.

Функції програми складені з урахуванням архітектури мікроконтролера АТmega2560 [16].

Наведемо лише опис однієї, але важливої, функції - функції опитування 5 модулів АЦП MAX6675. Для зменшення кількості портів для роботи з 5 термопарами і прискорення часу отримання результатів вимірювання температури, функція виконує дії відповідно до часової діаграми [13] з єдиною для всіх модулів видачею сигналів вибору АЦП - CS і сигналу стробування - SCK. Отримання виміральної інформації мікроконтролером МК від модулів MAX6675 здійснюється в послідовному коді по лініям SO1 - SO5.

В опису MAX6675 [13] наведено порядок дій для управління процесом вимірювання: видачу низького рівня сигналу CS і видачу тактового сигналу SCK, для зчитування результатів на лінії SO, для виведення першого біта на вивід SO. Повне зчитування послідовного інтерфейсу потребує 16 тактів синхронізації. Перший біт, D15, є фіктивним бітом знаку і завжди дорівнює 0. Біти D14-D3 містять перетворені в код значення температури в послідовності від MSB до LSB. Біт D2 зазвичай низький і стає високим, коли вхід термопары відкритий. D1 є низьким, щоб забезпечити ідентифікатор пристрою для MAX6675, а при передаванні біта D0 лінія SO переходить у третій-високоімпедансний стан.

Склад і порядок виконання робочої програми системи відповідає алгоритму (рис. 4), технічним і функціональним вимогам на систему. При цьому основний алгоритм роботи і текст головної функції мають прямий зв'язок з викликами спеціальних функцій. При тестуванні головної функції програми було проведено аналіз її працездатності при вимірюваннях, отриманні і відображенні інформації на екрані індикатора при різних режимах управління, виконання протоколу передачі даних до персонального комп'ютера.

Для забезпечення відображення інформації на РКІ з контролером HD44780 використані функції з бібліотек *alcd.h* і *stdio.h*. Видача даних про результати вимірювань температур, задану температуру, похибку встановлення температури, ступень регулювання потужності нагрівання, проводиться зі використанням стандартних функцій бібліотеки *stdio.h*. Налаштування прийомо-передавача УАПП (швидкість передачі і формат даних, паритет) виконується відповідно до функціональних вимог.

Далі було проведено перевірку правильності функціонування елементів системи і її програмного забезпечення, налаштування коефіцієнтів ПІ-регулятора, визначення отриманих технічних характеристик.

Працездатність системи оцінювалась по даних, що відображаються на індикаторі РКІ і фіксуються у лог-файлах спеціалізованої програми Terminal. При обробці результатів вимірювання температури використовувались данні записані у даних лог-файлах. Також за протоколом лог-файлів було визначено реальний час одного циклу вимірювання і управління за формулою:

$$T_c = \frac{t_k - t_n}{n_e}, \quad (1)$$

де t_k – кінцевий час запису лог-файлу;

t_n – початковий час;

n_e – кількість вимірювань зафіксованих за час від t_n до t_k .

Про результатах розрахунків з даних лог-файлів було встановлено що T_c МК з кварцом 16 МГц, складає 1,0012 секунди – при значенні кількості кроків управління $nT_c = 243$.

В процесі обробки результатів досліджень данні з лог-файлів оброблялися за допомогою Microsoft Excel (рис. 5) і спеціалізованої програми CALIBR 2.0 [17], яка допомагає автоматизувати процес розрахунку абсолютної та відносної похибки, невизначеностей по типу А, В та розширену невизначеність. Головне призначення цієї програми – автоматичне отримання заданої кількості вимірних значень безпосередньо від виміральної системи по інтерфейсу RS-232, або завантаження вже отриманих значень з файлу, та подальша обробка інформації для отримання значень похибок та невизначеностей вимірювання.

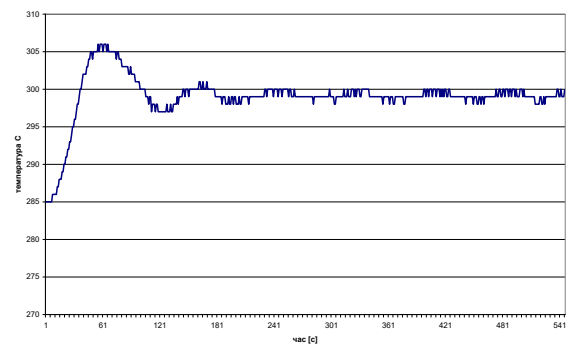


Рис. 5 – Приклад графіку середньої температури зразку у часі

При проведенні досліджень для визначення механічних властивостей конструкційних матеріалів і моделей елементів конструкцій пропонується наступна методика і порядок виконання вимірювань:

1. Виконання підготовчих операцій з розміщення термопар на дослідному зразку, матеріал якого потребує досліджень.

2. Стенд кабелем підключається до роз'єму USB комп'ютера (з попередньо встановленим драйвером порту CH341). Повідомлення «TERMO SYSTEM 2022-2023» на екрані LCD свідчить про наявність живлення і справність модулів МК і LCD.

3. Через 10 секунд на індикаторі з'являється повідомлення про початок роботи. Процес вимірювання і передавання даних супроводжується спалахуванням світлодіоду TX на платі модуля МК.

4. Перевіряється, що при включенні системи нагрівання у холодному стані покази всіх ПТП приблизно відповідають значенню температури повітря у приміщенні.

5. Значення температури нагрівання зразку виставляється на цифровому задавачі температури ЦЗТ.

6. Після завершення підготовчих операцій здійснюється включення живлення силової частини – автоматичним вимикачем АВ в положення «ON».

7. Для забезпечення одночасного спостереження за даними з усіх вимірювальних каналів і запису цих даних у файл застосовується універсальна програма роботи з портами комп'ютера (Terminal).

Тестування при експерименті на повзучість.

Після завершення проведення випробувань основних вузлів та складових частин експериментальної установки було проведено тестові випробування. Для дослідів було обрано зразки з алюмінієвих сплавів (рис. 6), температура випробувань складала 275°C.

Метою тестування була якісна перевірка основних характеристик установки та встановлення можливості отримання кривих повзучості.

Перевірка можливостей роботи установки показала цілком задовільну якість її роботи. Розроблена система управління тепловим режимом зразку при випробуваннях надавала можливість підтримки температури з точністю $\pm 2^\circ\text{C}$ (рис. 7).



Рис.6 – Зразки для досліджень на повзучість

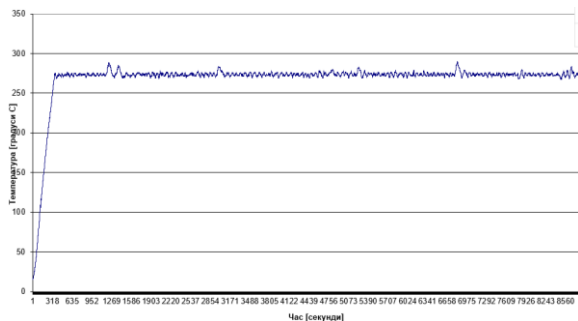


Рис. 7 – Експериментальне визначення значення температури на зразку в залежності від часу

Як приклад, опишемо один з експериментів. При проведенні експерименту зі зразком, наведеним на рис.6 а), він навантажувався напруженням розтягу 20

МПа. При випробуваннях за допомогою відео фіксації показань переміщень двох індикаторів годинникового типу визначались переміщення захвату установки. Ці осереднені по двох індикаторах показання використано для визначення залежності осьової деформації зразку від часу. Відповідний графік наведено на рис. 8. Його якісний аналіз свідчить, що деформування зразку відбулось зі збереженням основних відомих закономірностей перебігу кривих повзучості [4]. Графік має три ділянки: перша, невідновлена повзучість є малою (до 2 хв.) та нею можна знехтувати. Друга, з постійною швидкістю, продовжується приблизно 30 хв, після неї розпочинається третя, прискореної повзучості. Вона закінчується руйнуванням зразку з набутою деформацією 27%. Фрагмент робочої частини зразку після руйнування представлено на рис. 9.

Експеримент на повзучість з використанням зразку, представлено на рис. 6 б) (ліва частина) підтвердив працездатність створеної установки. На правій частині рисунку представлено вигляд продеформованого зразку. За час експерименту 3 год видовження зразку склало 16%, мало місце істотне витончення його робочої частини, що також відповідає класичним уявленням щодо повзучості легких сплавів [4].

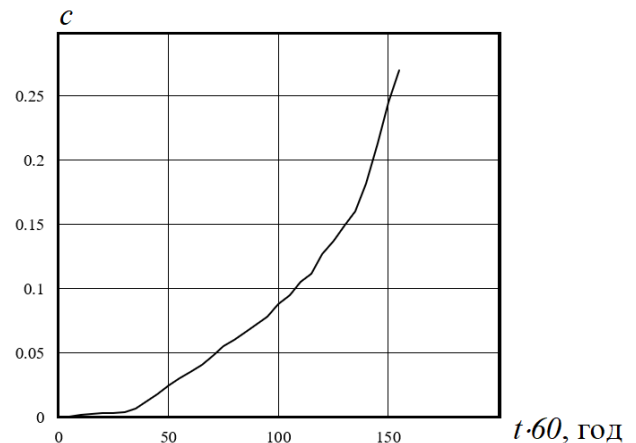


Рис. 8 – Залежність деформації повзучості від часу



Рис. 9 – Фрагмент робочої частини зразку після руйнування

Висновки

У статті надано опис конструкції, системи управління та програмної реалізації управління тепловим режимом експериментальної установки для випробувань на повзучість, яку розроблено в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут». Наведено перші результати тестування, що підтвердили працездатність установки.

В результаті проведення тестування автоматизованої системи управління та контролю температури було встановлено основні характеристики системи. Їх наведено нижче.

Діапазон завдання регулювання температури від 0 до 999°C, крок завдання – 1°C. Робочий діапазон нагрівання від 100 до 500°C.

При виконанні умов розміщення зразку і забезпеченні потрібної термоізоляції камери нагрівання, абсолютне значення середньої похибки регулювання температури має значення, що не перевершує $\pm 2^\circ\text{C}$. Середнє-квадратичне значення похибки регулювання не більш $\pm 1,6^\circ\text{C}$. При цьому порядок значень невизначеності вимірювання по типу $U_a = 0,063^\circ\text{C}$, по типу $U_b = 1,7^\circ\text{C}$. Значення розширеної невизначеності підтримування заданої температури U_p (при $P=0,9$) складає $2,645^\circ\text{C}$.

Стабільність підтримання температури залежить від місця розміщення зразку. В центральній зоні камери значення коливань температури були менше, ніж при нижньому розміщенні зразку. Також особливе значення має забезпечення достатньої теплоізоляції камери нагрівання.

Час циклу вимірювання і регулювання – 1,0012 сек.

Потужність нагрівачів складає 2x1200 Вт (при фазному включенні ТЕНів) і 2x3500 Вт (при лінійному).

Мікроконтролер, задіяний у системі, має ресурси для підключення додаткових модулів і первинних перетворювачів, що дає змогу розширення функціональних можливостей системи шляхом організації додаткових вимірювальних каналів.

Модульна конструкція, універсальність і високі технічні характеристики системи та установки у цілому дозволяють її використання при проведенні різноманітних експериментів у наукових дослідженнях і в навчальному процесі.

Подяка. Ця робота була частково підтримана (Д.В.Бреславський) Фондом Фольксваген "Visiting research program for refugee Ukrainian scientists" (Az. 9C184).

Список літератури

1. *A Creep Testing Machine Second Edition*. 1. Auflage, neue Ausgabe, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.
2. Evans, R. W. "Creep and Constant Strain Rate Deformation." *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, 2001, pp. 1750–57. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00315-6>.
3. *Metallic Materials Uniaxial Creep Testing in Tension Method of Test*. ISO 204:2023, International Organization for Standardization, 2023, <https://www.iso.org/standard/82162.html>. Accessed 28.11.2023.

4. Dyson, C. C., et al. "Use of Small Specimen Creep Data in Component Life Management: A Review." *Materials Science and Technology*, vol. 32, no. 15, Oct. 2016, pp. 1567–81. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1132536>.

5. Penny, R. K., and D. L. Marriott. *Design for Creep*. Springer Netherlands, 1995. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0561-3>.

6. *Rules for the Construction of Nuclear Facility Components, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, Boiler and Pressure Code, Section III, Division 1—Subsection NH*. ASME BPVC.III.1.NH–2015, American Society of Mechanical Engineers, 2001.

7. Gooch, D. J., and I. M. How, editors. *Techniques for Multiaxial Creep Testing*. Springer Netherlands, 1987. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3415-3>.

8. Holdsworth, S. R., et al. "Component Assessment Data Requirements from Creep-Fatigue Tests." *Journal of ASTM International*, vol. 8, no. 3, 2011, p. 103583. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1520/JAI103583>.

9. Coleman, M. C., et al. "Full Size Component Testing under Creep Conditions." *Techniques for Multiaxial Creep Testing*, edited by D. J. Gooch and I. M. How, Springer Netherlands, 1986, pp. 333–56. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1007/978-94-009-3415-3_20.

10. Wang, Hong, et al. *Pressurized Tube Creep Testing of Graded Transition Joints (GTJ) for G91 and 347H Base Metals*. ORNL/TM-2022/2568, 1883775, 1 Aug. 2022, p. ORNL/TM-2022/2568, 1883775. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.2172/1883775>.

11. Plewa, M., and W. Osipiuk. "Creep of Tubular Test Pieces in a Complex State of Stress." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75, no. 1, Jan. 1998, pp. 63–66. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(98\)00021-0](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(98)00021-0).

12. Tumański, Sławomir. *Principles of Electrical Measurement*. Taylor & Francis, 2006.

13. Maxim Integrated Products, Inc. *Cold-Junction-Compensated K- Thermocouple to Digital Converter (0°C to +1024°C)*. MAX6675, Maxim Integrated Products, Inc., 2021, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max6675.pdf>. Accessed 28.11.2023.

14. HITACHI. *HD44780U (LCD-II) Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver*. ADE-207-272(Z), HITACHI, 1998, <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>. Accessed 28.11.2023.

15. FOTEK. *SSR Series DC to AC Solid State Relay*, FOTEK, 2023, <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Components/General/SSR40DA.pdf>. Accessed 28.11.2023.

16. Arduino. *Arduino-MEGA 2560 Rev3. Product Reference Manual*. A000067, Arduino, 2022, <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>. Accessed 28.11.2023.

17. Коржов, І.М., Лисенко, В.В. "Універсальне програмне забезпечення автоматизації обробки результатів вимірювань "CALIBR 2.0"". *Системи обробки інформації*, Вип. 2 (127), с. 132–134.

References (transliterated)

1. *A Creep Testing Machine Second Edition*. 1. Auflage, neue Ausgabe, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.
2. Evans, R. W. "Creep and Constant Strain Rate Deformation." *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, 2001, pp. 1750–57. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00315-6>.
3. *Metallic Materials Uniaxial Creep Testing in Tension Method of Test*. ISO 204:2023, International Organization for Standardization, 2023, <https://www.iso.org/standard/82162.html>. Accessed 28.11.2023.
4. Dyson, C. C., et al. "Use of Small Specimen Creep Data in Component Life Management: A Review." *Materials Science and Technology*, vol. 32, no. 15, Oct. 2016, pp. 1567–81. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1132536>.
5. Penny, R. K., and D. L. Marriott. *Design for Creep*. Springer Netherlands, 1995. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0561-3>.
6. *Rules for the Construction of Nuclear Facility Components, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, Boiler and Pressure*

Code, Section III, Division 1—Subsection NH. ASME BPVC.III.1.NH–2015, American Society of Mechanical Engineers, 2001.

7. Gooch, D. J., and I. M. How, editors. *Techniques for Multiaxial Creep Testing*. Springer Netherlands, 1987. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3415-3>.

8. Holdsworth, S. R., et al. "Component Assessment Data Requirements from Creep-Fatigue Tests." *Journal of ASTM International*, vol. 8, no. 3, 2011, p. 103583. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1520/JAI103583>.

9. Coleman, M. C., et al. "Full Size Component Testing under Creep Conditions." *Techniques for Multiaxial Creep Testing*, edited by D. J. Gooch and I. M. How, Springer Netherlands, 1986, pp. 333–56. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1007/978-94-009-3415-3_20.

10. Wang, Hong, et al. *Pressurized Tube Creep Testing of Graded Transition Joints (GTJ) for G91 and 347H Base Metals*. ORNL/TM-2022/2568, 1883775, 1 Aug. 2022, p. ORNL/TM-2022/2568, 1883775. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.2172/1883775>.

11. Plewa, M., and W. Osipiuk. "Creep of Tubular Test Pieces in a Complex State of Stress." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75, no. 1, Jan. 1998, pp. 63–66. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(98\)00021-0](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(98)00021-0).

12. Tumański, Sławomir. *Principles of Electrical Measurement*. Taylor & Francis, 2006.

13. Maxim Integrated Products, Inc. *Cold-Junction-Compensated K- Thermocouple to Digital Converter (0°C to +1024°C)*. MAX6675, Maxim Integrated Products, Inc., 2021, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max6675.pdf>. Accessed 28.11.2023.

14. HITACHI. *HD44780U (LCD-II) Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver*. ADE-207-272(Z), HITACHI, 1998, <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>. Accessed 28.11.2023.

15. FOTEK. *SSR Series DC to AC Solid State Relay*, FOTEK, 2023, <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Components/General/SSR40DA.pdf>. Accessed 28.11.2023.

16. Arduino. *Arduino-MEGA 2560 Rev3. Product Reference Manual*. A000067, Arduino, 2022, <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>. Accessed 28.11.2023.

17. Korzhov, I.M., Lysenko, V.V. "Universialne prohramne zabezpechennia avtomatyzatsii obrobky rezultativ vymiriuvan "CALIBR 2.0"". *Systemy obrobky informatsii*, Vol. 2 (127), pp. 132–134.

Надійшла (received) 1.12.2023

Відомості про авторів/ About the Authors

Бреславський Дмитро Васильович (Breslavsky Dmytro) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Dmytro.Breslavsky@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3792-5504>.

Лисенко Володимир Валерійович (Lysenko Volodymyr) – доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-61-80; e-mail: Volodymyr.Lysenko@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1424-5124>.

Метельов Володимир Олександрович (Mietelov Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) 707 64 54; e mail: volodymyr.mietelov@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-6296>.

Татарінова Оксана Андріївна (Tatarinova Oksana) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Oksana.Tatarinova@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3090-8469>.

Фесюков Олексій Володимирович (Fesiukov Oleksii) – завідувач лабораторією кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: fesaleksey@gmail.com.