

УДК 620.17:681.518.2

№ держреєстрації 0118U004143

Інв. №

Національна академія наук України
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ імені Г.С.Писаренко
(ІПМіц імені Г.С.Писаренко НАН України)

01014, м. Київ, вул. Тімірязевська, 2; тел.(044) 285-16-87; факс 286-16-84

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту проблем
міцності імені. Г.С.Писаренка
НАН України

Академік НАН України

В.В.Харченко

" ____ " _____ 2018

З В І Т

про виконання наукового проекту

«Розробка методик і комплексу випробувальних та інформаційних засобів для оцінки міцності перспективних композиційних матеріалів і працездатності елементів конструкцій ракетно-космічної техніки за умов екстремального термосилового навантаження»

Етап 1 «Аналіз одержаних експериментальних даних щодо фізико-механічних характеристик композиційних матеріалів розроблених ДП «КБ «Південне», формування технічних вимог до розробки комплексу».

за договором № 1596 – від 08.02.2018 р.

Науковий керівник проекту

канд. техн. наук

О. В. Дроздов

Результати цієї роботи розглянуто вченою радою ІПМіц. імені Г.С.Писаренка НАН України «05» грудня 2018 р., протокол №18.

Київ 2018

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник проекту
старший науковий співробітник
канд. техн. наук

О. В. Дроздов
(вступ, розділи 1,3,
висновки)

Провідний науковий співробітник
академік НАН України
д-р. техн. наук, професор

В.В. Харченко
(вступ, висновки)

Провідний науковий співробітник
д-р. техн. наук, професор

Л.В.Кравчук (розділ 3.2)

Провідний науковий співробітник
д-р. техн. наук, професор

В.С.Дзюба (розділ 2)

У виконанні робіт по проекту приймали участь: д.т.н. Кучер Н.К., к.т.н. Волков Ю.М, к.т.н. Барило В.Г., к.т.н.Буйських К.П., гол.інж.-досл. Кондратенко І.С., інж. 1 кат. Жмака В.М.

РЕФЕРАТ

Звіт 40 стор., 23 рисунка, 1 табл., 15 літ. посилань.

Дана робота виконується в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018-2022 рр.

Об'єктом досліджень є методики і комплекс випробувальних та інформаційних засобів для оцінки міцності перспективних композиційних матеріалів і працездатності елементів конструкцій ракетно-космічної техніки за умов екстремального термосилового навантаження.

Мета роботи – розробка методологічного та методичного забезпечення, удосконалення випробувального устаткування і відповідних інформаційно-вимірювальних систем стосовно задач оцінки міцності перспективних композиційних матеріалів і працездатності елементів конструкцій ракетно-космічної техніки одно та багаторазового використання за умов екстремального термосилового навантаження.

Методи дослідження – експериментальний та розрахунковий аналіз фізико-механічних характеристик композиційних матеріалів, структурний і функціональний аналіз випробувального обладнання та методик оцінки міцності перспективних композиційних матеріалів і працездатності елементів конструкцій ракетно-космічної техніки.

У звіті зібрані експериментальні дані щодо фізико-механічних характеристик композиційних матеріалів розроблених Державним підприємством «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» (далі ДП «КБ «Південне»»), виконано їх аналіз. Сформульовані основні технічні вимоги до розробки вищеназваного комплексу.

Ключові слова:

ВУГЛЕПЛАСТИК, КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, МІЦНІСТЬ, ДЕФОРМАЦІЯ, НАВАНТАЖЕННЯ, ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА.

ЗМІСТ

Скорочення	5
Вступ	6
1 Аналіз фізико-механічних характеристик полімерних композиційних матеріалів (ПКМ)	8
1.1 Характеристики міцності і деформативності ПКМ	8
1.2 Коефіцієнт лінійного термічного розширення ПКМ	12
2 Аналіз фізико-механічних характеристик вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ)	14
3 Технічні вимоги до комплексу випробувальних та інформаційних засобів оцінки міцності перспективних композиційних матеріалів і елементів конструкцій РКТ	17
3.1 Оцінка міцності композиційних матеріалів	17
3.2 Оцінка міцності елементів конструкцій РКТ	28
3.2.1 Оцінка міцності стиків під час статичних і циклічних навантажень та нагрівання	28
3.2.2 Оцінка міцності модельних оболонок під час нагрівання і комплексного статичного навантаження	30
3.2.3 Оцінка залишкових ФМХ ПКМ корпусу РДТП після впливу експлуатаційних факторів	31
3.3 Багатоканальні ІВС та програмне забезпечення для оцінки міцності елементів конструкцій РКТ	32
Висновки	37
Перелік джерел посилання	39

СКОРОЧЕННЯ

ВВКМ	–	вуглець-вуглецевий композиційний матеріал
ІВС	–	інформаційно-вимірювальна система
КЛТР	–	коефіцієнт лінійного термічного розширення
КМ	–	композиційний матеріал
ПКМ	–	полімерний композиційний матеріал
ОПКМ	–	односпрямований полімерний композиційний матеріал
ТПКМ	–	тканий полімерний композиційний матеріал
РДТП	–	твердопаливний ракетний двигун
РКТ	–	ракетно-космічна техніка
ФМХ	–	фізико-механічні характеристики

ВСТУП

Даний проект спрямований на підтримку вирішення Інститутом проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України низки завдань що заплановані згідно Програми спільної науково-дослідної діяльності ДП «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля і наукових установ НАН України на 2018 – 2022 рр., а саме:

П.12. Дослідження міцності стиків ракетних конструкцій із шаруватих композиційних матеріалів під час статичних і циклічних впливів та нагрівання числовими та експериментальними методами.

П.13. Дослідження міцності і стійкості оболонкових конструкцій із шаруватих композиційних матеріалів під час нерівномірного нагрівання й комплексного впливу статичних навантажень.

П.15. Дослідження числовими і експериментальними методами впливу експлуатаційних факторів на залишкові фізико-механічні характеристики шаруватих композиційних вуглецевих матеріалів корпусу РДТП.

П.31. Одержання експериментальних даних про фізико-механічні і теплофізичні властивості композиційних та інших неметалевих матеріалів у широкому діапазоні робочих температур.

П.32. Прогнозування міцності конструкцій з полімерних композиційних матеріалів на основі експериментальних досліджень.

Всі приведені вище роботи пов'язані з використанням композиційних матеріалів. Такі матеріали знаходять все більше застосування при виготовленні відповідальних елементів конструкцій ракетно-космічної техніки (РКТ). До таких матеріалів відносяться полімерні композиційні матеріали (ПКМ) що мають високу питому міцність і жорсткість, вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ) здатні витримувати дію надвисоких температур, а також матеріали багатофункціонального покриття (МФП).

Необхідною умовою розрахунків на міцність конструкцій ракетно-космічної техніки із композиційних матеріалів є знання і використання в них

комплексу механічних характеристик. Особливості структури і механічної поведінки таких матеріалів обумовлюють специфічні вимоги до експериментальних досліджень, особливо до забезпечення і проведення механічних випробувань, розрахунку фізико-механічних характеристик (ФМХ) тощо.

Для виконання перерахованих вище робіт і для проведення комплексних випробувань і визначення ФМХ КМ а також моделей і елементів конструкцій із таких матеріалів в робочому діапазоні температур необхідна розробка спеціальних методик і комплексу випробувальних та інформаційних засобів, а саме:

- Розробка та удосконалення експериментального обладнання і устаткування для випробувань КМ і елементів конструкцій з них;
- Доопрацювання спеціалізованих, в тому числі багатоканальних, інформаційно-вимірювальних і керуючих систем для оснащення випробувальних установок та стендів;
- Розробка програмного забезпечення для збору експериментальних даних при випробуваннях композиційних матеріалів і елементів з них, розрахунку характеристик їх міцності і деформативності.
- Розробка нових і удосконалення існуючих методик визначення ФМХ КМ.

1 АНАЛІЗ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ (ПКМ) РОЗРОБЛЕНИХ ДП «КБ «ПІВДЕННЕ»

З використанням випробувального обладнання Інституту проблем міцності ім Г.С.Писаренка НАН України були проведені випробування і визначено ФМХ перспективних композиційних матеріалів розроблених на ДП «КБ «Південне» за останні 10 років. Такі матеріали використовуються в конструкціях нових виробів ракетно-космічної техніки при виготовленні силових конструкційних елементів (оболонки двигунів), теплозахисних та теплоізоляційних покриттів, ерозійно-стійких елементів конструкцій.

1.1 Характеристики міцності і деформативності ПКМ

Прикладом застосування ПКМ для силових конструкційних елементів є розробка і виготовлення силової оболонки твердопаливного ракетного двигуна (РДТП), яка повинна витримувати дію внутрішнього тиску та осьового стиску. Така оболонка виконується методом програмованої мокрої намотки надміцного вуглепластикового джгута на відповідну оправку та її подальшою обробкою.

З метою оптимізації силової оболонки двигуна, забезпечення високих міцностних та пружних характеристик матеріалу конструкції, мінімізації його деградації при підвищених температурах був здійснений пошук і відбір перспективних вуглецевих джгутів [1,2], а також низки зв'язників.

Для оцінки ФМХ матеріалів створених із таких джгутів були виготовлені відповідні заготовки і зразки односпрямованих полімерних композиційних матеріалів (ОПКМ) шарової структури. ФМХ таких матеріалів мали подібні співвідношення для різних напрямків і видів механічного навантаження, а їх температурні залежності мали однаковий характер, тому в даному звіті представлено результати визначення ФМХ останнього ОПКМ, розробленого в 2016 р. (условне позначення – ОПКМ-2016).

Температурні залежності механічних характеристик односпрямованого вуглепластика ОПКМ-2016 при розтягу і стиску приведено на рис.1.1. ОПКМ-2016 має високі значення границі міцності σ_{+1}^b (2010 МПа) та модулю пружності E_{+1} (180 ГПа) уздовж волокон при кімнатній температурі, які не так сильно зменшуються із зростанням температури до 315 °С.

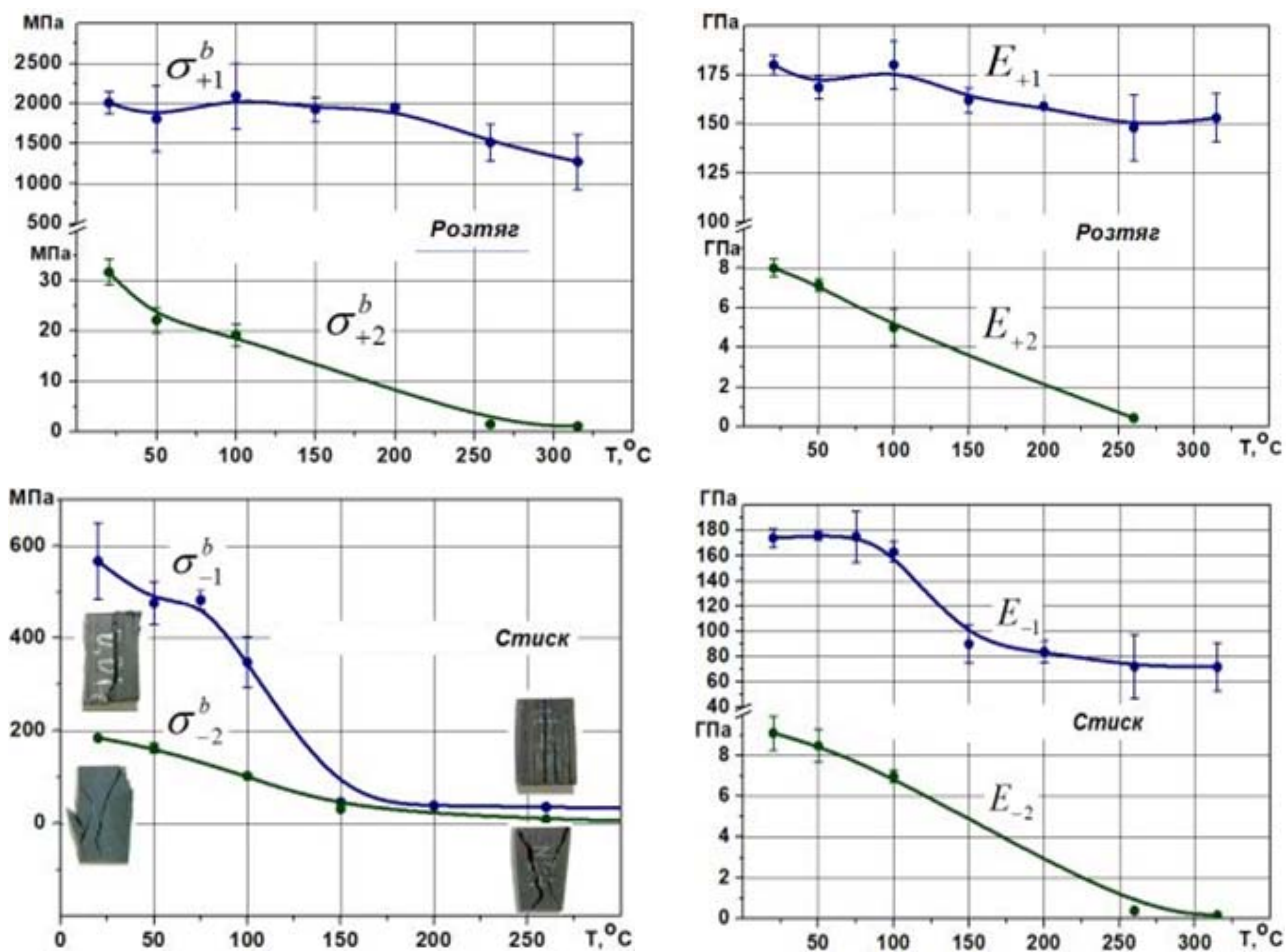


Рис.1.1 – Температурні залежності механічних характеристик односпрямованого вуглепластика ОПКМ-2016 при розтягу і стиску.

Даний вуглепластик при розтягу виявився найбільш міцним в порівнянні з іншими односпрямованими ПКМ. Тому зусилля розтягу зразків значно зросли (30 кН і більше) при їх малій площі поперечного перетину (15 мм²). При таких високих значеннях зусилля розтягу при малій площі поперечного перетину трапляється небажане висмикування зразків із захватів випробувальної машини,

або поздовжній розкол зразка на окремі частини. Для запобігання таких випадків необхідне доопрацювання випробувальної оснастки, технології кріплення зразка в захватах машини і відповідної методики випробувань.

Для створення теплозахисних та теплоізоляційних покриттів та ерозійно-стійких елементів конструкцій РКТ на ДП «КБ «Південне» було створенно низку тканих полімерних композиційних матеріалів (ТПКМ), ФМХ яких було всебічно досліджено. Нижче представлено результати визначення ФМХ двох матеріалів, а саме ТПКМ-2013 і ТПКМ-2015.

На рис.1.2 представлено температурні залежності механічних характеристик вуглепластику ТПКМ-2013 при розтягу і стиску в діапазоні від кімнатної температури до 260 °С. Він відзначається значною анізотропією своїх механічних властивостей (уздовж основи та утку).

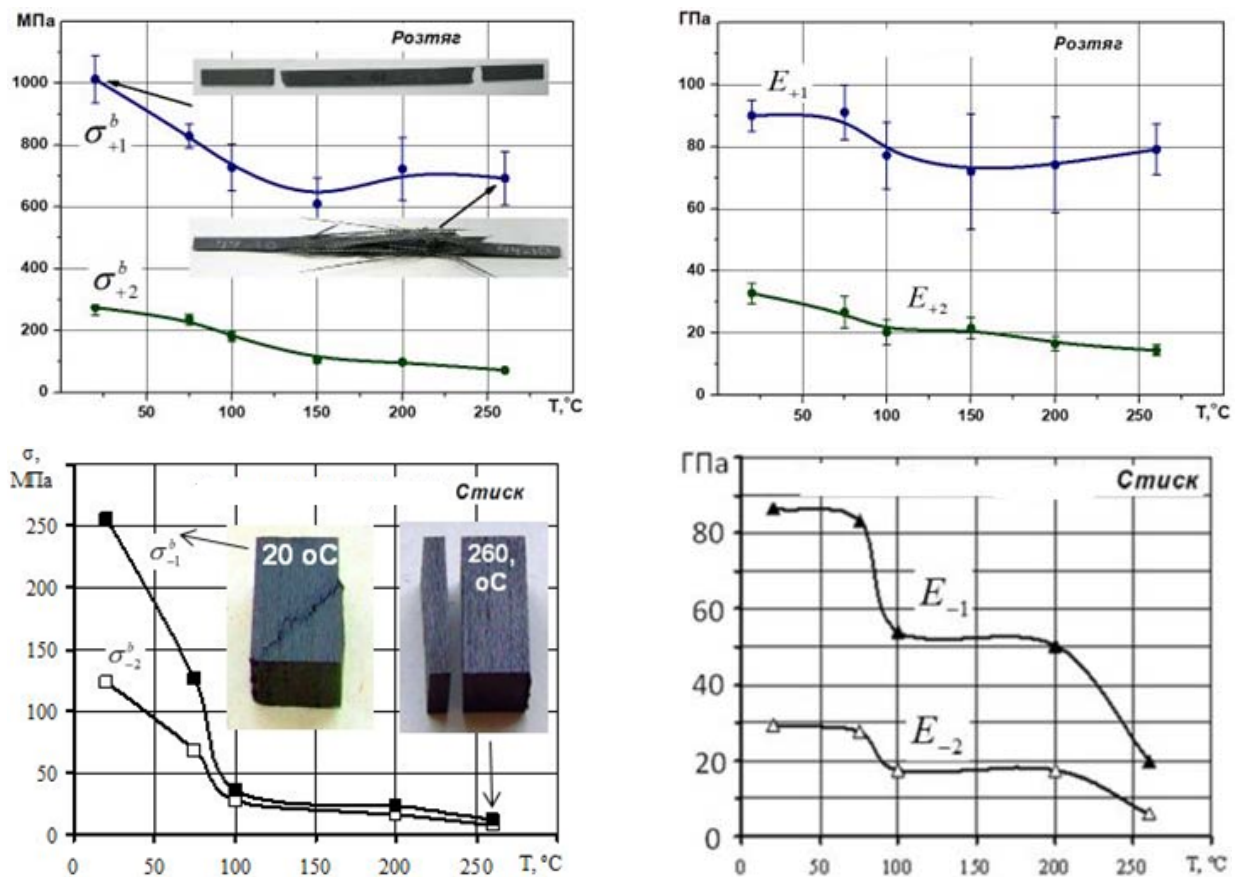


Рис.1.2 – Температурні залежності ФМХ ТПКМ-2013 при розтягу і стиску.

Температурні залежності механічних характеристик вуглепластика ТПКМ-2015 при розтягу і стиску представлені на рис.1.3. Із зростанням температури випробувань від кімнатної до 315 °С спостерігається монотонне зменшення всіх механічних характеристик цього вуглепластика. Відмінністю вуглепластика ТПКМ-2015 від інших створених ПКМ є практично відсутність анізотропії його механічних характеристик, тобто цей матеріал можна вважати ізотропним.

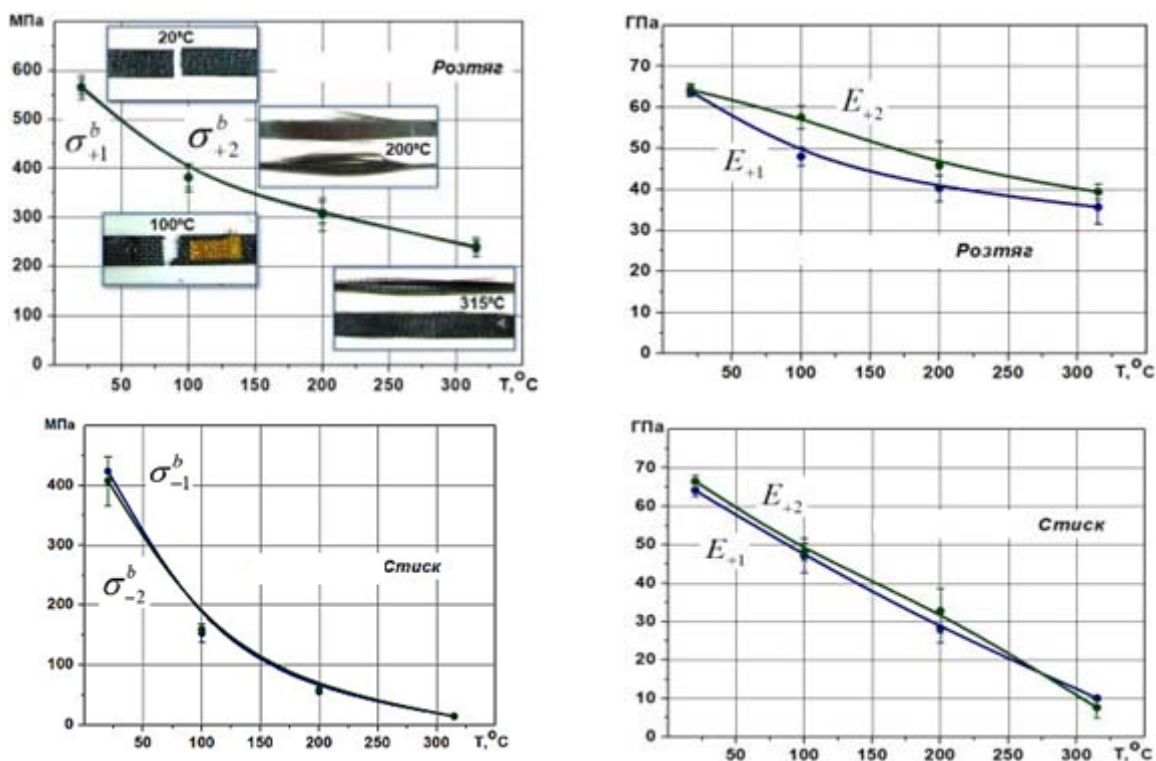


Рис.1.3 – Температурні залежності механічних характеристик вуглепластика ТПКМ-2015 при розтягу і стиску.

Аналізуючи результати випробувань ПКМ, можна зробити висновок, що міцність ОПКМ в напрямку поперек волокон, а також ТПКМ в умовах високих температур значно зменшується (для ОПКМ-2016 майже у 1000 разів), що викликає значні труднощі для проведення випробувань на розтяг при дуже малих зусиллях навантаження зразків. Таке явище потребує розробки специфічних методів і засобів випробувань, наприклад підвищення чутливості

вимірювальної апаратури, автоматичного розвантаження зразка в процесі його нагрівання тощо.

Іншою суттєвою проблемою при виконанні випробувань ПКМ при підвищених температурах є визначення деформації зразків при їх механічному навантаженні, особливо при стиску, коли робоча висота зразка складає приблизно 20 мм і використання високотемпературних екстензометрів чи інших контактних перетворювачів практично неможливо. При проведенні випробувань вищевказаних ПКМ і визначення деформації зразків використовували методику непрямих вимірювань по переміщенню траверси випробувальної машини. На даний час така методика потребує свого подальшого обґрунтування, доопрацювання і оформлення в якості стандарту підприємства.

1.2 Коефіцієнт лінійного термічного розширення ПКМ

Крім механічних характеристик дуже важливе значення мають властивості термічного розширення КМ, які визначають рівень термічних напружень в конструкціях РКТ при їх нагріванні. Для дослідження термічного деформування перспективних ПКМ, які були створені на ДП «КБ «Південне» використовували дилатометр ДКВ-5А дооснащений системою натурного тензо-і термометрування НТТМ-2 та персональним комп'ютером. По результатам випробувань були визначені температурні залежності коефіцієнтів лінійного термічного розширення (КЛТР) таких ПКМ в діапазоні робочих температур.

КЛТР односпрямованого вуглепластика ОПКМ-2016 представлено на рис.1.4. Як і очікувалося такі матеріали мають значну анізотропію термічного деформування. Так уздовж волокон КЛТР має невеликі від'ємні значення. На рис.1.5 представлено температурні залежності КЛТР ТПКМ-2013. Такий вуглепластик має невеликі від'ємні значення КЛТР при кімнатній температурі в обох напрямках, і зростає до $0,0..0,1 \cdot 10^{-6}$ при температурі 250°C , тобто це матеріал можна використовувати для виготовлення терморозміростабільних

елементів РКТ(вуглепластикові ферми, корпуса сканерів, телескопів, об'єктивів, каркаси сонячних батарей тощо).

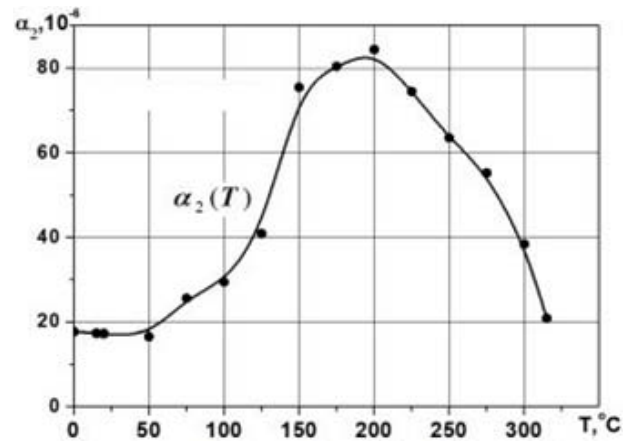
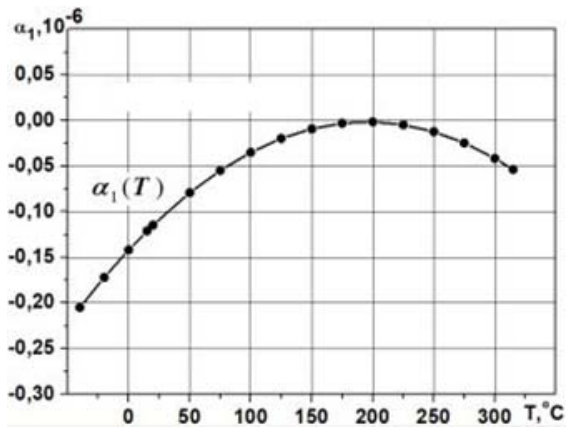


Рис.1.4 – Температурні залежності КЛТР ОПКМ-2016.

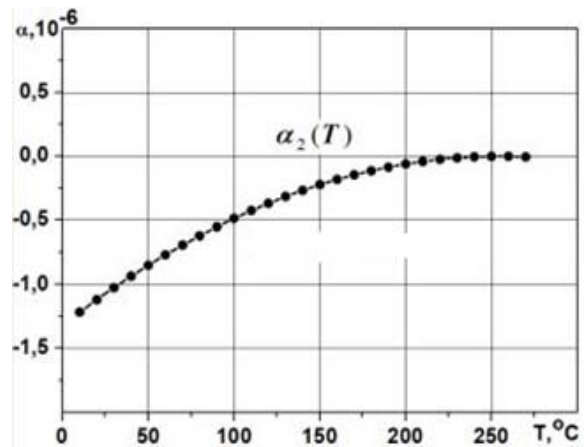
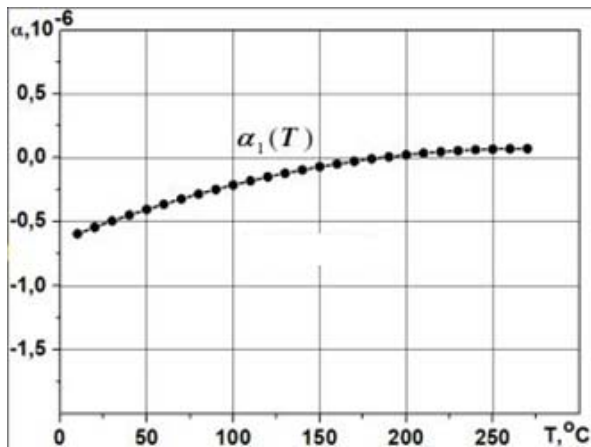


Рис.1.5 – Температурні залежності КЛТР ТПКМ-2013.

2. Аналіз фізико-механічних характеристик вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ)

ВВКМ в РКТ використовують для виготовлення конструкцій соплового блоку ракетних рідкопаливних двигунів та головних обтічників ракетних носіїв. Випробування ВВКМ і визначення їх ФМХ при високих температурах 2000 °С і вище є складною технічною проблемою. На даний час існує досить мало інформації про такі дослідження.

За останні роки на ДП «КБ «Південне» було створено низку ВВКМ, зокрема вуглець-карбідокремнієвий композиційний матеріал (умовне позначення - ВККМ-2013) та вуглець-вуглецевий композиційний матеріал 3D структури (ВВКМ-2016). Температурні залежності механічних характеристик матеріалу ВККМ-2013 представлено на рис.2.1. Границя міцності цього матеріалу при розтягу, стиску та згині при температурі 1800 °С вище на 50% і більше в порівнянні із відповідними значеннями при кімнатній температурі. Подібне підвищення міцності спостерігається і при випробуваннях інших ВВКМ розроблених сторонніми виробниками. При 2500°С для матеріалу ВККМ-2013 відбувається падіння всіх характеристик міцності та пружності за винятком модулю зсуву G .

Іншим перспективним матеріалом для застосування в соплових блоках рідинних ракетних двигунів є вуглець-вуглецевий композиційний матеріал 3D структури ВВКМ-2016 одержаний методом плетіння циліндричної заготовки із вуглецевої нитки з послідуочим насиченням вуглецем у газовій печі. Температурні залежності міцності в умовах розтягу і стиску матеріалу ВВКМ-2016 приведено на рис. 2.2. Цей матеріал має значно більшу границю міцності при розтягу в діапазоні температур від кімнатної до 3000 °С.

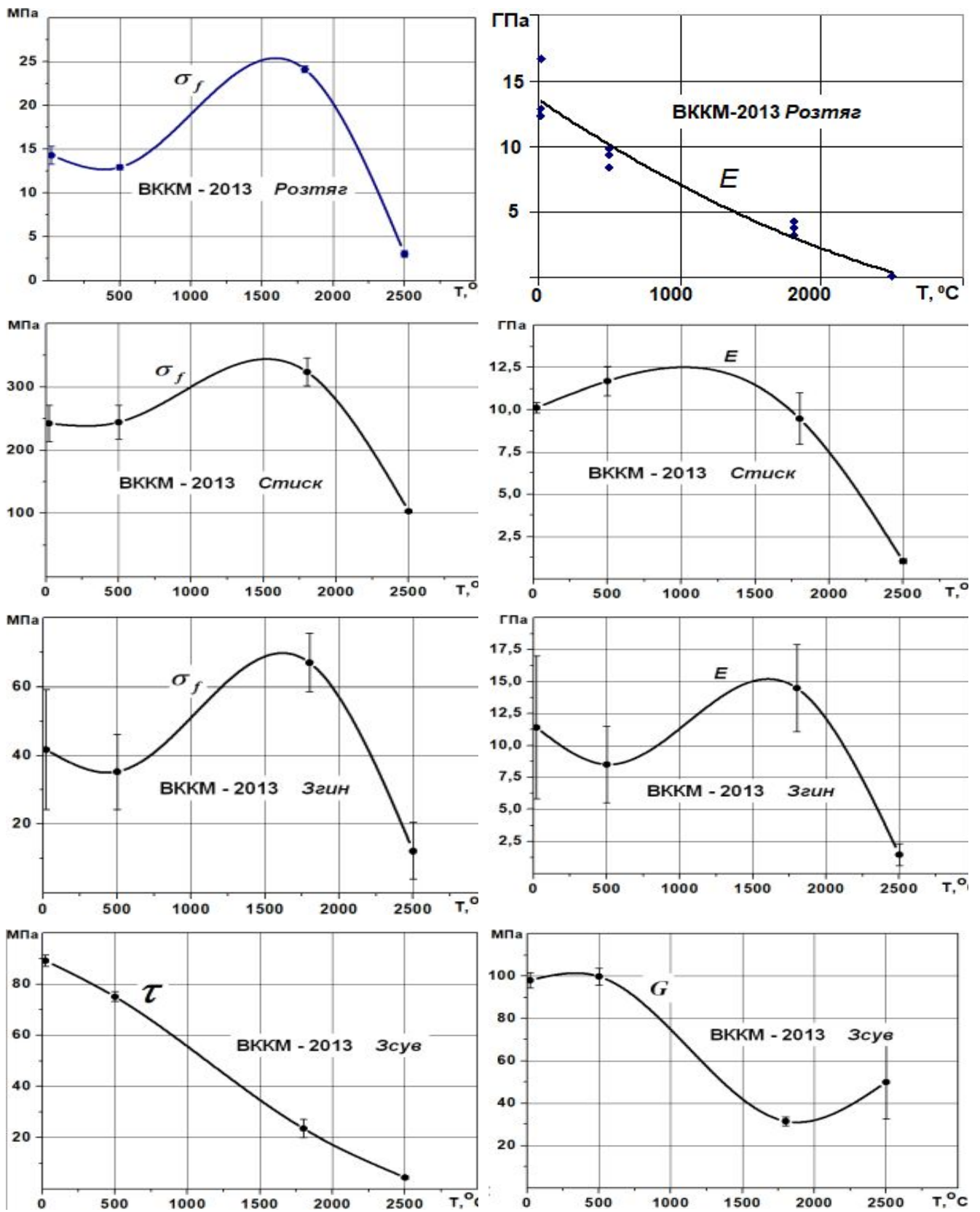


Рис.2.1 – Температурні залежності механічних характеристик матеріалу ВККМ-2013.

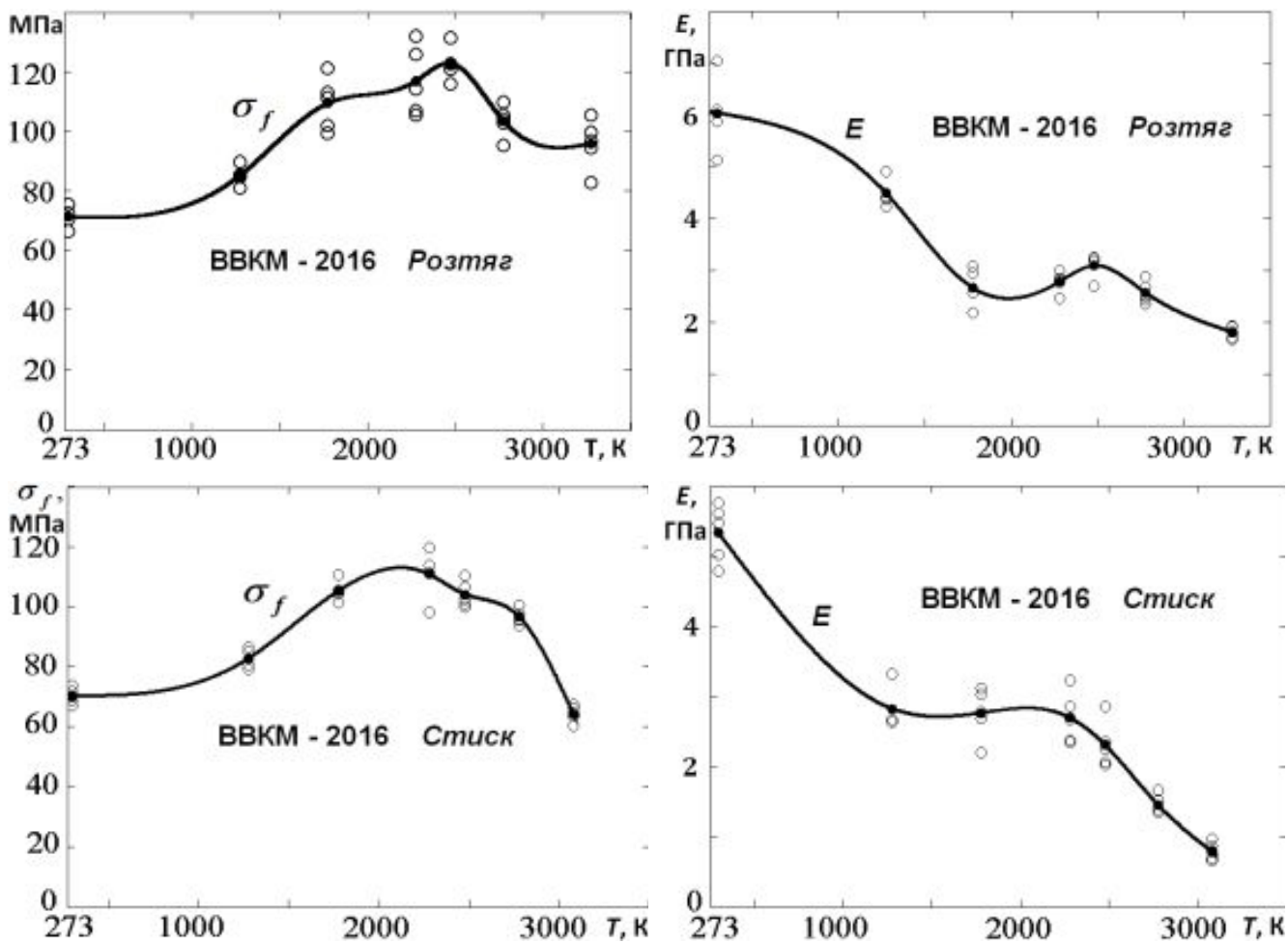


Рис.2.2 – Температурні залежності механічних характеристик матеріалу ВВКМ-2016.

3. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ДО КОМПЛЕКСУ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ПЕРСПЕКТИВНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ РКТ

Вищезазначені у вступі роботи, що заплановані до виконання Програмою спільної науково-дослідної діяльності ДП «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля і наукових установ НАН України на 2018 – 2022 рр., необхідні для розробки та нових перспективних композиційних матеріалів та їх використання у відповідальних елементах конструкцій РКТ.

3.1 Оцінка міцності композиційних матеріалів

На вищевказаний строк заплановано продовження розробки і проведення поточних випробувань та дослідження механічної поведінки нових неметалевих композиційних матеріалів, а саме:

- Вуглецевих полімерних композиційних матеріалів (ПКМ);
- Вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ);
- Матеріалів багатфункціональних покриттів (МФП).

Очікується одержання матеріалів з поліпшеними ФМХ, а саме підвищення міцності, розширення робочого діапазону температур тощо. Перелічені класи матеріалів відрізняються своєю структурою та механічною поведінкою, і тому вимагають використання специфічних методик дослідження та випробувального обладнання.

В результаті аналізу доступної інформації встановлено, що для ПКМ існує основне методологічне забезпечення для проведення механічних випробувань і визначення їх ФМХ, яке регламентується низкою діючих стандартів ASTM, ISO, ГОСТ. В протилежність цьому, на даний час практично відсутні діючі стандарти для випробувань ВВКМ і МФП і тому необхідна методологічне обґрунтування і розробка таких нормативних документів для даних класів матеріалів.

З огляду проведених раніше механічних випробувань композиційних матеріалів та наявності відповідних стандартів, необхідне визначення ФМХ

параметрів міцності при наступних видах механічного навантаження: розтягу, стиску, згині, зсуві.

До характеристик що визначаються повинні включені руйнуючі напруження, модулі пружності, деформації при руйнуванні а також діаграми деформування в умовах розтягу, стиску, згину, зсуву.

Для кожного класу матеріалів (ПКМ, ВВКМ, МФП) повинна бути забезпечена максимальна температура випробувань у повітряному середовищі 350°C, 3000°C, 1350°C відповідно.

В якості базових випробувальних установок буде використано машини BiSS-700, 1958Y-10-1 («Вулкан»), FP-100/1 (рис.3.1). Якщо для випробувань ПКМ, ВВКМ в основному вирішено питання з нагріванням зразків у робочому діапазоні температур та є випробувальна оснастка, то для МФП на даний час відсутнє випробувальне обладнання для однобічного нагрівання і одночасного механічного стискання зразків.

У методичному та методологічному плані необхідна розробка стандартів випробувань і визначення ФМХ ВВКМ і МФП як при нормальній (кімнатній) так і високих до 3000°C (1350°C) температурах.

З метою автоматизації виміру і реєстрації експериментальних даних при випробуванні композиційних матеріалів (ПКМ і МФП) на установках FP 100/1 і TIRAtest-2300 необхідне використання IBC FpTiraTest-1901 [4], основним вузлом якої є модуль накопичення даних USB 1901 (ADLINK Technology Inc.) (рис. 3.2,а), який підключається до виходів систем виміру установок FP 100/1 і TIRAtest-2300. Перетворення вхідних фізичних величин: зусиль, переміщень і деформацій здійснюється за допомогою вимірювальних пристроїв, що входять до складу установок FP 100/1 і TIRAtest-2300, штатних вимірювальних перетворювачів зусилля, датчиків переміщення траверси машини, окремих



а) Машина BiSS-700, $T_{\max}=350^{\circ}\text{C}$



б) Машина 1958Y-10-1 («Вулкан»),
 $T_{\max}=3000^{\circ}\text{C}$



в) Машина FP-100/1, $T_{\max}=1350^{\circ}\text{C}$

Рис. 3.1 – Машини для випробувань композиційних матеріалів ПКМ, ВВКМ, МФП (а, б, в) відповідно.

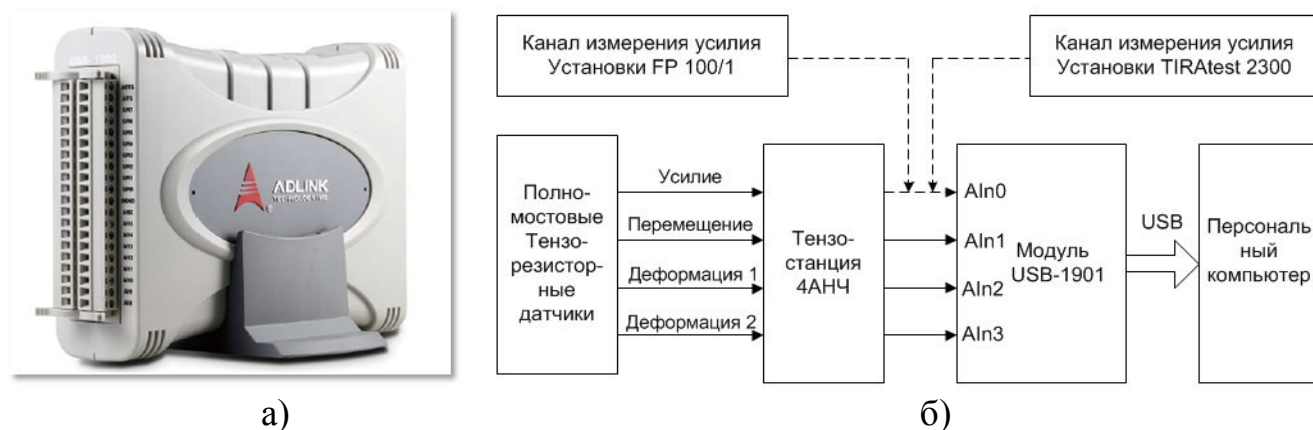


Рис. 3.2 – Модуль накопичення даних USB 1901 (а), блок-схема IBC FpTiraTest-1901 (б)

тензодатчиків для виміру деформацій з використанням тензостанції 4АНЧ-22. Блок-схема IBC FpTiraTest-1901 наведена на рис. 3.2,б.

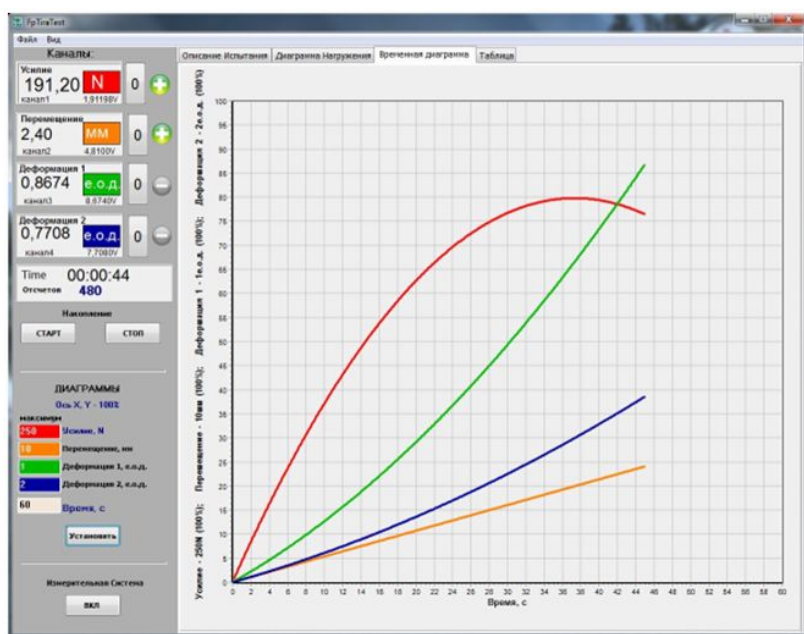
До недоліків даної IBC відноситься застаріла тензостанція 4АНЧ-22, яка часто виходить з ладу. Таким чином необхідна розробка і виготовлення сучасної надійної тензостанції.

Для роботи IBC FpTiraTest-1901 необхідне застосування програми FpTiratest [4], яка забезпечує проведення випробувань композиційних матеріалів (ПКМ, МФП) в умовах розтягу, стиску та згину. Графічний інтерфейс програми FpTiraTest представлений на рис. 3.3.

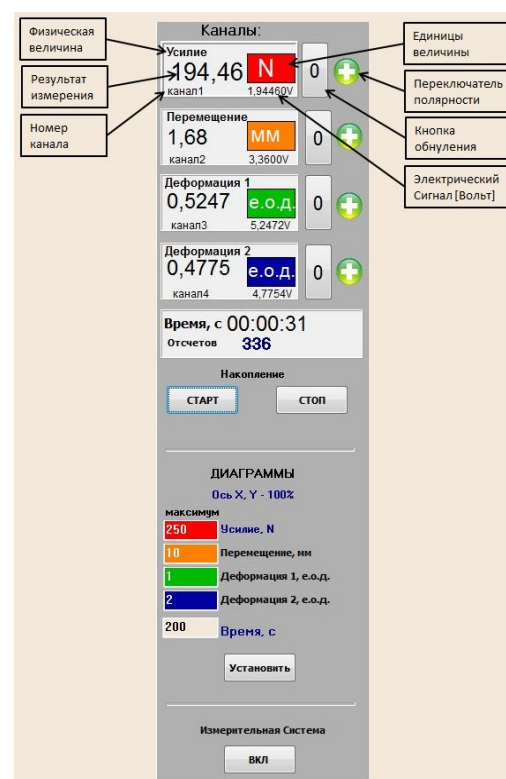
Програма FpTiraTest забезпечує збереження накопичених при випробуванні експериментальних даних в текстовий файл з розширенням "*.csv". що дозволяє легко відкрити такий файл для подальшого аналізу і обробки в програмах MS EXCEL , ORIGIN та ін. Зручною особливістю програми FpTiraTest є можливість виконання калібрування або тарування вимірювальних каналів.

При розробці програми FpTiraTest вжито спеціальних заходів для зменшення випадкової складової похибок вимірювань викликаних впливом

електричних чи електромагнітних перешкод від дії промислової мережі змінного струму частотою 50 Гц. Для цього частота вимірювання по усім каналам встановлюється максимально високою, а результат вимірювання по кожному із каналів усереднюється за проміжок часу кратний інтервалу змінного струму (100 мс). Аналізуючи дану програму, можна зробити висновок, що вона задовольняє вимогам до випробувань композитних матеріалів (ПКМ і МФП) і в подальшому можливе незначне поліпшення деяких процедур та графічного інтерфейсу.



а)



б)

Рис.3.3 – Графічний інтерфейс програми FpTiraTest (а) і панель індикації і управління процесом вимірів (б)

Для автоматизації розрахунків характеристик міцності і пружності ПКМ і МФП, вуглепластиків в тому числі в умовах розтягу, стиску і згину використовуючи первинні експериментальні дані, отримані при механічних випробуваннях зразків із таких матеріалів, необхідно використовувати спеціалізовану програму CFRP Strength [5]. Аббревіатура CFRP в назві програми

означає Carbon Fiber Reinforced Plastic. З усіх можливих видів випробувань програма забезпечує визначення ФМХ в умовах розтягу, стиску і згину, як найбільш поширених, досить інформативних і які передбачають визначення не лише міцності, але і отримання діаграм деформування з розрахунком відповідних параметрів. Програма CFRP Strength дозволяє провести відповідні розрахунки і визначити основні механічні характеристики ПКМ з урахуванням вимог стандартів [6..11], а також проводити статистичну обробку даних з використанням двох-параметричного розподілу Вейбулла [12].

Tensile Strength

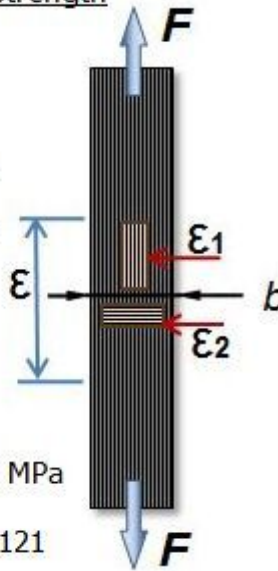
$$\sigma = \frac{F}{bh}$$

15,83

b, mm

2,25

h, mm



$\sigma^{tu} = 956,6 \text{ MPa}$
 $\varepsilon^{tu} = 0,012121$

Tensile Modulus of Elasticity

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = 86,3 \text{ GPa}$$

Poisson's Ratio

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon_1} = 0,11$$

☒ Strain
☐ Strain1

Start Strain

0,002030

m/m

End Strain

0,003010

m/m

а)

б)

Рис. 3.4 – Зовнішній вигляд панелей для визначення межі міцності y^{tu} , відносної деформації при руйнуванні ε^{tu} (а) і модулю пружності E (б) при розтягу зразків

Найбільш складним і трудомістким в розрахунку механічних характеристик полімерних композиційних матеріалів являється розрахунок модуля пружності.

Тому програма CFRP Strength містить деякі спеціальні функції, що дозволяють полегшити розрахунок модуля пружності. Для цього на панелі (рис. 3.б) розміщені два повзунки, для установки початкового (Start Strain) і кінцевого

(End Strain) значень відносних деформацій, в межах яких визначатиметься значення модуля пружності (кут нахилу діаграми $y - e$).

Розрахунок характеристик міцності і пружності при випробуваннях на стиск робиться згідно із стандартом ASTM D 695 [7] і мало чим відрізняється від вищеописаних розрахунків при розтягу зразків.

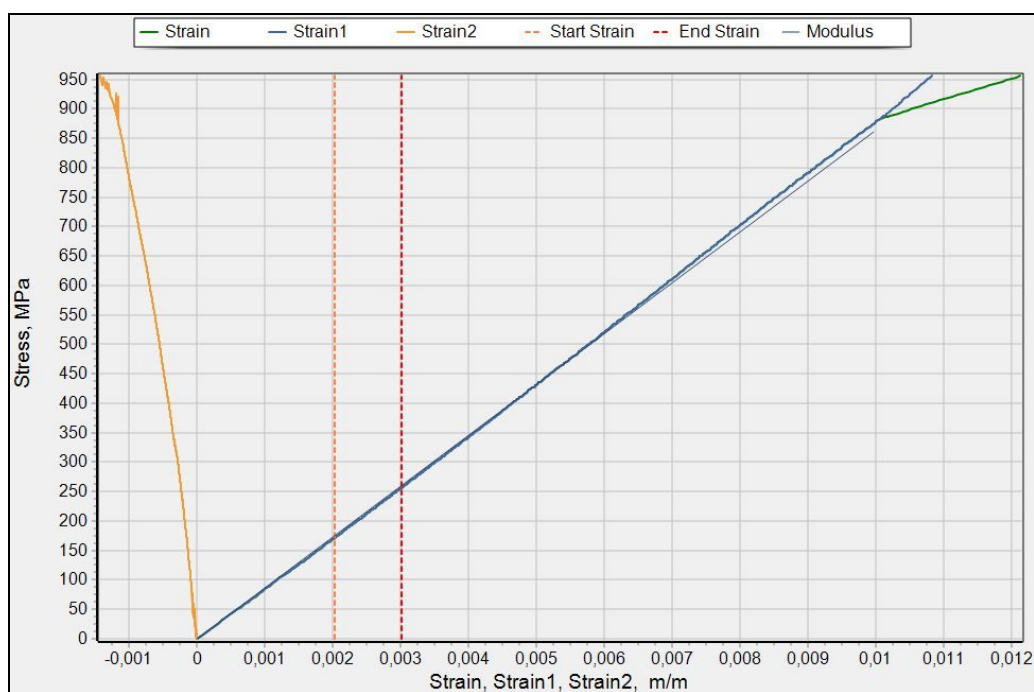


Рис. 3.5 – Діаграми деформування при розтягу зразків

При випробуванні полімерних композиційних матеріалів в умовах згину, важливою величиною є прогин зразка. У разі реєстрації цієї величини стає можливим визначення пружних властивостей матеріалу при згині зразків. Розрахунок характеристик міцності і пружності при згині робиться згідно із стандартом ASTM D7264 [8] по формулах, приведених на рис.3.6а, 3.6б. У разі чотирьох-точкового згину, приймається, що довжина внутрішнього прольоту між точками прикладення зусилля дорівнює половині довжини зовнішнього прольоту.

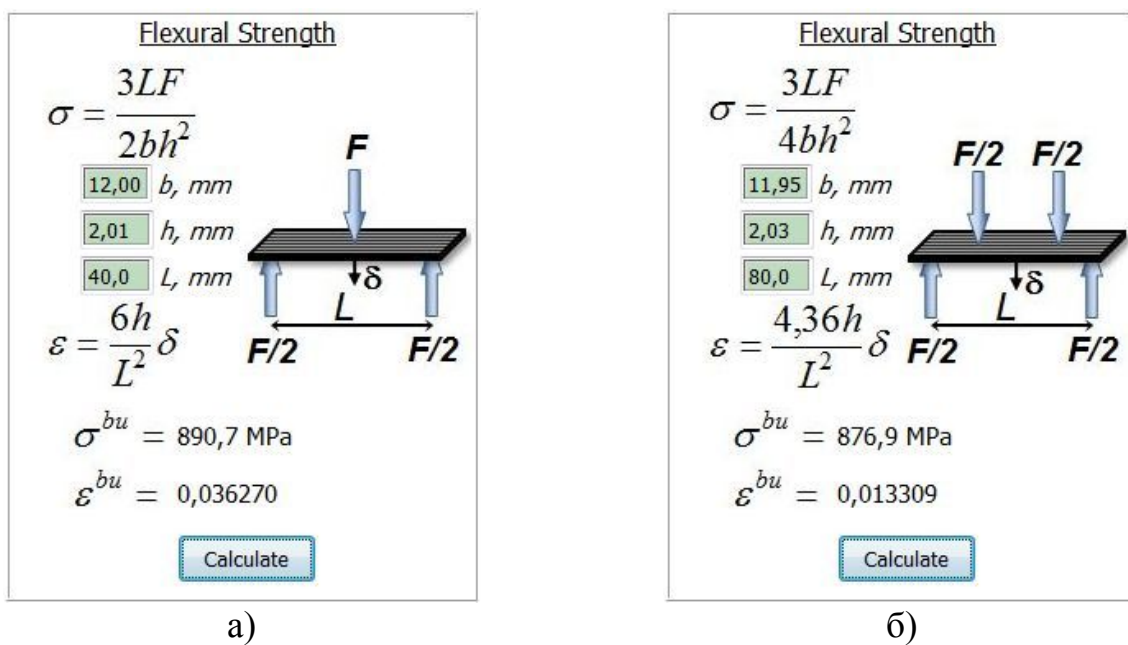


Рис. 3.6 – Зовнішній вигляд панелей для визначення міцності в умовах трьох-точкового (а) чотирьох-точкового (б) згину зразків.

Аналізуючи саму програму CFRP Strength, а також спираючись на накопичений досвід по її використанню наступні основні технічні вимоги доопрацювання даної програми:

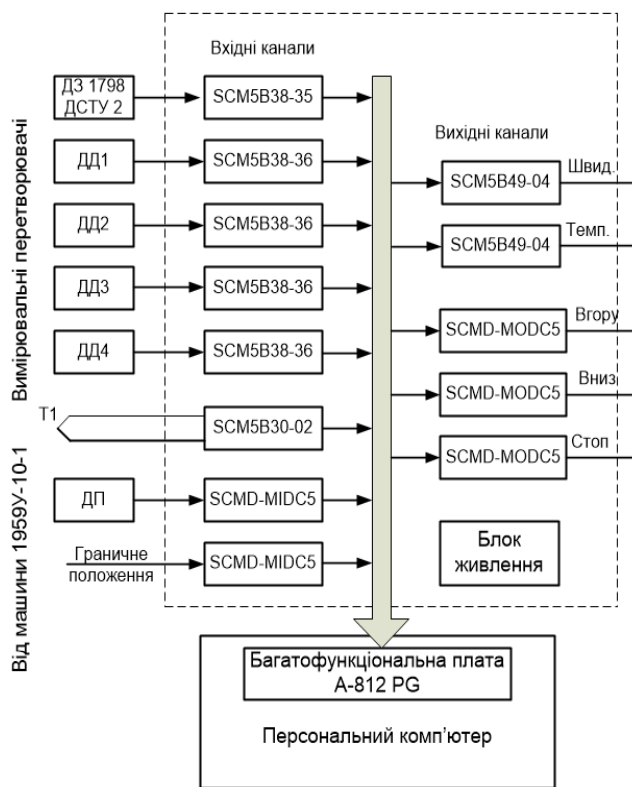
- Переробити процедуру графічного розрахунку модуля пружності. Замість встановлення двох рівнів деформації, в межах яких повинен визначатися модуль пружності, необхідно встановлювати два рівня напруження. Така переробка зумовлена тим, що поздовжня і поперечна (трансверсальна) деформація суттєво відрізняються по своєму значенню.
- Реалізувати процедуру зміщення зареєстрованої діаграми деформування до нульових початкових значень по напруженню і деформації та формуванню початкової лінійної ділянки діаграми з відповідним визначенням модулем пружності. Ця процедура відома як «Toe Compensation» [6].
- Розробити та реалізувати набір чи послідовність спеціальних функцій (процедур) користувача, які дали би змогу непрямого розрахунку поздовжньої деформації зразка і модуля пружності по зареєстрованим значенням переміщення траверси випробувальної машини. Виконання такого

доопрацювання повинне ґрунтуватись на новій методиці непрямого визначення деформації зразка, коли неможливе безпосереднє встановлення на ньому тензодатчиків чи екстензометра.

Для випробувань ВКМ при температурах до 3000 °С необхідно використовувати комплекс «Вулкан» створений на базі випробувальної машини 1958У-10-1, який забезпечує випробування зразків на розтяг, стиск, згин та інші види навантаження в діапазоні температур від кімнатної до 3000 °С [15]. Функціонування комплексу здійснюється за допомогою розробленої для таких випробувань багатоканальної вимірювально-керуючої ї системи 1958У-10-1 (рис. 3.7 а).



а)



б)

Рис. 3.7 – Вимірювально-керуюча система 1958У-10-1: зовнішній вигляд (а), структурна блок-схема (б)

При розробці багатоканальної ІВС 1958У-10-1 слід враховувати особливості проведення випробувань ВВКМ на комплексі Вулкан, а саме

розігрівання зразків за рахунок прямого пропускання струму, необхідність досягнення високої швидкості нагріву (до 1000 град/с), вимірювання деформацій чотирма перетворювачами. Характерною особливістю ІВС 1958У-10-1 є те, що вона є системою керування швидкістю силового навантаження зразка і його температурою. Опис каналів ІВС 1958У-10-1, а саме їх тип, функції роботи, фізична величина, що вимірюється, і їх кількість наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Опис каналів вимірювально-керуючої системи 1958У-10-1

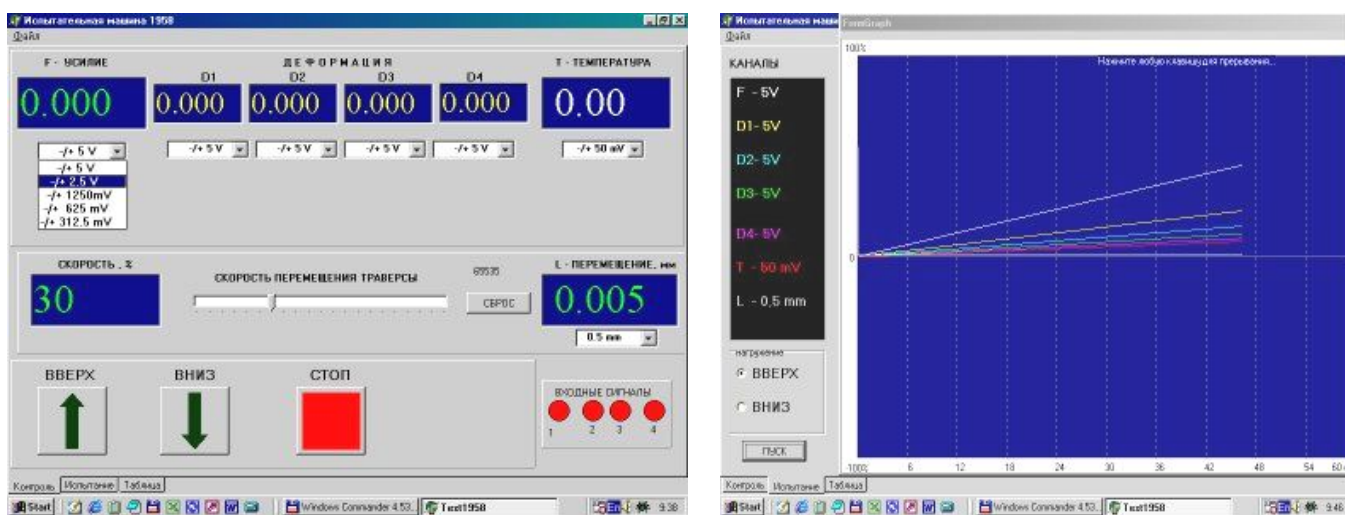
Тип каналу	Функція	Фізична величина	Кількість
Аналоговий вхідний	Вимірювання	Зусилля	1
Аналоговий вхідний	Вимірювання	Деформація	4
Аналоговий вхідний	Вимірювання	Температура	1
Цифровий вхідний	Вимірювання	Переміщення траверси	1
Цифровий вхідний	Контроль	Граничне положення	1
Аналоговий вихідний	Управління	Швидкість траверси	1
Аналоговий вихідний	Управління	Температура	1
Цифровий вихідний	Управління	Вгору, Вниз, Стоп	3

Основним блоком ІВС 1958У-10-1 є багатфункціональна плата А-812 РG, яка виконує вимірювання, аналого-цифрове і цифрово-аналогове перетворення сигналів та їх ввід/вивід до персонального комп'ютера. Іншою важливою характеристикою ІВС 1958У-10-1 є реалізація повної гальванічної розв'язки плати А-812 РG по всім вхідним та вихідним каналам та персонального комп'ютера від випробувальної машини. Таке рішення дозволяє уникнути виходу з ладу плати А-812 РG і персонального комп'ютера у разі появи на машині високої електричної напруги, значно підвищити завадостійкість системи і точність вимірювань.

Структурна схема ІВС 1958У-10-1 показана на рис. 3.7 б. До її складу входять датчик зусилля ДЗ 1798 ДСТУ 2, тензорезисторні датчики деформації

ДД1...ДД4, термоелектричний перетворювач температури Т1 типу ВР, модулі нормалізації аналогових сигналів з гальванічною розв'язкою SCM5B38-35, SCM5B38-36, SCM5B30-02, SCM5B49-04, модулі передачі цифрових сигналів з гальванічною розв'язкою SCMD-MIDC5 (ввід), SCMD-MODC5 (вивід).

В результаті обстеження технічного стану системи вимірювання і керування випробувальної машини 1958У-10-1 виявлено, що основний блок, а саме багатофункціональна плата А-812РГ морально застаріла, функціонує з частими відмовами, розташована на шині ІSА старого комп'ютера, який у будь-який час може остаточно вийти з ладу. Програмне забезпечення (програма Test1958) може працювати тільки у операційному середовищі не вище Windows 98 і не може бути модернізованим в разі використання плати А-812РГ. Графічний інтерфейс програми Test1958 представлено на рис.3.8.



а)

б)

Рис. 3.8 – Графічний інтерфейс програми Test1958: сторінка «Контроль» (а), сторінка «Випробування» (б)

В зв'язку з вищевикладеним для надійної роботи випробувальної машини 1958У-10-1 в автоматичному режимі з використанням комп'ютера необхідно переробити систему вимірювання і керування на базі сучасного багатофункціонального модулю, наприклад NI USB 6218, установити сучасну

операційну систему (Windows 7/10) і відповідно переробити існуюче програмне забезпечення.

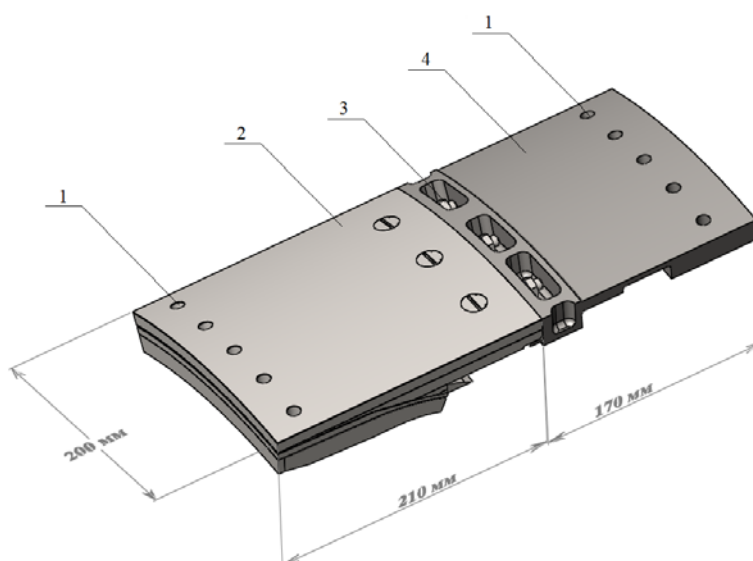
Програма повинна забезпечувати з ІВС 1958У-10-1 1 при проведенні комплексних випробувань ВВКМ на машині 1958У-10-1 з використанням вимірювально-керуючої системи 1958У-10-1. Програма повинна реалізувати вимірювання зусилля, деформацій по чотирьом каналам, переміщення траверси машини, температуру зразка за допомогою термоелектричного перетворювача або пірометра з високою точністю за рахунок заглушення перешкод від дії змінної напруги частотою 50 Гц. Програмне забезпечення, що буде розроблено крім збору, візуалізації і збереження експериментальних даних повинно забезпечити механічне навантаження та нагрів зразка по наперед заданій програмі.

3.2 Оцінки міцності елементів конструкцій РКТ

Значна частина досліджень, що заплановані до виконання Програмою спільної науково-дослідної діяльності ДП «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля і наукових установ НАН України на 2018 – 2022 рр., стосуються оцінки міцності відповідальних елементів конструкцій РКТ із перспективних КМ, а саме фрагментів стиків РДТП, модельних оболонок, визначення залишкових ФМХ ПКМ корпусу РДТП після впливу експлуатаційних факторів.

3.2.1 Оцінка міцності стиків під час статичних і циклічних навантажень та нагрівання

Креслення фрагмента стику РДТП із композиційних матеріалів представлено на рис.3.9 , а схема встановлення датчиків переміщень і деформацій при статичних випробуваннях стиків корпусу МД зображено на рис.3.10.



- 1 – отвори для кріплення в технологічному обладнанні;
 2 – фрагмент шпангоута корпусу МД;
 3 – штатне кріплення корпусу МД и ХО;
 4 – фрагмент шпангоута корпусу ХО 1

Рис.3.9 – Креслення фрагмента стику РДТП із композиційних матеріалів.

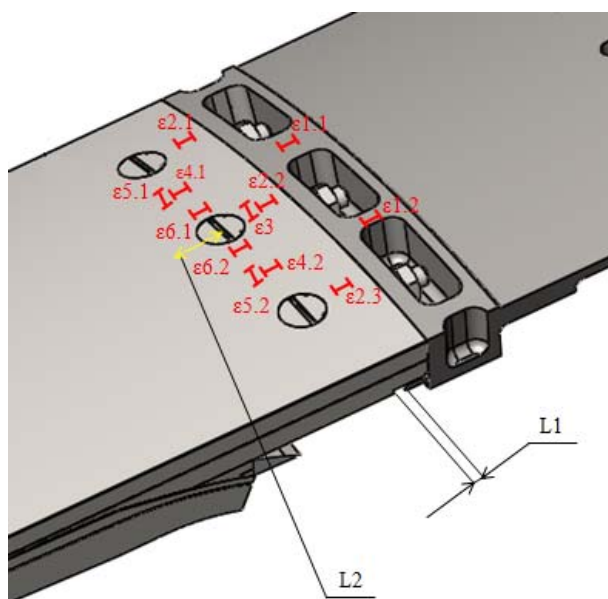


Рис 3.10 – Схема встановлення датчиків переміщень і деформацій при статичних випробуваннях стиків корпусу МД.

Технічні вимоги до випробувань стиків наступні:

- Механічне навантаження - розтяг

- Тип навантаження – статичне і циклічне
- Температура випробувань – кімнатна і 50°C
- Матеріал стиків – вуглепластик

Для забезпечення таких випробувань необхідне налаштування потужної випробувальної машини, розробка і виготовлення габаритної термічної камери, випробувальної оснастки, наявність та розміщення на зразках перетворювачів деформацій і переміщень.

3.2.2 Оцінка міцності модельних оболонок під час нагрівання і комплексного статичного навантаження

Розміри реального корпусу РДТП складають: діаметр – 900 мм, довжина - 2000 мм, товщина силової оболонки – 7 мм. Модельні оболонки повинні відтворювати конструкцію корпусу РДТП. Тому діаметр модельної оболонки складає 305 мм, а довжина - 600 мм.

Метою випробування модельної оболонки є перевірка фактичних характеристик матеріалу в конструкції, до яких відносяться не тільки пружні характеристики, а й міцність та стійкість.

Навантаження модельної оболонки повинно відповідати послідовності навантаження корпусу реального РДТП:

- Внутрішнє навантаження тиском
P=130 атм. при температурі 50°C.
- Стиск та згин при температурі
300°C.

Намотування модельної оболонки повинно відповідати шаровій структурі маршового РДТП.

- Спіральний шар має бути двійним завтовшки 0,3 мм;
- Кільцевий шар виконується завтовшки 0,15 мм;
- Шари модельної оболонки виконуються із вуглецевого джгута.

Креслення модельної оболонки представлено на рис.3.11.

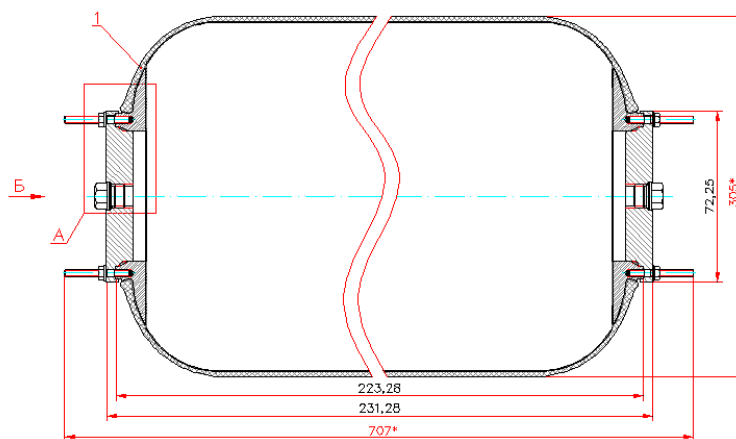


Рис. 3.11 – Креслення модельної оболонки

Для забезпечення оцінки міцності модельних оболонок необхідне доопрацювання і можливо розробка спеціального випробувального обладнання для навантаження оболонок внутрішнім тиском до 130 атм., стиском і згином, розробка і виготовлення засобів нагрівання оболонок до температури 300°C і встановлення на них низки перетворювачів деформацій і переміщень.

3.2.3 Оцінка залишкових ФМХ ПКМ корпусу РДТП після впливу експлуатаційних факторів

Важливе значення має визначення залишкових ФМХ ПКМ корпусу РДТП перед його робочим використанням після дії необхідних технологічних навантажень (впливів) та навантажень внаслідок транспортування РДТП до місця його безпосередньо використання, а саме:

- Перевірка корпусу РДТП тиском (опресування)
- Нагрівання до 75..80°C та заповнення корпусу паливом
- Статичний та циклічний згин РДТП в процесі транспортування

Для оцінки залишкових ФМХ ПКМ корпусу РДТП після впливу експлуатаційних факторів можливе випробування модельних оболонок з використанням відповідного випробувального обладнання.

3.3 Багатоканальні ІВС та програмне забезпечення для оцінки міцності елементів конструкцій РКТ

Для проведення випробувань моделей і елементів конструкцій з композиційних матеріалів і отримання необхідних експериментальних даних необхідна наявність у складі стандартних або спеціально розроблених випробувальних установок або стендів багатоканальних інформаційно-вимірювальних систем (ІВС). Такі системи повинні забезпечити множинне вимірювання вхідних величин зусилля, деформацій, температури, тиску тощо. Для випробувань елементів і моделей конструкцій необхідно мати багатоканальні ІВС (декілька десятків каналів), у разі випробувань звичайних зразків із КМ кількість каналів у складі таких ІВС може бути менша. У випадку спеціалізованих випробувальних машин орієнтованих на виконання конкретного виду випробувань конкретного класу КМ бажане керування процесами механічного навантаження і нагрівання зразків.

Наявні ІВС повинні включати відповідне програмне забезпечення для збору експериментальних даних, візуального представлення їх в процесі проведення випробування в режимі реального часу, накопичення і зберігання для послідовного аналізу. На даний час в Інституті проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України є декілька багатоканальних ІВС.

Багатоканальна ІВС PMX-TEST [13] створена для забезпечення проведення випробувань на міцність елементів і моделей конструкцій з полімерних композиційних матеріалів на випробувальних установках і стендах при різних видах силового навантаження в діапазоні робочих температур.

Зовнішній вигляд малогабаритної інформаційно-вимірювальної системи PMX-TEST призначеною для використання при проведенні випробувань на міцність елементів і моделей конструкцій з композиційних матеріалів представлений на рис.3.12. Блок-схема інформаційно-вимірювальної системи

PMX-TEST наведена на рис.3.13. Вона включає систему виміру деформацій (12 каналів), величин навантаження (тиск, зусилля – 4 канали), а також систему виміру температури МИКРА-5 (5 каналів).



Рис. 3.12 – Зовнішній вигляд ІВС PMX-TEST

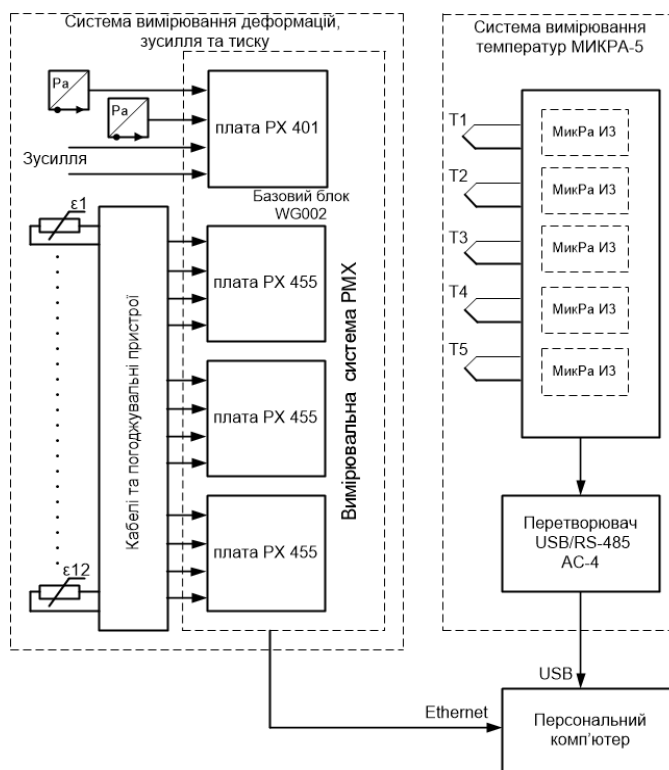


Рис.3.13 – Блок-схема ІВС PMX-TEST

Для проведення випробувань на міцність матеріалів та елементів конструкцій в умовах термомеханічного навантаження на газодинамічному високотемпературному стенді та інших випробувальних установках Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України повинна використовуватись універсальна інформаційно-вимірювальна система ГДС-16 [14]. Вона реалізує багатоканальне вимірювання деформацій, температур та тиску при підключенні до неї відповідних тензометричних, термоелектричних перетворювачів та датчиків тиску. До системи можуть бути підключені і інші перетворювачі, наприклад резисторні, індуктивні перетворювачі, джерела постійної напруги або струму.

Розроблена ІВС ГДС-16 містить вимірювальну станцію з підсилювачами МХ840 та іншими елементами, яка розміщена в малогабаритному приладовому корпусі (рис.3,14 а) і блок виносних тензорезисторних мостів (рис. 3.14,б), що доповнює поодинокі тензорезистори, які розміщуються на об'єкті випробувань до повних мостів і підключається до вимірювальної станції за допомогою багатоканального вимірювального кабелю в металорукаві. Структурна схема ІВС ГДС-16 наведена на рис.3.15.



а)



б)

Рис. 3.14 – Зовнішній вигляд універсальної інформаційно-вимірювальної системи ГДС-16 (а) і блоку виносних тензорезисторних мостів (б)

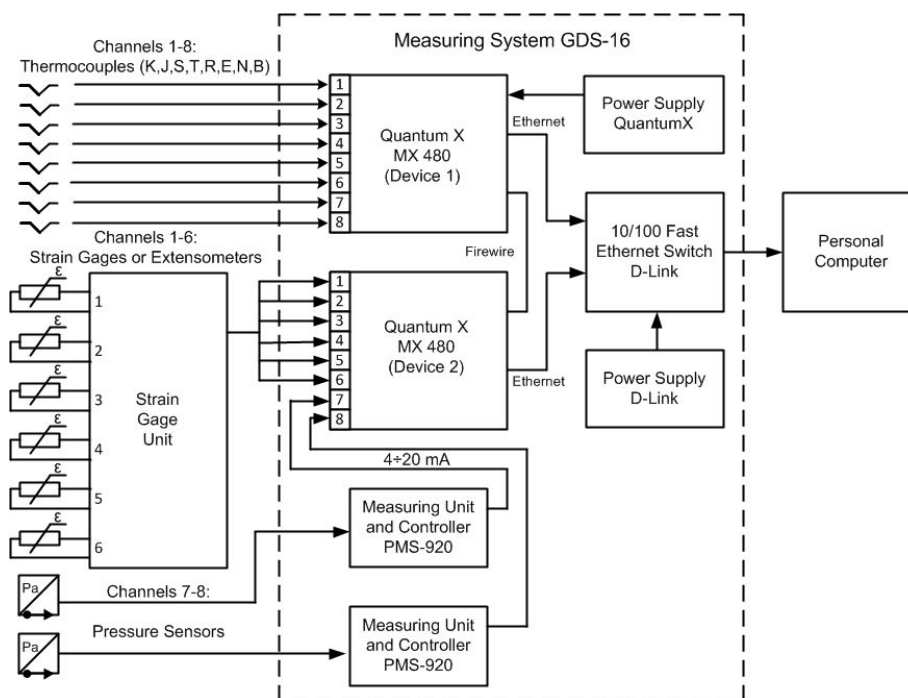


Рис. 3.15 – Структурна схема ІВС ГДС-16.

Для роботи вищезгаданих ІВС, а саме для виконання багатоканального вимірювання, візуального представлення експериментальних даних в режимі реального часу, накопичення і їх збереження для подальшої обробки, а також розрахунку характеристик міцності в умовах різних видів механічного та термічного навантаження необхідно використовувати комплекс програмного забезпечення, який включає низку програм. До складу комплексу програм для збору експериментальних даних при випробуваннях на міцність композиційних матеріалів, елементів і моделей конструкцій, а також розрахунку ФМХ входять: PMX-TEST-Monitor, FpTiraTest, Test1958 та ін.

Програма PMX-TEST-Monitor [13] забезпечує вимірювання з високою точністю необхідних фізичних величин, візуалізацію у реальному часі та збереження експериментальних даних при випробуваннях композиційних матеріалів і елементів на міцність із застосуванням багатоканальної ІВС PMX-TEST. Основними вимогами при створенні цієї програми були зручне і інтуїтивне користування її основними елементами, забезпечення візуалізації

даних в режимі реального часу як в цифровому так і в графічному виді, накопичення і збереження експериментальних даних на персональному комп'ютері. Графічний інтерфейс програми PMX-TEST-Monitor приведений на рис. 3.16.

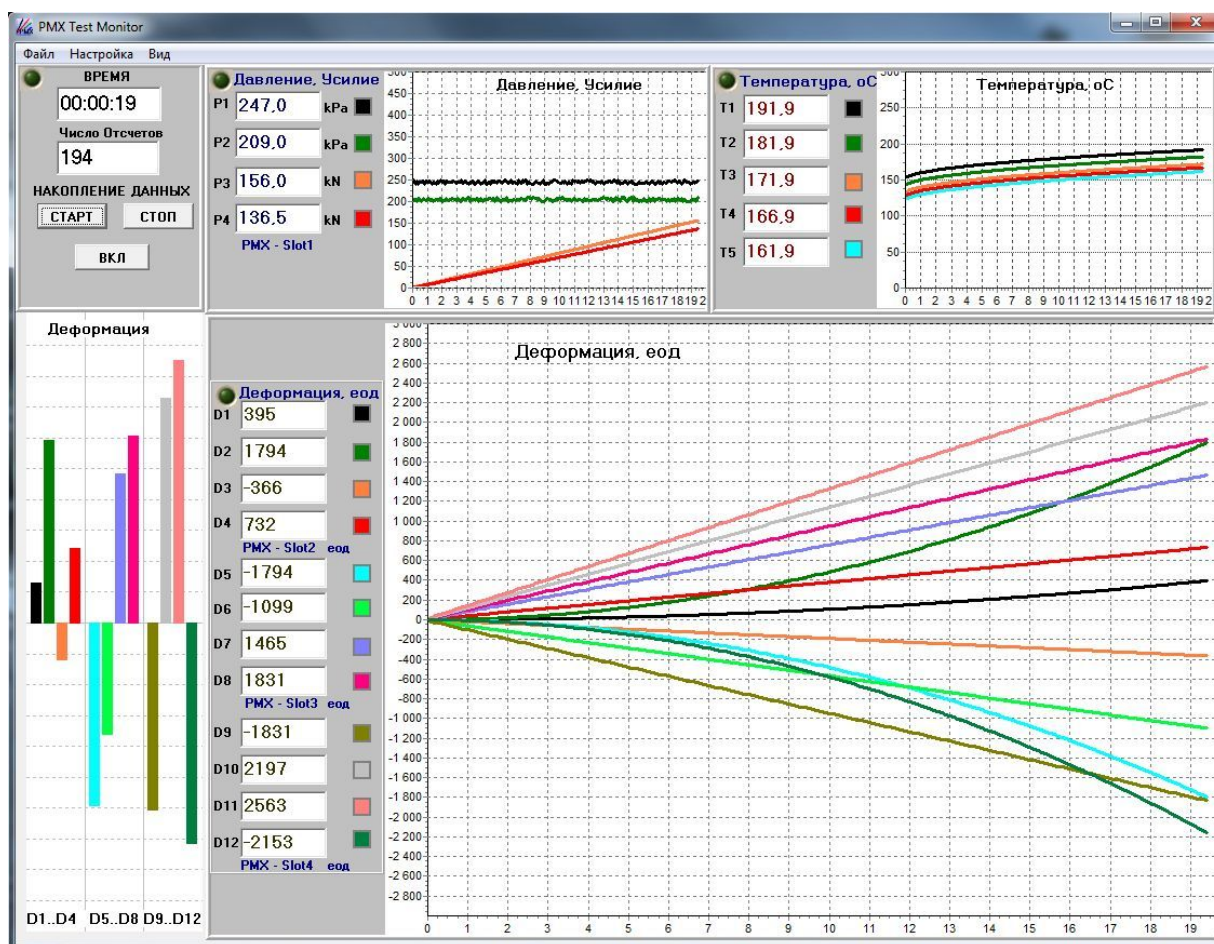


Рис.3.16 – Графічний інтерфейс програми PMX-TEST-Monitor (режим імітації).

Найважливішою проблемою при проведенні складних експериментальних досліджень коли необхідне спільне (паралельне) використання декількох ІВС є необхідність синхронізації їх роботи. Це обумовлено тим, що кожна ІВС працює у своїй програмі і об'єднання зареєстрованих даних у єдиний файл стає практично неможливим. Для вирішення цієї проблеми необхідне доопрацювання програмного забезпечення в тому числі програм для роботи кожної ІВС, генерування синхронізуючих відліків тощо.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз комплексних випробувань і визначено основні ФМХ перспективних ПКМ в робочому діапазоні температур від кімнатної до 315 °С, які необхідні для проведення проектно-конструкторських розрахунків відповідних конструкцій РКТ, що створюються на ДП «КБ «Південне».

2. Внаслідок високих значень питомого зусилля розтягу ОПКМ уздовж волокон, для коректного визначення міцності таких матеріалів необхідне доопрацювання випробувальної оснастки, технології кріплення зразка в захватах машини і методики випробувань.

3. Визначено необхідність розробки специфічних методів і засобів випробувань, зокрема підвищення чутливості вимірювальної апаратури, автоматичного розвантаження зразків ПКМ в процесі його нагрівання тощо, внаслідок широкого діапазону зміни значень міцності в залежності від напрямку волокон та/або температури випробувань.

4. Встановлено необхідність подальшого обґрунтування, доопрацювання і оформлення в якості стандарту підприємства методики визначення деформації зразків ПКМ при їх механічному навантаженні, особливо при стиску, на основі непрямих вимірювань по переміщенню траверси випробувальної машини.

5. В результаті аналізу доступної інформації встановлено, що для ПКМ існує основне методологічне забезпечення для проведення механічних випробувань і визначення їх ФМХ, яке регламентується низкою діючих стандартів ASTM, ISO, ГОСТ. В протилежність цьому, на даний час практично відсутні діючі стандарти для випробувань ВВКМ і МФП і тому для даних класів матеріалів необхідна розробка стандартів випробувань і визначення ФМХ як при нормальній (кімнатній) так і високих до 3000°C і до 1350 °C температурах відповідно.

- Проведення механічних випробувань в робочому діапазоні температур ПКМ і ВВКМ на даний час в основному забезпечено наявним випробувальним обладнанням. Водночас для МФП відсутнє випробувальне обладнання, що

реалізує однобічне нагрівання і одночасне механічне стискання зразків.

- В результаті обстеження технічного стану системи вимірювання і керування випробувальної машини 1958У-10-1 для випробувань ВВКМ виявлено, що дана система і відповідне програмне забезпечення морально застарілі, функціонують з частими відмовами і тому потребують термінового доопрацювання.

- Визначено, що для забезпечення випробувань стиків із ПКМ необхідне налаштування потужної випробувальної машини, розробка і виготовлення габаритної термічної камери, випробувальної оснастки, наявність та розміщення на зразках перетворювачів деформацій і переміщень.

- Визначено, що для забезпечення оцінки міцності модельних оболонок з ПКМ і залишкових ФМХ корпусу РДТП необхідне доопрацювання і можливо розробка спеціального випробувального обладнання для навантаження оболонок внутрішнім тиском до 130 атм., стиском і згином, розробка і виготовлення засобів нагрівання оболонок до температури 300°C і встановлення на них низки перетворювачів деформацій і переміщень.

- Визначено, що для спільного (паралельного) використання декількох ІВС при випробуваннях моделей і елементів конструкцій з ПКМ необхідне забезпечення синхронізації їх роботи, включаючи доопрацювання програмного забезпечення в тому числі програм для роботи кожної ІВС, генерування синхронізуючих відліків та інших технічних засобів.

- Сформульовано ряд вимог щодо необхідного удосконалення програми для розрахунку ФМХ КМ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 TAIRYFIL DATA SHEET. Режим доступа: URL:
http://www.fpc.com.tw/fpcwuploads/pdocument/pdocument_150128165215.pdf- Переглянуто: 20.11.2018.
- 2 TOHO TENAX . Delivery programme and characteristics for Tenax® IMS65 filament yarn <http://www.havel-composites.com/proddocs/IMS65%20E23%20en%202010-01.pdf>- Переглянуто: 20.11.2018.
- 3 ГОСТ 28006-88. Лента углеродная конструкционная. Технические условия. -1989, - 14 с.
- 4 Дроздов О.В. Апаратно-програмний комплекс для визначення параметрів міцності композиційних матеріалів і елементів конструкцій ракетно-космічної техніки // Наука та інновації. – 2017. Т.13. - №5. - С.53-64.
- 5 Дроздов А.В., Харченко В.В., Потапов А.М. и др. Программа расчета характеристик прочности и упругости композиционных углепластиковых материалов// Проблемы прочности. – 2016. - №6.-С.36-46.
- 6 ASTM D 3039/D 3039M-00 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. – 13 p.
- 7 ASTM D 695-02a Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. – 7 p.
- 8 ASTM D 7264/D 7264M-15 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. – 10 p.
- 9 ГОСТ 25.601-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – 1981.
- 10 ГОСТ 25.602-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – 1981.
- 11 ГОСТ 25.604-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – 1982.
- 12 Weibull W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability// J.Appl.Mech.-1951.- 18.-P.293-297.
- 13 Дроздов А.В., Харченко В.В., Дзюба В.С. и др. Многофункциональная информационно-измерительная система для оснащения стендов и установок при проведении прочностных испытаний моделей и элементов конструкций из композиционных материалов // Проблемы прочности. – 2016. - №5. – С.52-60.
- 14 Дроздов А.В., Кравчук Л.В. Универсальная информационно-измерительная система ГДС-16 для проведения прочностных и термомеханических испытаний материалов и элементов конструкций // Проблемы прочности. – 2016. - №6. –С.152-162.
- 15 Дзюба В.С., Потапов А.М. Гусарова И.А. и др. Прочность углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) при высоких температурах (до 3300К). // Технологические системы. – 2018. - №3. – С.49-55.