

**О.В. Дроздов**

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України,  
вул. Тимірязєвська, 2, Київ, 01014, Україна,  
тел. +380 44 286 3424, факс. +380 44 286 1684, drozdov@ipp.kiev.ua

## **АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МІЦНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ**



*Розроблено апаратно-програмний комплекс для визначення параметрів міцності перспективних вуглепластикових композиційних матеріалів і елементів конструкцій ракетно-космічної техніки за різних видів механічного навантаження в робочому діапазоні температур. Наведено характеристику складових частин створеного комплексу, а саме багатоканальних інформаційно-вимірювальних систем відповідного програмного забезпечення для вимірювання, накопичення експериментальних даних та виконання розрахунків параметрів міцності таких матеріалів. Виконано тестові випробування комплексу, що довели його працездатність та ефективність.*

*Ключові слова: вуглепластик, композиційні матеріали, міцність, деформація, інформаційно-вимірювальна система.*

Протягом кількох останніх десятиліть значно зросло використання в промисловості різних композиційних неметалічних матеріалів. Таке зростання є характерним і для вуглепластикових композиційних матеріалів, які знаходять все ширше застосування в конструкціях ракетно-космічної і авіаційної техніки [1, 2]. Це зумовлено унікальними властивостями вуглепластиків, а саме їх високою питомою міцністю та жорсткістю, низькими значеннями коефіцієнту температурного розширення і стійкістю до корозії. На відміну від металів, композиційні матеріали є істотно неоднорідними і анізотропними [3], що потребує при їх випробуваннях реєстрації більшої кількості фізичних параметрів (зусилля, деформацій, переміщення тощо). При цьому необхідним є вимірювання, візуалізація і накопичення от-

риманих експериментальних даних в режимі реального часу із застосуванням сучасних комп'ютерних систем. На жаль, більшість існуючих технічних засобів для випробувань конструкційних матеріалів створено в минулому сторіччі та не відповідають вимогам сучасності. Крім того, обробка первинних даних випробувань та визначення характеристик міцності композиційних матеріалів має свої характерні особливості і повинна виконуватися відповідно до спеціально розроблених стандартів.

Важливо відзначити, що технологія виготовлення вуглепластиків або склопластиків і, відповідно, структура матеріалу стандартних зразків для випробувань на міцність та матеріалу конструкції може суттєво відрізнятись. Тому, крім проведення розрахунків міцності та несучої здатності конкретних конструкцій із вуглепластикових композиційних матеріалів з використанням характеристик пружності та

міцності, одержаних при випробуваннях стандартних зразків, на підприємствах ракетно-космічної техніки проводять натурні випробування таких конструкцій, що є високовартісним процесом, складним та тривалим при підготовці та проведенні.

Скоротити обсяг та підвищити інформаційну ефективність вартісних натурних випробувань може виготовлення найбільш відповідальних елементів та менших за розмірами моделей конструкцій, виготовлених за аналогічною технологією, та наступне їх механічне випробування при подібних схемах силового навантаження. Це дозволило б порівняти характеристики міцності та пружності зразків і моделей, виробити методику більш надійного та достовірного розрахунку міцності та несучої здатності конструкцій із композиційних матеріалів. Відсутність у складі стандартних або спеціально розроблених випробувальних установок або стендів багатоканальних інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), унеможливує проведення випробувань моделей і елементів конструкцій з композиційних матеріалів і отримання необхідних експериментальних даних. Внаслідок цього ускладнюється проведення конструкторських розрахунків відповідальних елементів конструкцій ракетно-космічної техніки.

Відповідно до окреслених задач в ході виконання роботи було розроблено та створено спеціалізований апаратно-програмний комплекс, який забезпечив проведення механічних випробувань як стандартних зразків, так і елементів конструкцій із композиційних матеріалів, а також визначення відповідних характеристик міцності. До складу створеного комплексу увійшли багатоканальні інформаційно-вимірювальні системи FpTiraTest-1901 та РМХ-Test відповідно для випробувань зразків та елементів конструкцій із композиційних матеріалів, а також спеціальне програмне забезпечення для вимірювань, накопичення експериментальних даних й розрахунків параметрів міцності цих матеріалів.

### ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА FpTiraTest-1901

З метою автоматизації вимірювання та реєстрації експериментальних даних при випробуванні композиційних матеріалів на стандартних випробувальних установках, зокрема на FP 100/1 й TIRAtest-2300, було використано модулі накопичення даних USB 1901 (ADLINK Technology Inc., Тайвань) (рис. 1). Модуль USB 1901 має 16 аналогових входів, забезпечує дискретність аналого-цифрового перетворення — 16 біт з частотою до 250 000 вибірок за секунду, підключається до виходів штатних систем виміру випробувальних установок FP 100/1 і TIRAtest-2300. Всього в ІВС FpTiraTest-1901 передбачено 4 канали виміру й реєстрації експериментальних даних: перший — це канал виміру зусилля, другий — виміру переміщення траверси випробувальної установки, третій та четвертий — це канали виміру деформацій, наприклад, деформації розтягування і стиснення. Перетворення вхідних фізичних величин, зокрема зусилля, переміщення і деформації, здійснюється за допомогою вимірювальних пристроїв, що входять до складу установок FP 100/1 і TIRAtest 2300, штатних вимірювальних перетворювачів зусилля, датчиків переміщення траверси випро-



Рис. 1. Модуль накопичення даних USB 1901(ADLINK Technology Inc.)

бувальної установки, окремих тензорезисторів для виміру деформацій з використанням тензостанції 4АНЧ-22. Означену ІВС можна використовувати й на інших випробувальних установках та машинах. Для її функціонування було розроблено відповідне програмне забезпечення FrTiraTest, характеристику якого наведено нижче.

### ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА РМХ-TEST

Якщо для випробувань зразків із композиційних матеріалів достатньо ІВС з числом каналів не менше чотирьох, то для випробувань елементів і моделей конструкцій із цих матеріалів необхідні багатоканальні ІВС. Базовим блоком для розробленої багатофункціональної ІВС, враховуючи вигідне співвідношення ціна—технічні характеристики системи, було обрано підсилювально-вимірювальну систему РМХ [4] відомої компанії НВМ (Німеччина), яка виробляє різноманітні вимірювальні пристрої та системи й має досвід їх застосування в різних галузях промисловості. До переваг системи РМХ слід віднести високу точність, надійність, роботу в промислових умовах, використання спеціальних високоякісних вимірювальних технологій від НВМ, можливість нарощування загального числа каналів вимірювання за рахунок підключення до одного комп'ютера декількох систем РМХ.

Система РМХ включає базовий блок (WG002), що містить корпус, комунікаційні роз'єми з індикаторами, 4 слоти, в кожному з яких може бути встановлено чотириканальну вимірювальну плату. Таким чином, максимальна кількість каналів для однієї системи РМХ складає 16. При виборі плат виконували умову реалізації багатоканального виміру деформацій, а також наявність декількох каналів для виміру величин навантаження (зусилля, тиск). З урахуванням цього, систему РМХ було укомплектовано вимірювальними платами (модулями) РХ-455 (3 шт.) і платою РХ-401 (1 шт.). Вимірювальна плата РХ-455 призначена для

підключення мостових і напівмостових тензорезисторних та індуктивних перетворювачів, а також п'єзорезистивних і потенціометричних датчиків.

Вимірювальна плата РХ-401 призначена для введення і подальшого перетворення аналогових сигналів постійного струму і напруги. До неї можуть бути підключені датчики зусилля і/або тиску, які мають вихідний сигнал у вигляді постійної напруги або струму, а також безпосередньо вихідні сигнали випробувальних машин або стендів, пропорційні параметрам навантаження.

У системі РМХ не передбачено підключення будь-яких перетворювачів температур, тому для вимірювання останніх було розроблено й виготовлено окрему п'ятиканальну систему МИКРА-5 на базі програмованого індикатора технологічних параметрів МиКРА ІЗ (Україна).

Зовнішній вигляд малогабаритної ІВС РМХ-TEST, призначеної для проведення випробувань на міцність елементів і моделей конструкцій з композиційних матеріалів, представлено на рис. 2. Блок-схему ІВС РМХ-TEST наведено на рис. 3. Вона включає систему виміру деформацій (12 каналів), величин навантаження, зокрема тиску та зусилля, (4 канали), а також систему виміру температури МИКРА-5 (5 каналів).

Для вимірювання деформацій використовують три чотириканальні вимірювальні плати

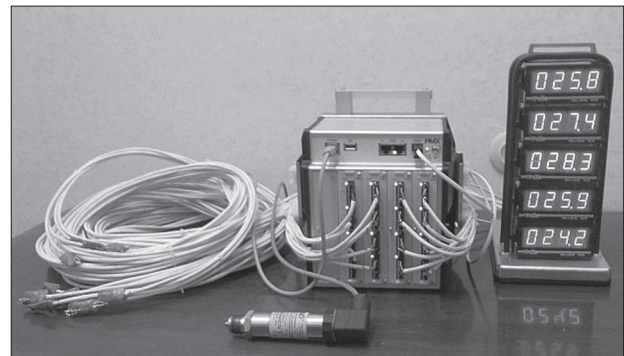


Рис. 2. Зовнішній вигляд ІВС РМХ-TEST

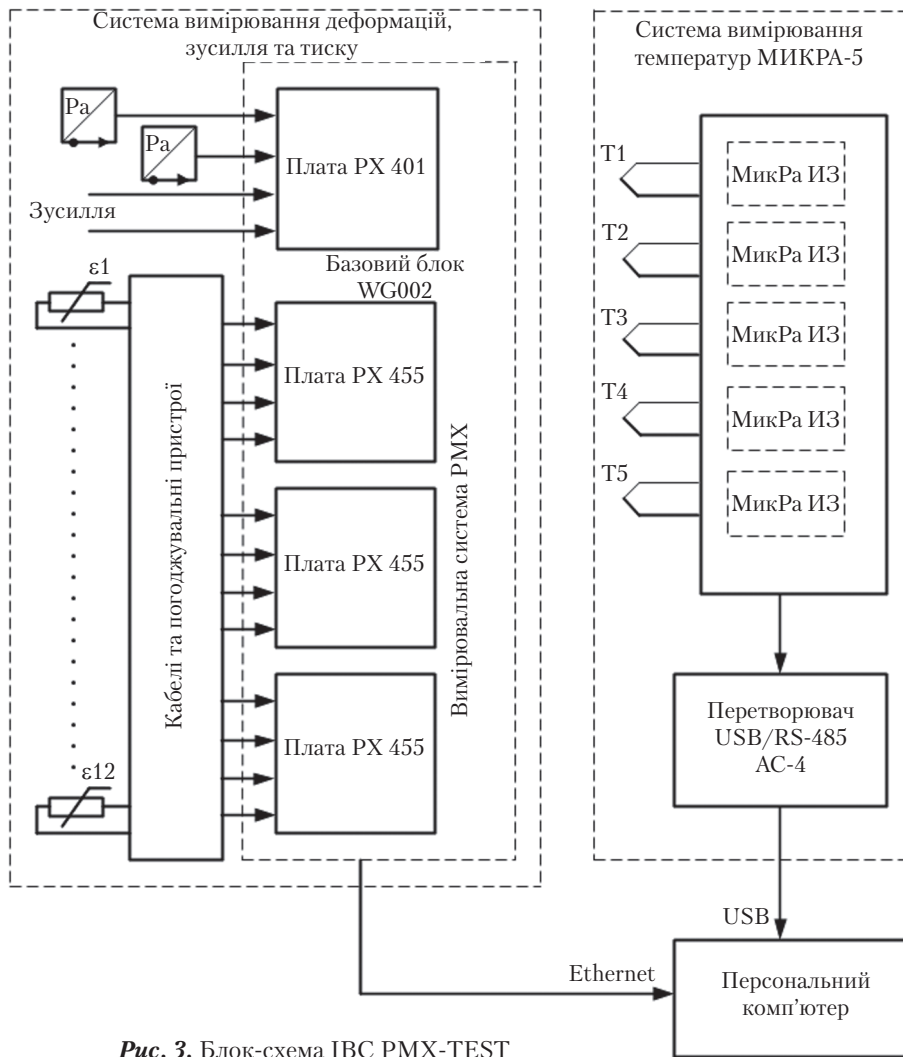


Рис. 3. Блок-схема ІВС PMX-TEST

PX-455, до яких за допомогою кабелів і погоджувальних пристроїв підключено тензорезисторні перетворювачі  $\epsilon_1 \dots \epsilon_{12}$ . Вимір зазначених вище величин навантаження виконують за допомогою чотирьохканальної вимірювальної плати PX-401. ІВС PMX підключається до персонального комп'ютера через інтерфейс Ethernet, а система виміру температури МИКРА-5 – через послідовний інтерфейс USB за допомогою перетворювача USB/RS-485 АС-4.

Вимірювання деформацій поверхні випробовуваного об'єкту в кожному з 12 вимірю-

вальних каналів здійснюють за допомогою тензорезистора з номінальним опором 200 або 400 Ом. Для реалізації напівмостової схеми призначено спеціальні погоджувальні пристрої, які включають додаткові прецизійні резистори. Для виміру величин навантаження (зусилля, тиск) при випробуванні елементів і моделей конструкцій з композиційних матеріалів можуть бути використані будь-які вимірювальні перетворювачі, що забезпечують вихідний струмовий сигнал в діапазоні 4–20 мА або 0–20 мА. У характеризованій ІВС використано два типи перетворювачів тиску: РС-28

(APLISENS, Польща) та SEN-8601 (KOBOLD, Німеччина), що мають однакове конструктивне виконання. Діапазон зміни вихідного струму лежить в межах від 4 до 20 мА, а максимальний діапазон виміру – в межах від 0 до 50 МПа. Межа основної приведенної похибки, що припускається, для перетворювачів тиску РС-28 складає  $\pm 0,2\%$ , а для перетворювачів SEN-8601 – відповідно  $\pm 1\%$ .

При розробці системи вимірювання температури враховували малу величину вихідного сигналу існуючих термоелектричних перетворювачів, що зазвичай не перевищує 50 мВ, необхідність лінеаризації їх вихідного сигналу, температуру холодного спаю перетворювача, можливість роботи в автономному режимі, а також можливість передачі результатів вимірювань до персонального комп'ютера. З урахуванням означених умов було обрано програмований індикатор технологічних параметрів МикРА ІЗ (Україна). Він забезпечує вимірювання та індикацію широкого спектру термоелектричних перетворювачів і передавання даних інтерфейсом RS-485 з використанням відкритого комунікаційного протоколу Modbus RTU [5]. Розроблена система виміру температури МИКРА-5 включає 5 незалежних каналів, кожен з яких містить програмований індикатор МиКРА ІЗ.

#### ПРОГРАМА PMX-TEST-MONITOR

Для роботи системи PMX [4] фірмою НВМ розроблено програмне забезпечення Web Server PMX, яке спеціально призначено для початкової конфігурації каналів системи, первинної обробки сигналів і простої візуалізації отриманих даних. Це програмне забезпечення дозволяє індивідуально для кожного каналу системи задати його початкові параметри, а саме обрати тип вхідного вимірювального перетворювача (повний міст, напівміст та ін.), задати лінійну функцію перетворення сигналу, обнулити початковий сигнал, встановити тип фільтру (Bessel, Batherworth) і його частоту у кожному каналі вимірювань. До недоліків

програмного забезпечення Web Server PMX можна віднести низьку швидкість виведення на екран монітора результатів вимірювань, обмежені можливості графічної візуалізації й збереження даних.

Для забезпечення спільної роботи розроблених вимірювальних систем PMX і МИКРА-5, а також для розширення функціональних можливостей представлення та обробки експериментальних даних, було створено єдину програму PMX-TEST-Monitor. Основними вимогами до неї були зручне та інтуїтивне користування її основними елементами, забезпечення візуалізації даних в режимі реального часу як в цифровому, так і в графічному вигляді, накопичення і збереження експериментальних даних на персональному комп'ютері. Створення єдиної програми PMX-TEST-Monitor стало можливим завдяки тому, що система PMX передбачає роботу за відомим мережевим протоколом Telnet [6], а в системі вимірювання температури МИКРА-5 використовується обмін за відкритим комунікаційним протоколом Modbus RTU [5]. Ці протоколи й було покладено в основу обміну даними між ІВС PMX-TEST та персональним комп'ютером.

Графічний інтерфейс програми PMX-TEST-Monitor зображено на рис. 4. Для зручності користування програмою усі вимірювальні канали згруповано за видом вимірюваної фізичної величини: група каналів вимірювання деформації (D1...D12), група каналів вимірювання величин вантаження (тиск, зусилля – P1...P4), група каналів вимірювання температури (T1...T5). По висоті графічний інтерфейс програми розділений на дві частини. У його верхній лівій частині розташовано панель керування, за допомогою якої здійснюється загальне включення ІВС PMX-TEST, запуск і зупинка процесу накопичення даних, індикація поточного часу й кількості відліків експериментальних даних. Поряд на інтерфейсі розміщено панель представлення величин навантаження P1...P4 (зусилля, тиск тощо, всього 4 канали) і

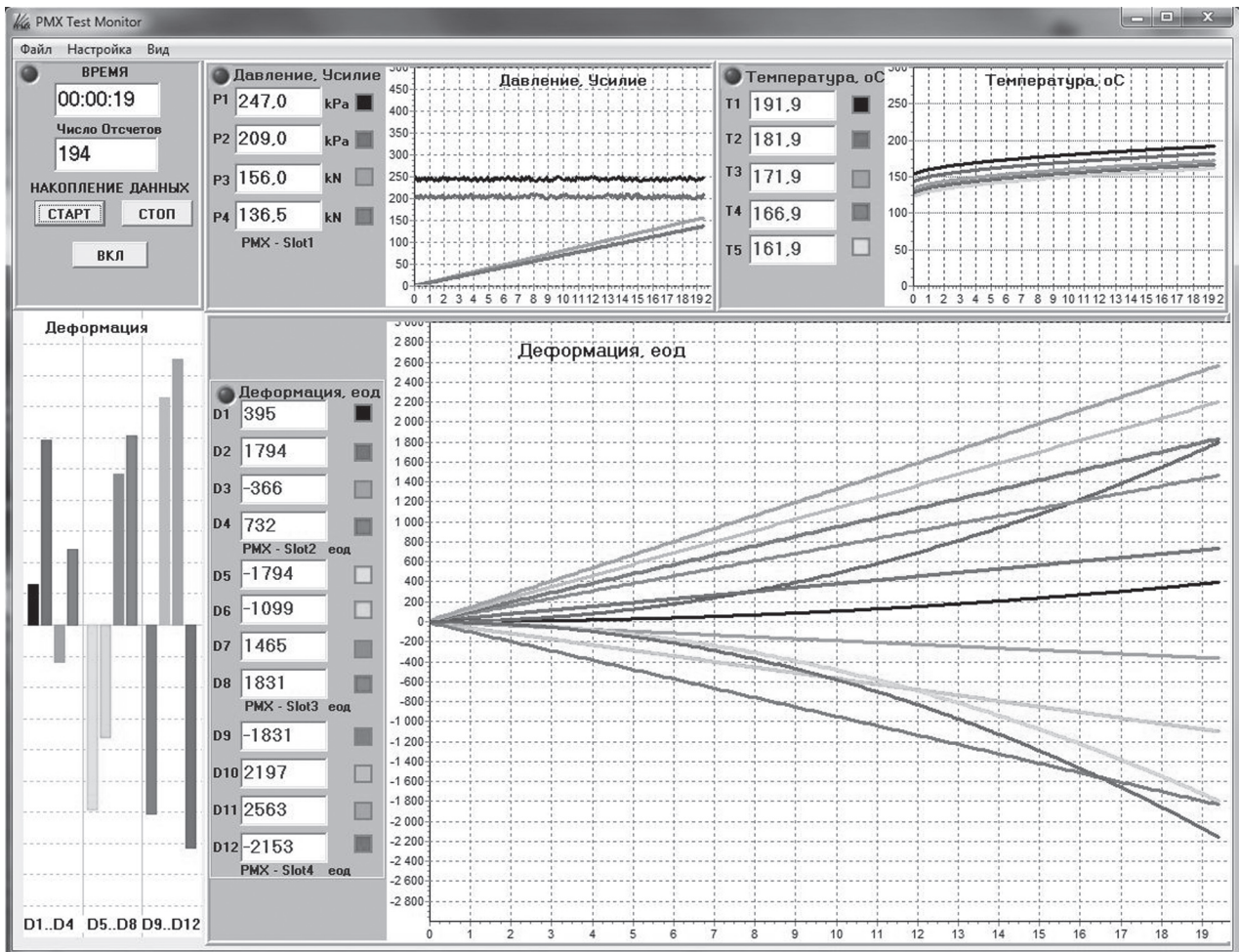


Рис. 4. Графічний інтерфейс програми PMX-TEST-Monitor

праворуч у верхній частині графічного інтерфейсу програми розташовано панель представлення температур T1...T5 (5 каналів). У нижній частині графічного інтерфейсу програми PMX-TEST-Monitor розташовано панель представлення деформацій D1...D12 (12 каналів). Для зручності візуалізації панель деформацій, що вимірюються, у своїй лівій частині містить графічне вікно, в яке виводяться результати вимірів по всіх каналах у вигляді стовпчастої діаграми (рис. 4). Кожна з 21 величини, що вимірюється, подається як у цифровому вигляді на відповідному індикаторі, так і графічно на часовій діаграмі у режимі реального часу.

Програма PMX-TEST-Monitor забезпечує виконання широкого переліку призначених для користувача функцій, зокрема й налаштування вимірювальних каналів з встановленням одиниць фізичної величини, коефіцієнта перетворення, обнулення початкового сигналу по кожному з каналів, гнучке встановлення шкал по осях часових діаграм, встановлення параметрів представлення як цифрових даних, так і графічного зображення. Програма забезпечує збереження накопичених експериментальних даних після випробування шляхом їх запису у текстовий файл з розширенням «\*.csv». Це дозволяє робити їх подальший аналіз і обробку в програмах MS Excel, Origin та ін.

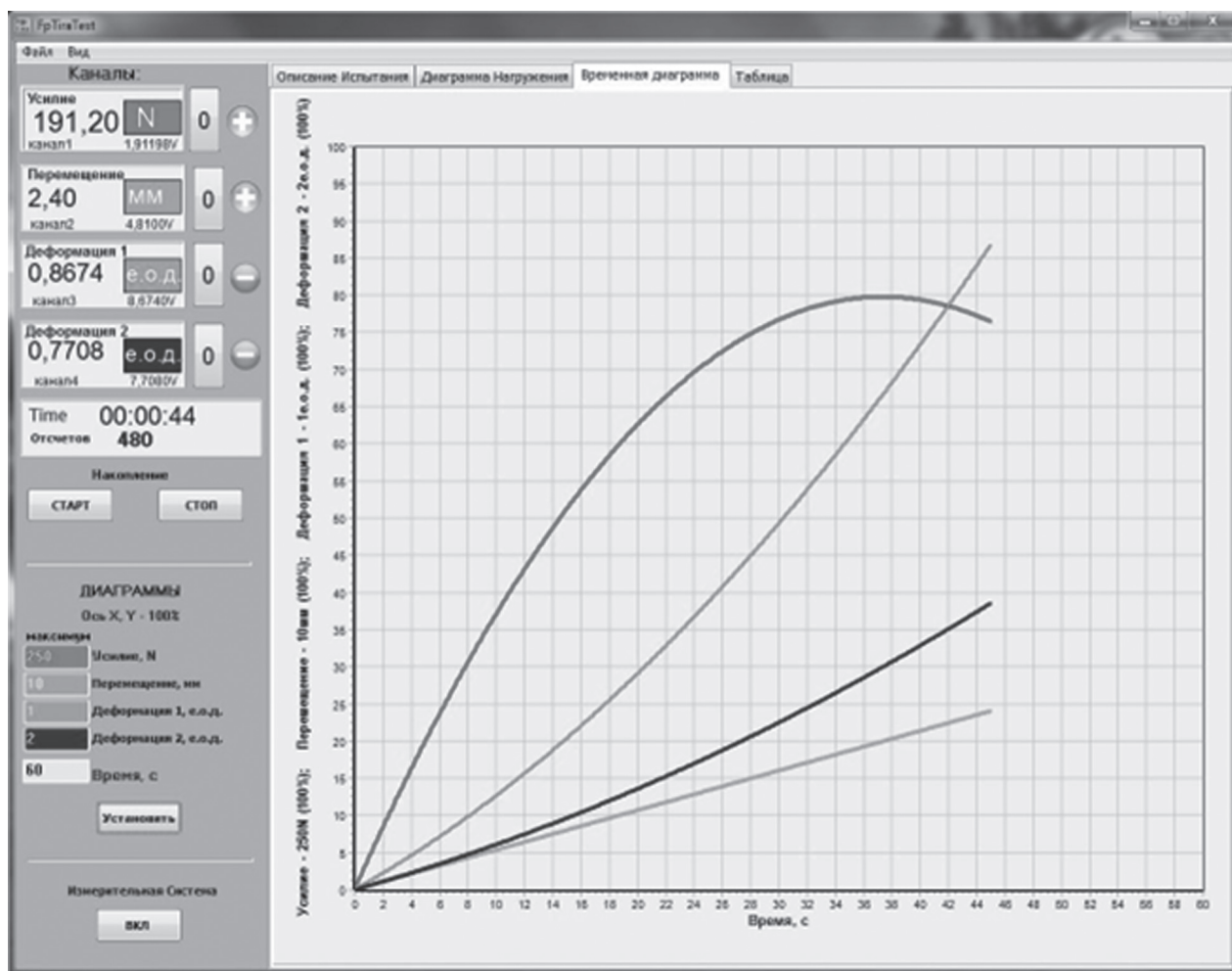


Рис. 5. Графічний інтерфейс програми FpTiraTest

### ПРОГРАМА FpTiraTEST

Програма FpTiraTest забезпечує вимірювання величин зусилля, деформацій, переміщення у режимі реального часу при проведенні випробувань зразків із композиційних вуглепластикових матеріалів на розтягування, стискання, згинання, а також накопичення та збереження експериментальних даних для їх подальшої обробки. За фізичними величинами, що вимірюються та накопичуються, програма узгоджена із стандартами ASTM D 3039 [7], ASTM D695 [8], ASTM D 7264 [9], які регламентують проведення випробувань композиційних матеріалів з пластиковою матрицею

відповідно на розтягування, стискання та згинання.

Графічний інтерфейс програми FpTiraTest представлено на рис. 5. У лівій частині інтерфейсу розташовано панель індикації й управління процесом вимірювання, на якій розміщено окремі цифрові індикатори кожного каналу вимірювання. Поряд розташовано відповідні кнопки встановлення нульового значення та полярності вимірюваної величини. Нижче знаходиться індикатор поточного часу випробування і кількості виконаних відліків (вимірів) з кнопками запуску та зупинки процесу накопичення експериментальних даних.

Ще нижче на панелі розташовано вікна для введення максимальних значень для представлення вимірюваних величин у вигляді кривих на відповідних діаграмах.

Більшу частину графічного інтерфейсу займає ряд спеціальних сторінок, що перемикаються. Сторінку «Опис випробування» призначено для введення і збереження налаштувань вимірювальних каналів (назва фізичної величини, одиниць вимірювання, коефіцієнта перетворення, кількості розрядів після коми у результаті вимірювання, що виводяться для візуалізації), опису експерименту (дати проведення, назви випробувальної установки, виду й швидкості навантаження та ін.), опису зразка (матеріал, номер, основні розміри). Уся інформація, що міститься на цій сторінці, після проведення випробування зберігається у файлі експериментальних даних разом із масивами виміряних величин. Для виведення вимірюваних величин у графічній формі призначено сторінки «Діаграма Навантаження» і «Часова Діаграма». На сторінці «Діаграма Навантаження» на осі Y відкладаються поточні значення зусилля, а на осі X — значення величин по інших каналах (деформації, переміщення траверси машини). На сторінці «Часова Діаграма» на осі X відмічається поточне значення часу випробування, а по осі Y — значення усіх чотирьох величин (зусилля, деформації, переміщення), що вимірюються. При представленні декількох різних фізичних величин з різними максимальними значеннями на одній осі діаграми, ця вісь подається у відносному вигляді, в діапазоні від 0 до 100 % від встановлених максимальних значень по кожному каналу вимірювання. Для оперативного перегляду масивів отриманих даних слугує сторінка «Таблиця». На ній в табличній формі представлено усі масиви виміряних фізичних величин (час, зусилля, переміщення, деформації).

При розробці програми FpTiraTest вжито спеціальних заходів для зменшення випадкових складових похибок вимірювань, що викликані впливом електричних чи електромагніт-

них перешкод від дії промислової мережі змінного струму частотою 50 Гц. Для цього частоту вимірювання по всіх каналах встановлюють максимально високою, а результат вимірювання по кожному з каналів визначається як середнє за проміжок часу кратний інтервалу змінного струму.

### ПРОГРАМА CFRP STRENGTH

Для автоматизації розрахунків характеристик міцності і пружності вуглепластикових композиційних матеріалів при розтягуванні, стисканні та згинанні було розроблено спеціалізовану програму CFRP STRENGTH. Абревіатура CFRP в назві програми означає Carbon Fiber Reinforced Polymer. Програма призначена для обробки первинних експериментальних даних, отриманих при механічних випробуваннях зразків із композиційних матеріалів за допомогою програми FpTiraTest або подібних. Вона забезпечує також статистичну обробку даних з використанням двопараметричного розподілу Вейбулла. Слід зазначити, що випробування на розтягування, стискання і згинання є найбільш поширеними та інформативними видами випробувань для вуглепластикових композиційних матеріалів і передбачають визначення не лише міцності, а й отримання діаграм деформування матеріалу з визначенням відповідних параметрів.

Робота з програмою розпочинається з відкривання і читання файлу з первинними експериментальними даними. Програма забезпечує читання звичайних текстових файлів з розширенням «\*.csv» або «\*.txt». Можливим є також перенесення первинних даних в програму способом «Копіювати—Вставити» з відкритих книг в програмах MS Excel, Origin та ін.

Програма забезпечує попередню обробку первинних експериментальних даних, а саме виконання найчастіше вживаних процедур обробки, зокрема лінійне перетворення масиву вхідних первинних даних по окремому каналу у вихідний масив певної фізичної величини. Зазвичай зареєстровані первинні дані мають



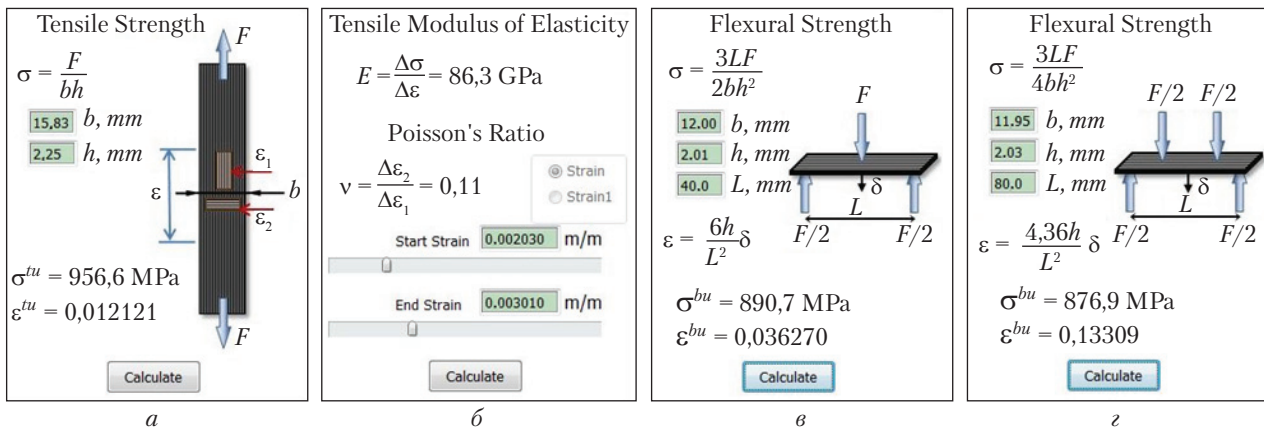


Рис. 6. Частина інтерфейсу програми CFRP STRENGTH для визначення міцності та модуля пружності при розтягуванні (а, б), міцності при згинанні (в, г)

значну випадкову похибку, пов'язану з дією довільних перешкод або зумовлену низьким рівнем вимірюваної величини, який є значно нижчим за номінальний діапазон вимірювання. Зменшити випадкову складову похибки можна шляхом знаходження середньої величини окремих результатів вимірів. З урахуванням цього, програма CFRP STRENGTH реалізує функцію простого ковзаючого середнього, що дозволяє виконати усереднення масиву первинних даних.

Розрахунок механічних характеристик композиційних вуглепластикових матеріалів у зазначеній програмі виконується з урахуванням вимог стандартів [7–9]. Визначення характеристик міцності при розтягуванні, стисканні та згинанні здійснюється із занесенням розмірів зразка за відомими формулами, які представлені на графічному інтерфейсі програми CFRP STRENGTH (рис. 6). Найбільш складним і трудомістким в розрахунку механічних характеристик вуглепластикових композиційних матеріалів є розрахунок модуля пружності. Тому програма CFRP STRENGTH містить певні спеціальні процедури, що дозволяють полегшити розрахунок цієї величини. Для цього на панелі інтерфейсу програми розміщено два повзунки для встановлення початкового і кінцевого значень відносних деформацій

(рис. 6, б), між якими і буде знайдено значення модуля пружності. Згідно стандарту ASTM D 3039 [7] рекомендовано, щоб початкове й кінцеве значення відносних деформацій склали відповідно до 0,001 і 0,003 м/м. Розрахунок модуля пружності в програмі виконується з використанням методу найменших квадратів.

Після одержання розрахованих механічних характеристик матеріалу для окремого зразка програма CFRP STRENGTH забезпечує накопичення отриманих даних в окремій таблиці та подальшу стандартну статистичну обробку результатів випробувань, а саме оцінку середнього значення кожної величини, її стандартного відхилення і коефіцієнта варіації відповідно до стандартів [7–9]. Результати розрахунків можуть бути збережені в текстовому файлі з розширенням «\*.csv» або вставлені в табличному вигляді через буфер обміну (Clipboard) в документ MS Word або MS Excel.

Важливою особливістю програми CFRP Strength є можливість розрахунку параметрів двопараметричного розподілу Вейбулла. Цей розподіл часто використовують для статистичної оцінки міцності матеріалів. Передбачено, що такий розподіл добре описує розподіл міцності окремих вуглецевих волокон, міцність вуглецевих джгутів, результати випробувань на втому композиційних матеріалів з

пластиковою матрицею [10]. Крім того, двопараметричний розподіл Вейбулла застосовують і для статистичної оцінки безпосередньо величини міцності зразків з композиційних вуглепластикових матеріалів при різних видах механічного навантаження.

### ВИПРОБУВАННЯ КОМПЛЕКСУ

З використанням розробленого апаратно-програмного комплексу для визначення параметрів міцності композиційних матеріалів та елементів конструкцій ракетно-космічної техніки було проведено тестові випробування партії зразків нового перспективного вуглепластикового матеріалу, виготовлених на ДП «КБ «Південне». Визначено характеристики їх міцності і пружності при згинанні за кімнатної температури та при 200 °С. Встановлено, що одержані характеристики мають незначний розкид та залишаються на високому рівні при підвищенні температури до 200 °С.

За допомогою створеного комплексу на оригінальному випробувальному обладнанні в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України було проведено тестові випробування модельних оболонок із нового вуглепластикового композиційного матеріалу, виготовлених на ДП «КБ «Південне». Виконано випробування на розтягування, стискання, внутрішній тиск та комбінацію цих навантажень в діапазоні температур від кімнатної до 300 °С.

Випробування показали, що програмний комплекс, створений з використанням сучасного вимірювального обладнання, забезпечує багатоканальне вимірювання деформацій, переміщень, параметрів навантаження при випробуваннях матеріалів та елементів конструкцій із композитів, а програмне забезпечення комплексу реалізує необхідні функції, зокрема високоточні вимірювання, візуалізацію, накопичення, збереження та обробку експериментальних даних і має зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.

Використання комплексу дало можливість одержати важливі фізико-механічні характе-

ристики матеріалу оболонок і порівняти їх із характеристиками матеріалу зразків. Одержані важливі механічні характеристики вуглепластиків, що були випробувані, буде використано для проведення та уточнення конструкторських розрахунків важливих елементів конструкцій ракетно-космічної техніки.

### ВИСНОВКИ

Відповідно до завдання спільно з ДП «КБ «Південне» було створено експериментальний зразок апаратно-програмного комплексу для визначення параметрів міцності перспективних композиційних матеріалів та елементів конструкцій ракетно-космічної техніки за різних видів механічного навантаження в робочому діапазоні температур.

В результаті роботи розроблено апаратне обладнання ІВС FrTiraTest-1901 для проведення випробувань зразків в умовах розтягування, стискання, згинання та ІВС PMX-TEST для проведення випробувань міцності моделей та елементів конструкцій із композиційних матеріалів.

Створено програмне забезпечення у складі програм FrTiraTest та PMX-TEST-Monitor для реєстрації, візуалізації та збереження первинних експериментальних даних при випробуваннях відповідно зразків та елементів (моделей) конструкцій із композиційних матеріалів, а також програму CFRP STRENGTH для визначення характеристик міцності та пружності зазначених матеріалів.

Проведені тестові випробування усіх складових створеного комплексу показали ефективність його функціонування та здатність виконувати поставлені завдання.

Одержано важливі фізико-механічні характеристики вуглепластикового композиційного матеріалу зразків та модельних оболонок, що може підвищити ефективність та достовірність конструкторських розрахунків важливих елементів конструкцій ракетно-космічної техніки й скоротити обсяг їх натурних випробувань.

Зважаючи на наявність в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України оригінальної експериментальної бази, що дозволяє проводити випробування як зразків, так і елементів конструкцій за різних видів термо-механічного навантаження в робочому діапазоні температур, доцільним є подальше спільне використання створеного комплексу як в Інституті, так і в ДП «КБ «Південне».

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Composites: materials of the future. Part 10: Composites in aeronautics. Режим доступу: URL: <http://www.pluscomposites.eu/sites/default/files/Technical-articles-chapter10-EN.pdf> (дата звернення 12.06.2017).
2. Дегтярев А.В., Коваленко В.А., Потапов А.В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники. *Авиационная космическая техника и технология*. 2012. № 2 (89). С. 34–38.
3. Gibson R.F. *Principles of Composite Material Mechanics*. New York: McGraw Hill, Inc., 1994. 425 p.
4. PMX Data Acquisition and Control System. URL: <https://www.hbm.com/en/2981/pmx-signal-conditioner-for-use-in-production/> (дата звернення 12.06.2017).
5. Modbus Tools for Test, Simulation and Programming. URL: <http://www.modbustools.com/modbus.html> (дата звернення 12.06.2017).
6. Welcome to Telnet.org! URL: <http://www.telnet.org/> (дата звернення 12.06.2017).
7. ASTM D 3039/D 3039M – 00 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 13 p.
8. ASTM D 695 – 02a Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. 7 p.
9. ASTM D7264 / D7264M – 15 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 10 p.
10. ASTM D 3479/D 3479M – 96 Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. 6 p.

Стаття надійшла до редакції 12.05.17

#### REFERENCES

1. Composites: materials of the future. Part 10: Composites in aeronautics. [Virtual Resource]. Access Mode: URL: <http://www.pluscomposites.eu/sites/default/files/Technical-articles-chapter10-EN.pdf> (Last accessed: 12.06.2017).

2. Degtyarev A.V., Kovalenko V.A., Potapov A.M. Primenenie kompozitsionnyh materialov pri sozdanii perspektivnyh obraztsov raketnoi tehniki. *Aviatsionnaya kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*. 2012. No. 2(89): 34–38 [in Russian].
3. Gibson R.F. *Principles of Composite Material Mechanics*. New York: McGraw Hill, Inc., 1994. 425 p.
4. PMX Data Acquisition and Control System. [Virtual Resource]. URL: <https://www.hbm.com/en/2981/pmx-signal-conditioner-for-use-in-production/> (Last accessed: 12.06.2017).
5. Modbus Tools for Test, Simulation and Programming. URL: <http://www.modbustools.com/modbus.html> (Last accessed: 12.06.2017).
6. Welcome to Telnet.org! URL: <http://www.telnet.org/> (Last accessed: 12.06.2017).
7. ASTM D 3039/D 3039M – 00 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 13 p.
8. ASTM D 695 – 02a Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. 7 p.
9. ASTM D7264 / D7264M – 15 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 10 p.
10. ASTM D 3479/D 3479M – 96 Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. 6 p.

Received 12.05.17

*Drozdov, O.V.*

Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, 2, Timiryazevska St., Kyiv, 01014, Ukraine, Phone: +38 044 286-34-24, fax: +38 044 286-16-84, drozdov@ipp.kiev.ua

#### HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX TO DETERMINE THE STRENGTH PARAMETERS OF COMPOSITE MATERIALS AND STRUCTURAL ELEMENTS OF ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

A hardware and software complex has been developed to determine the strength parameters of promising carbon fiber reinforced polymers and structural elements of rocket and space equipment under different mechanical loads within the operating temperature range. The developed complex components, in particular, the multi-channel data-measuring systems and the appropriate software for measurement, acquisition of experimental data, and calculation of strength parameters of such materials have been described. The complex capacity and effectiveness have been tested.

*Keywords:* carbon fiber reinforced polymer, composite materials, strength, deformation, and data-measuring system.

*А.В. Дроздов*

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко  
НАН Украины, ул. Тимирязевская, 2,  
Киев, 01014, Украина, тел.+380 44 286 3424,  
факс.+380 44 286 1684, drozdov@ipp.kiev.ua

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Разработано аппаратно-программный комплекс для определения параметров прочности перспективных углепластиковых композиционных материалов и элементов

конструкций ракетно-космической техники при разных видах механической нагрузки в рабочем диапазоне температур. Приведено характеристику составных частей созданного комплекса, а именно многоканальных информационно-измерительных систем и соответствующего программного обеспечения для измерения, накопления экспериментальных данных и выполнения расчетов параметров прочности таких материалов. Выполнено тестовые испытания комплекса, которые показали его работоспособность и эффективность.

*Ключевые слова:* углепластик, композиционные материалы, прочность, деформация, информационно-измерительная система.