


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

БОНДАР НАЗАРІЙ ВІКТОРОВИЧ



УДК 539.4

**МІЦНІСТЬ АВІАЦІЙНИХ ОБОЛОНОК ІЗ КОМПЗИТИВ
З УРАХУВАННЯМ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО ПОШКОДЖЕННЯ**

05.07.02 – Проектування, виробництво та випробування
літальних апаратів

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Астанін Вячеслав Валентинович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедрою механіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кучер Микола Кирилович,
Інститут проблем міцності
ім. Г. С. Писаренко НАН України,
завідувач відділу механіки конструкційних
матеріалів

доктор технічних наук, доцент
Кондратьєв Андрій Валерійович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»,
завідувач кафедрою конструкції і
проекування ракетної техніки

Захист відбудеться 5 грудня 2019 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 Національного авіаційного університету за адресою: Україна, 03058 Київ, пр. Космонавта Комарова, 1, аудиторія 11.220.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: Україна, 03058 Київ, пр. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розіслано 28 жовтня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., с.н.с.



О. Ю. Корчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Висока статична міцність та низька питома вага композитів, зокрема сучасних текстильно-зміцнених скло-та вуглепластиків, сприяють їх широкому застосуванню у машинобудуванні та, перш за все, у авіаційній та космічній техніці.

В умовах жорсткої експлуатації, в яких працює ця техніка, вона зазнає дії, крім аеродинамічного навантаження, великої кількості різних факторів навколишнього середовища та експлуатаційних, але більш за все – механічних пошкоджень, що впливають негативно на конструкційну міцність літальних апаратів.

Так у літаку, наприклад, можуть виникати невеликі скупчення технічних рідин, таких як гідравлічна рідина чи паливо на композиційних елементах конструкції. Панелі обшивки крила, фюзеляжу та оперення мають постійний контакт із зовнішнім середовищем, в якому присутня волога та дощова вода із різними солями. Накопичення рідини мають значний вплив на механічні характеристики пластиків і знижують границю міцності та модуль пружності після певного часу впливу. Викликаний ефект може мати незворотний характер та створити пошкоджену зону у деталі, яка знизить її навантажувальну здатність, а також призвести, в крайніх випадках, до руйнування.

Враховуючи вище перелічене, можна зробити висновок, що детальне вивчення впливу робочого середовища та експлуатаційних пошкоджень літальних апаратів на їх характеристики міцності є актуальною науко-технічною задачею і потребує постійного експериментально-теоретичного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно зі планом наукових досліджень кафедри механіки в Національному авіаційному університеті і відповідає одному з головних напрямків її діяльності «Міцність шаруватих композиційних матеріалів та конструкцій при статичних та динамічних навантаженнях». Робота виконана в рамках фундаментальних та прикладних держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України «Граничний стан пластинкових та оболонкових конструктивних елементів авіаційної техніки з композиційних матеріалів при статичному і ударному навантаженні» (№ 123 - ДБ 17, 2016 – 2019рр.), в якій здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета дослідження – отримання нових даних і встановлення закономірностей деформування та руйнування композиційних оболонок під внутрішнім тиском та розробка способу врахування впливу робочого середовища та пошкодження на їх міцність.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати сучасні способи та методики дослідження на міцність композиційних оболонок різної форми та складу.
2. Розробити технологію та виготовити композитні зразки для дослідження їх на міцність при різних навантаженнях.
3. Визначити типові характеристики міцності досліджуваних композитів з урахуванням робочого середовища.
4. Встановити закономірності деформування та руйнування досліджуваних композиційних оболонок з урахуванням робочого середовища, температури та експлуатаційного пошкодження.

Об'єкт дослідження – деформування та руйнування оболонки із композиційних матеріалів під внутрішнім тиском з урахуванням навколишнього середовища.

Предмет дослідження – закономірності та особливості деформування та руйнування композиційної оболонки під внутрішнім тиском з урахуванням робочого середовища та експлуатаційного пошкодження.

Методи дослідження. Для виготовлення дослідних зразків в роботі використовувались термовакuumний та автоклавний методи формовки. Випробування плоских зразків проводились згідно стандартів ISO 527-4, ISO 14129, ISO 14126 та ISO 13586. Випробування оболонок зразків проводилось внутрішнім тиском на установці ЦДМУ-30. В роботі використовується метод скінченних елементів для моделювання напружено-деформованого та граничного стану композиційних оболонок та методи тривимірного моделювання для створення моделей оболонок. Методи реалізовані в програмах ANSYS та SolidWorks відповідно. Дослідження повзучості та релаксації проводились експериментально та за допомогою реологічних моделей з використанням програми Simulink у складі програмного пакету Matlab.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено спосіб визначення величини деградації механічних характеристик оболоноквих конструкцій з композитів із пошкодженням при впливі робочого середовища, який розкриває феноменологічну природу явища деградації та дозволяє розширити коло факторів, що мають суттєвий вплив на міцність таких конструкцій.
2. Встановлено закономірності деформування та руйнування композиційних оболонок з лейнером під внутрішнім тиском з урахуванням робочого середовища та пошкодження, які показують суттєву деградацію характеристик міцності таких конструкцій в розглянутому діапазоні, що необхідно враховувати при проектуванні.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що встановлені закономірності впливу робочого середовища на характеристики міцності оболонкових полімерних конструкцій з пошкодження дозволяють точніше розраховувати ресурс композиційних конструкцій, зменшити вірогідність відмови та підвищити безпеку польоту. Отримані теоретичні та експериментальні дані складають основу для розробки подальших механічних та фізичних моделей та критеріїв міцності.

Результати виконаних досліджень використовуються на підприємствах України, що підтверджується актами впровадження ДП «Антонов» (м. Київ) і ТОВ «Прогрестех-Україна».

Достовірність отриманих результатів забезпечена співставленням результатів розрахунку з експериментальними даними, отриманими автором з власного натурального експерименту, і результатами інших дослідників, що відображені у відкритих публікаціях. Виготовлення зразків проводилось за спеціально розробленою технологією, що узгоджується з сучасними методами виробництва композиційних конструкцій. Випробування проводились згідно серії відповідних стандартів ISO. Вимірювання в ході експерименту проводилось на сучасному обладнанні, що пройшло метрологічну перевірку. При розробці способу розрахунку застосовувались загальноприйняті теорії та припущення опору матеріалів, методу скінченних елементів та фізики.

Особистий вклад здобувача. Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням. Всі наукові положення та основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно під керівництвом доктора технічних наук, професора В. В. Астаніна і відображені в публікаційних роботах.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідались на науково-технічних конференціях: Восьмий всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» - «Безпека в авіації та космічні технології» (м. Київ, 2018), 7-ма міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2018), Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування» (Вінниця, 2015).

Публікації. Результати досліджень, що представлені в дисертації, опубліковані в 10-и наукових роботах, серед яких: 5 статей в наукових фахових виданнях (2 – в Scopus), 4 матеріали конференції, 2 патенти на корисну модель. Основні результати приведені в [1-11].

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Загальний об'єм дисертації складає 154 ст., в тому числі 68 рисунків, 17 таблиць, список використаних джерел із 212 найменувань і 1 додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика дисертації, її основні положення, обґрунтовується актуальність обраної теми, наукова новизна та практична цінність, сформульовані мета та задачі дослідження. Вказано зв'язок роботи з науковими темами, наведено відомості про апробацію результатів роботи.

Перший розділ присвячений огляду літератури про дослідження композиційних оболонкових конструкцій та їх використання в авіаційній техніці. Коротко показано використання та впровадження композиційних матеріалів у машинобудуванні та авіації, дана коротка характеристика типам композиційних матеріалів. Детально розглянуто використання оболонкових конструкцій у авіаційній та ракетно-космічній техніці. Окрема увага приділена оболонковим конструкціям під внутрішнім тиском, таким як балон та фюзеляж. Наведено загально використовувані та типові композиційні матеріали в авіації (рис. 1).

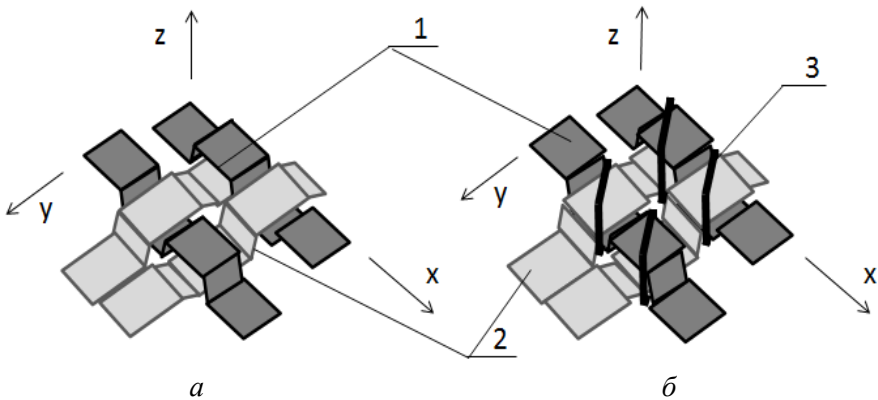


Рис. 1. Принципова схема типових композитів в авіаційних конструкціях: *а* – епоксидні скло- та вуглепластик; *б* – термопластичний склопластик (TwinTEX); 1 – волокна основи; 2 – волокна утка; 3 – прошивка скловолном

Проаналізовано тенденції впровадження композиційних матеріалів у авіації за 50 років, виявлено закономірності та дано прогноз

використання конкретних матеріалів (епоксидні склопластик, вуглепластик та термопластичний склопластик) у авіаційних оболонкових конструкціях.

Розглянуті дослідження оболонкових конструкцій як частин систем літака: випробування систем літака, паспортизація матеріалів, відповідність вимогам АП-25. Проведено короткий аналіз досліджень оболонкових конструкцій загалом. Проведено детальний аналіз досліджень металевих та композиційних оболонок під внутрішнім тиском при впливі робочого середовища. Показано, що металеві та композиційні оболонки під внутрішнім тиском з урахуванням багатьох факторів є добре дослідженими. Відомо багато робіт по втраті стійкості оболонок при різних видах навантаження (пульсації, часткове заповнення, інерційні навантаження). Також розглядаються роботи при комбінаціях внутрішнього тиску та зовнішніх навантажень. Менше робіт відомо з питань руйнування металевих та композиційних конструкцій. Особливо це прослідковується при дослідженнях руйнування металевих та композиційних оболонок при впливі різних факторів зовнішнього середовища (рідини, волога, водень, температура та ін.). Одним із найбільших напрямків даного типу дослідження є дослідження руйнування та ресурсу оболонок (наприклад трубопроводів) при різних видах корозійних пошкоджень.

Проведений огляд літератури свідчить про те що, вплив робочого середовища на деформування та руйнування оболонкових шаруватих композиційних конструкцій є багатофакторним та важливим питанням, яке потребує дослідження. З вказаного сформульовано задачі дослідження, котрі вирішуються у наступних розділах.

У другому розділі розглянуто підготовку процесу дослідження. Показано, що для виконання поставлених завдань та забезпечення процесу дослідження необхідно мати ряд базових механічних характеристик досліджуваних матеріалів, котрі слугують опорними для подальших досліджень, експериментів та розрахунків. Для знаходження вказаних механічних характеристик обрано ряд методик, які уможливають виконання наступних кроків дослідження: виготовлення зразків, випробування зразків та обробка експериментальних даних. Для проведення дослідження виконано виготовлення шаруватих полімерних композитних зразків високої якості термовакuumним та автоклавним методом формування (рис. 2). Із готових композиційних пластин та оболонок вирізано зразки за різними технологіями. Ряд зразків передбачає виготовлення та приклеювання накладок, що було проведено.

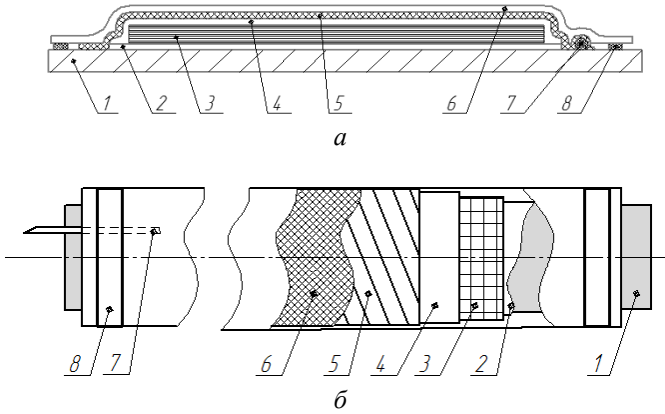


Рис. 2. Технологічна схема виготовлення плоского (а) та оболонкового (б) зразків:

1 – форма; 2,4 – розділювальна плівка; 3 – препрег; 5 – дренажний шар;
6 – вакуумна плівка; 7 – вакуумна трубка; 8 – герметик

Для визначення комплексу механічних характеристик композитів, котрі в подальшому використовуються при розрахунках, було проаналізовано наступні групи міжнародних стандартів: ASTM, ISO, ГОСТ. На основі доступності та сучасності було обрано групу стандартів ISO. Описаними вище способами було випробувано ряд зразків та визначено механічні характеристики для епоксидних склопластику та вуглепластику, що наведені в таблиці 1. Дані механічних характеристик матеріалу Twintex, отримані від Дрезденського технічного університету, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Механічні характеристики досліджуваних матеріалів

Характеристика	Стандарт	Одиниці	Склопластик	Вуглепластик	Twintex
Модуль пружності в напрямі волокон основи E_1	ISO 527-4	ГПа	23,2	61	23
Модуль пружності в напрямі волокон утка E_2		ГПа	23,5	61	23.5
Коефіцієнт Пуасона в площині листа ν_{12}		-	0.174	0,05	0,13
Модуль зсуву в площині листа G_{12}	ISO 14129	ГПа	6.87	4,37	1,99

Характеристика	Стандарт	Одиниці	Склопластик	Вуглепластик	Twintex
Границя міцності на розтяг в напрямі волокон утка σ_{B2}^+	ISO 527-4	МПа	397	609	484
Границя міцності на стиск в напрямі волокон основи σ_{B1}^-	ISO 14126	МПа	172	439	208
Границя міцності на зсув в площині листа τ_{B12}	ISO 14129	МПа	58	88	92
Критичний КІН в напрямі волокон основи K_{1c1}	ISO 13586	МПа мм ^{1/2}	617	1137	829
Критичний КІН в напрямі волокон утка K_{1c2}		МПа мм ^{1/2}	987	1076	746
Швидкість вивільнення енергії в напрямі волокон основи J_{1c1}		кДж/ м ²	21,6	46,6	54,7

Показано, що отримані дані узгоджуються із літературними, що підтверджує результати. Таким чином отримано опорні дані для подальших досліджень та розрахунків.

В розділі 3 наведено дослідження впливу робочого середовища на базові механічні характеристики композиційних матеріалів. Встановлено, що найбільший вплив мають мастило, паливо (досліджено на прикладі гідравлічної рідини АМГ10) та дощова вода із солями (досліджено на прикладі морської води із 3,5% солі згідно з ISO 15314).

Визначено кількість рідини, яку абсорбують типові пластики (склопластик, вуглепластик, епоксидний і термопластичний) протягом значного проміжку часу. Було взято по 100 г епоксидного склопластику, епоксидного вуглепластику та поліпропіленового склопластику, які були занурені у АМГ10 та морську воду на 910 год. Кожні 85 год проводились зважування і було визначено приріст маси, що відповідає кількості адсорбованої рідини. Використовувались цифрові ваги із діапазоном вимірювання 0 – 2000 г та точністю вимірювань 0,1г. Результати представлені на рис. 3. Середньоквадратичне відхилення експериментальних даних від теоретичних складає 0,03 – 0,04. Результати (рис. 3) представлені на одиницю площі адсорбції та відносно початкової маси зразка можна описати формулою:

$$M_S = \frac{m}{m_0 S} = \frac{m_H}{m_0 S} (1 - e^{-kt}), \quad (1)$$

де M_S – відносний приріст маси на одиницю площі у m^{-2} , m – поточна маса, m_n – максимальна маса при досягненні стану насичення матеріалу рідиною, m_0 – початкова маса, k – коефіцієнт швидкості адсорбції, що визначається за результатами експерименту, t – час, S – площа по якій відбувається адсорбція. Виявлено процес часткової деградації при витримці термопластичного склопластику у морській воді.

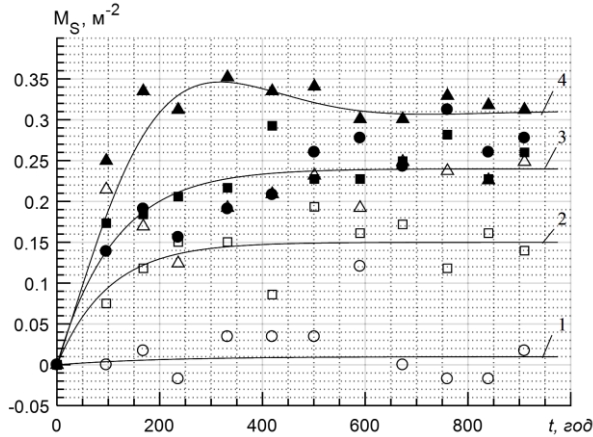


Рис. 3. Експериментальна (точки) та розрахункова (лінії) залежність відносного приросту маси на одиницю площі від часу для досліджуваних матеріалів при витримці у гідралічній рідині АМГ10 (світлі точки) та морській воді (темні точки) для: епоксидних склопластику (○ 1, ● 3) і вуглепластику (□ 2, ■ 3) та матеріалу Twintex (△ 3, ▲ 4)

Проведено огляд літератури за питанням адсорбції різних рідин композитами. З чого виявлено залежності процесу адсорбції від температури. За результатами проведених у цій роботі експериментів, зауважено, що після проникнення рідини у матеріал процес десорбції є проблематичним і сушіння зразків є мало ефективним. Результати огляду підтверджують отримані експериментальні дані. Таким чином встановлено закономірності процесу адсорбції робочих рідин матеріалами, що досліджуються.

Встановлено, що набухання викликає появу внутрішніх напружень π , котрі обчислюються за формулою:

$$\pi = \frac{RT}{V_m} \frac{m}{m_0}, \quad (2)$$

де V_m – парціальний мольний об'єм розчинника. Для виявлення пошкоджень спричинених набуханням було проведено наступний експе-

римент. Зразки для випробувань на розтяг із епоксидного склопластику та матеріалу Twintex були витримані у АМГ10 та морській воді та протягом 120 год. Далі кожен зразок був витриманий протягом 30хв у відповідній температурі у діапазоні 253:373К. Границя міцності та модуль пружності визначались в ході подальших випробувань на розтяг за стандартом ISO 527-4 при кімнатній температурі. Зроблено висновок, що витримка при температурі із рідиною у матеріалі немає жодного ефекту. Тобто набухання і замерзання не призводять до виникнення пошкоджень у матеріалі.

Для встановлення впливу даного тиску на характеристики матеріалу було проведено наступний експеримент. Зразки для випробувань на розтяг із матеріалу Twintex, який є прошитий в напрямку випробувань 0^0 , були витримані у АМГ10 та морській воді протягом 840 год. Зразки були вирізані із листа у напрямках 0^0 , 45^0 , 90^0 . Виймання та випробування зразків на розтяг згідно стандарту ISO 527-4 проводилось після витримки 0, 95, 164, 332, 500, 670, 840 год. Використовуючи отриману інформацію запропоновано вважати, що деградація характеристик відбувається пропорційно до тиску набухання. Використовуючи формули (3) і (4) розраховано теоретичні криві для експериментальних даних, котрі нормовані відносно 0-ої витримки за (3) і (4) та представлені на рис. 4:

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_{B0}} = \frac{\sigma'_B}{\sigma_{B0}} = 1 - \frac{k_\sigma^{-1} \cdot \frac{RT}{V_m} \cdot \frac{m_H(1 - e^{-kt}) \cos(wt)}{m_0}}{\sigma_{B0}}, \quad (3)$$

$$\bar{E} = \frac{E'}{E_0} = 1 - \frac{k_E^{-1} \cdot \frac{RT}{V_m} \cdot \frac{m_H(1 - e^{-kt}) \cos(wt)}{m_0}}{E_0}. \quad (4)$$

де σ_{B0} , σ'_B – початкова та з урахуванням деградації границі міцності, E_0 , E' – початковий та з урахуванням деградації модулі пружності, $\bar{\sigma}_B$, \bar{E} – відносні границя міцності та модуль пружності з урахуванням деградації, k_σ , k_E – відповідні коефіцієнти перерахунку внутрішніх напружень, що визначались експериментально. Розрахункові криві досить добре описують експериментальні дані, що підтверджує коректність описаного підходу. Середньоквадратичне відхилення експериментальних даних від теоретичних складає 0,025 – 0,048. Аналогічно вивчено вплив робочого середовища на критичний КІН. Для цього було взято виготовлені зразки із матеріалу Twintex для випробувань на розтяг. В цих зразках зроблено надпил товщиною 0,5 мм і глиби-

ною 3 мм. Вершина надпилу додатково загострена лезом до глибини 3,5 мм. Зразки були вирізані із листа у напрямках 0° , 45° , 90° .

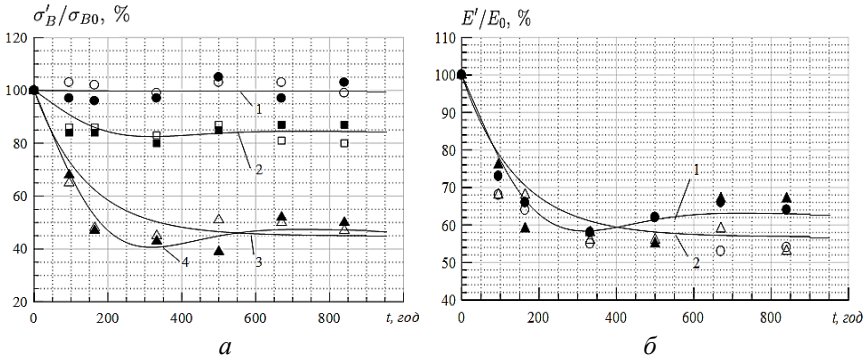


Рис. 4. Експериментальна (точки) та розрахункова (лінії) залежність відносних границі міцності (а) та модуля пружності (б) матеріалу Twintex від часу при попередній витримці у гідралічній рідині АМГ10 (світлі точки) та морській воді (темні точки) для напрямку випробувань: 90° (○●), 45° (□■) і 0° (△▲); а) 1 – 90° , 2 – 45° , 3,4 – 0° ; б) 1 – морська вода, 2 – АМГ10

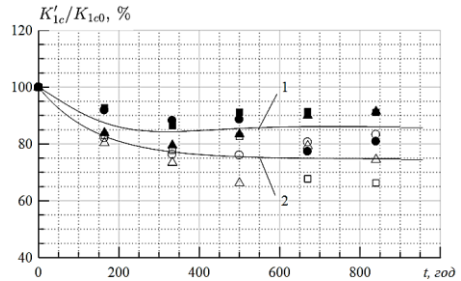
Зразки були витримані у АМГ10 та морській воді протягом 840 год. Виймання та випробування зразків на розтяг згідно стандарту ISO 527-4 проводилось після витримки 0, 95, 164, 332, 500, 670 і 840 год. По аналогії з (3) – (4) запропоновано та використано залежність (5) для опису отриманих експериментальних залежностей:

$$\overline{K}_{1c} = \frac{K'_{1c}}{K_{1c0}} = 1 - \frac{k_K^{-1} \cdot \frac{RT}{V_m} \cdot \frac{m_n(1 - e^{-kt}) \cos(wt)}{m_0}}{K_{1c0}}; \quad (5)$$

де \overline{K}_{1c} – відносний КІН з урахуванням деградації, K'_{1c} – поточний КІН з урахуванням деградації, K_{1c0} – початковий КІН (із таблиці 1), k_K – коефіцієнт перерахунку внутрішніх напружень. Використовуючи залежність (5) було проведено числові розрахунки та знайдено теоретичну криву для отриманих експериментальних даних. Експериментальні дані та результати розрахунку наведені на рис. 5. Таким чином визначено вплив робочого середовища на критичний КІН матеріалу Twintex та отримано залежності (3) – (5) для визначення впливу робочого середовища на характеристики міцності композиційних оболонкових конструкцій. З'ясовано вплив температури на деградацію характеристик матеріалу із рідиною при одночасній дії навантаження та температури. Додатково враховано зміну модуля пружності та границі

міцності від температури без врахування деградації характеристик. Для цього за літературними даними проаналізовано вплив температури на модуль пружності та границю міцності епоксидного склопластику та епоксидного вуглепластику підсилених відповідними тканинами і знайдено відповідні залежності.

Рис. 5. Експериментальна (точки) та розрахункова (лінії) залежність відносного критичного КІН матеріалу Twintex від часу при попередній витримці у гідравлічній рідині АМГ10 (світлі точки) та морській воді (темні точки) для напрямку випробувань: 90° (○ ● 1), 45° (□ ■ 2) і 0° (△ 3, ▲ 4)



Для визначення залежності критичного КІН від температури було проведено випробування на вище зазначених зразках із матеріалу Twintex для випробувань на розтяг (напрямок 90°) з надпиллом за стандартом ISO 527-4 при температурах 273:373К.

Для визначення впливу рідини та температури на композит було взято зразки із матеріалу Twintex та витримано протягом 120 год у АМГ10 та морській воді. Потім на цих зразках проводились випробування на розтяг згідно стандарту ISO 527-4 за температур 273–373К, в яких визначались границі міцності та модулі пружності досліджуваних матеріалів. Використовуючи температурні залежності характеристик матеріалу та залежності (3)–(5) було розраховано теоретичні криві для отриманих експериментальних даних. Встановлено, що ключовим фактором при розрахунку механічних характеристик матеріалу із рідиною є внутрішні напруження, котрі викликають деградацію характеристик матеріалу та чинять вплив на зміну механічних характеристик матеріалу при впливі температури.

Панелі обшивки крила та фюзеляжу, окрім дії факторів навколишнього середовища, знаходяться під статичними та циклічними навантаженнями. Згідно аналізу літературних даних у досліджуваному часовому діапазоні, що відповідає тривалості зльоту-посадки, може виникати повзучість композиційних панелей конструкції. На відміну від металів, у композитах повзучість може спостерігатись уже при кімнатній температурі та статичних навантаженнях. Тому досліджено повзучість та релаксацію термопластичного текстильно-армованого композиту із скляним наповнювачем під квазістатичним навантаженням при кімнатній температурі. Зразки із матеріалу Twintex піддава-

лись циклічному синусоїдальному навантаженню типу розтяг-розтяг і потім статичному довготривалому ступінчатому навантаженню на розтяг (рис. 6). Проведено експериментальне дослідження повзучості композиту при циклічному навантаженні при різних амплітудах.

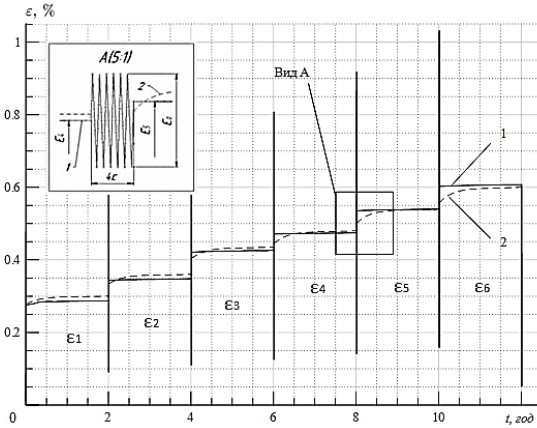


Рис. 6. Залежність відносної деформації ε від часу t при ступінчатому навантаженні з витримкою на ділянці 2 год: 1 – експеримент; 2 – розрахункова крива за принципом суперпозиції Больцмана; ε_4 , ε_5 – відносна деформація при витримці на 4-му і 5-му кроках відповідно; ε_a – амплітудна відносна деформація при циклічному навантаженні

Запропоновано модель повзучості досліджуваного композиту у розглянутих умовах навантаження аналогічну принципу суперпозиції Больцмана:

$$\varepsilon(t) = \sum_{t=0}^j \Phi(t) \Delta\sigma(\tau_i). \quad (6)$$

де $\varepsilon(t)$ – відносна деформація, τ_i – часовий зсув, t – час, $\Phi(t)$ – ядро повзучості спадкового типу, $\Delta\sigma$ – зміна діючих напружень. Перевагою даного підходу є можливість проведення розрахунків у реальному часі шляхом його реалізації, наприклад, у програмі Simulink. Розрахунок за розробленою моделлю поведінки показує добру збіжність із результатами випробувань у цій та інших роботах. Розроблена модель не може застосовуватись до випробувань із високими швидкостями деформування матеріалу та до рівня навантажень більше 60% границі міцності. Показано, що в основі деформування чи релаксації термопластичного композиту під різними видами та режимами навантаження лежить один і той же механізм, котрий кількісно описується розробленою моделлю поведінки за середніми напруженнями та деформаціями.

В розділі 4 досліджено вплив робочого середовища та температури на характеристики міцності оболонок із композиційних матеріалів. Проведено випробування оболоноквих зразків внутрішнім тиском до руйнування із визначенням руйнівного навантаження та записом

діаграми деформування. Використовуються циліндричні зразки внутрішнім діаметром 36,4 мм і довжиною 350 мм різної товщини та конфігурації. Для проведення вимірів по центру зразка з одного боку приклеєно по одному тензодатчику в поздовжньому та поперечному напрямі за допомогою цеакринового клею. Застосовано тензодатчики П1-200М: номінальний опір 200 Ом, база 5 мм, клас точності Б, вивідний, максимальна відносна деформація 0,003, коефіцієнт тензочутливості 2,15, температурний діапазон вимірювань $-70:200^{\circ}\text{C}$. Для проведення випробувань внутрішнім тиском використано випробувальний комплекс, схема якого показана на рис. 7.

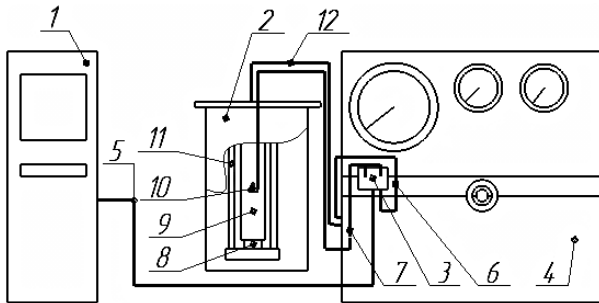


Рис. 7. Схема експериментального комплексу для проведення випробувань оболонок внутрішнім тиском:

1 – тензометрична станція; 2 – контейнер із зразком; 3 – комутаційна коробка; 4 – випробувальна машина ЦДМУ-30; 5 – шлейф тензометричної станції; 6 – шлейф підключення датчика тиску; 7 – шлейфи від датчиків; 8 – заглушка; 9 – циліндричний зразок; 10 – Т-видна розетка тензодатчиків; 11 – фіксаційне пристосування; 12 – лінія нагнітання

Для визначення наявності пошкодженого шару композиту та його величини проведено витримку склопластикових оболонкових зразків з товщиною склопластикового шару 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5 мм, що відповідає кількостям шарів 2 – 6, у морській воді протягом 310 год. Зразки були випробувані внутрішнім тиском до руйнування із записом діаграм деформування та було проведено розрахунки над отриманими результатами за вище описаними методиками. Отримано значення границі міцності та модуля пружності при різній товщині оболонки, котрі наведені у таблиці 2. Показано, що модуль пружності та границя міцності не залежать від товщини оболонки і геометричних розмірів при витримці у рідині. Тобто пошкоджений шар композиту відсутній, і витримка у рідині не призводить до появи пошкоджень у композиті, що погоджується із результатами отриманими для іншого типу композиту: термопластичного склопластику.

Таблиця 2. Границя міцності та модуль пружності оболонки із епоксидного склопластику різної товщини із лейнером

Товщина оболонки d, мм	0,5	0,75	1	1,25	1,5
Модуль пружності E, ГПа / Похибка, %	25,4/8	23,8/1	22,6/4	25,1/6	25,1/6
Границя міцності σ_B , МПа / Похибка, %	281/12	290/15	259/3	221/12	226/10

Для визначення впливу температури на оболонкові зразки із епоксидного склопластику та вуглепластику п'ять зразків із 6-ма шарами склопластику на лейнері та п'ять зразків із 2-ма шарами вуглепластику на лейнері були витримані в морській воді протягом 310 год та випробувані внутрішнім тиском при температурах 273 – 373К. Експериментальні значення для відносних модуля пружності та границі міцності показані на рис. 8. Використовуючи температурні залежності механічних характеристик матеріалів та залежності (3) – (5) було розраховано теоретичні криві для отриманих експериментальних даних.

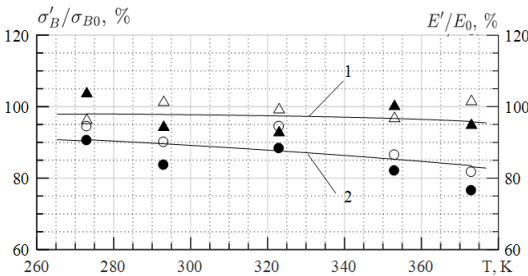


Рис. 8. Експериментальна (точки) та розрахована (криві) залежність відносних модуля пружності ($\Delta, \blacktriangle, 1$) та границі міцності ($\circ, \bullet, 2$) оболонки із епоксидного склопластику (світлі точки) та вуглепластику (темні точки) із лейнером від температури при попередній витримці у морській воді протягом 310 годин

Показано що морська вода має незначний вплив на механічні характеристики епоксидного склопластику та вуглепластику. У розглянутому діапазоні температур температура має не великий ефект на характеристики матеріалу: в рамках 5 – 10%.

Розглянуто випадок із навантаженням внутрішнім тиском оболонки із епоксидного склопластику з поліпропіленовим лейнером армованої 3-ма шарами склотканини із напрямком $\pm 45^\circ$. Із двох оболонок одна була витримана у морській воді протягом 310 год. Обидві оболонки випробувані внутрішнім тиском за описаним вище способом. Показано відсутність впливу типу армування на зміну механічних характеристик матеріалу від дії рідини за відсутності прошивки по товщині за збіжністю результатів експерименту та розрахунку.

Для встановлення впливу робочого середовища на композиційну оболонку із пошкодженням склопластику та вуглепластику

оболонки із пошкодженням (рис. 9) були витримані у морській воді протягом 310 год. Паралельно було взято такі ж дві оболонки для подальших випробувань без впливу рідини. Оболонки випробовувались внутрішнім тиском до руйнування за описаною методикою.

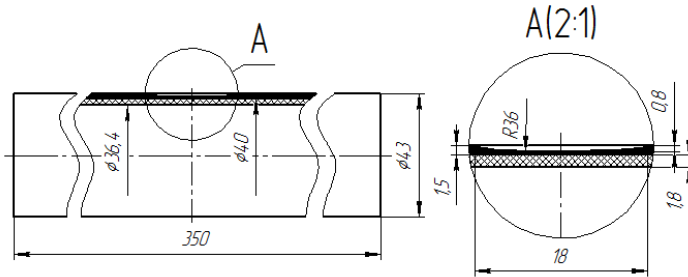


Рис. 9. Епоксидна склопластикова оболонка із пошкодженням

Результати випробувань занесені в таблицю 3. Деградовані розрахункові значення матеріалу були знайдені за залежностями (3) – (5) та за попередньо отриманими температурними залежностями механічних характеристик досліджуваних матеріалів.

Таблиця 3. Характеристики міцності композиційних оболонок

Тип оболонки	Склопластикова	Вуглепластикова
Випробування оболонки без витримки у рідині		
Руйнівний тиск, МПа	9,2	8,5
Розрахунковий руйнівний тиск, МПа	8,85	8,16
Похибка, %	4	4,2
Випробування оболонки з витримкою у рідині протягом 310 год.		
Руйнівний тиск, МПа	7	5,3
Розрахунковий руйнівний тиск, МПа	6,7	5,29
Похибка, %	4,3	0,2

Розрахунок руйнівного тиску проводився у програмі ANSYS. В програмі SolidWorks були змодельовані склопластикова та вуглепластикова оболонки із лейнером, котрі потім були експортовані в ANSYS, де на них була утворена розрахункова сітка із тетрадральних елементів (рис. 10). Пошкодження враховувалось напів еліптичною тріщиною відповідно розміру. За результатами розрахунку знайдені напруження та деформації в оболонці, а також максимальний КІН у тріщині (рис. 11). Розрахунки проводились із збільшення внутрішньо-

го тиску до настання рівності між розрахунковим КІН та критичним КІН (за критерієм Ірвіна). Порівняно отримані результати для оболонок зі пошкодженням із результатами для тих же оболонок без пошкодження. Різницею між оболонками є лише нанесене пошкодження. Зведені результати випробувань наведені у табл. 4 (δ – відхилення).

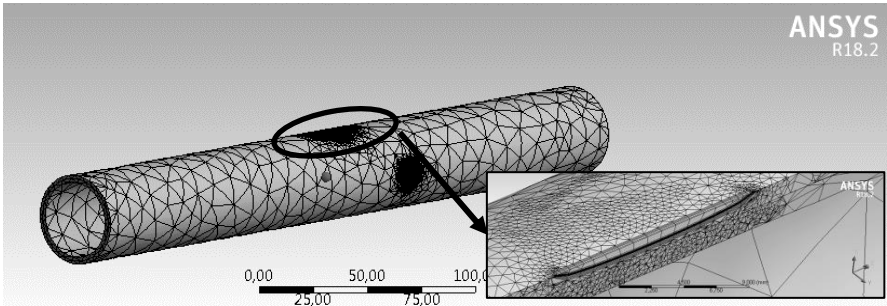


Рис. 10. Модель склопластикової оболонки з лейнером в програмі ANSYS з утвореною розрахунковою сіткою

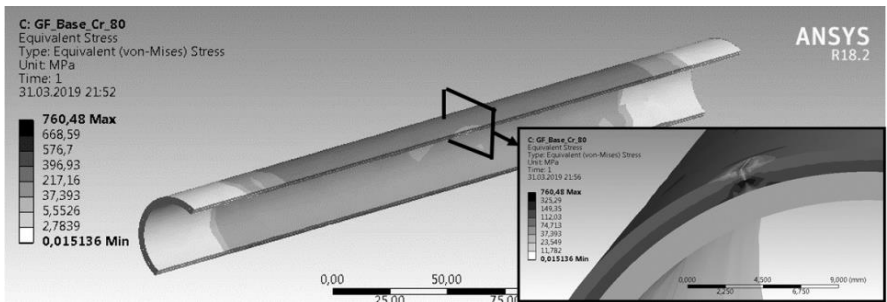


Рис. 11. Розподілення напружень по Мізесу у моделі склопластикової оболонки з лейнером навантаженої внутрішнім тиском 7МПа в програмі ANSYS

Таблиця 4. Зведені результати випробувань оболонок

Матеріал	Пошкодження	Границя міцності			Модуль пружності		
		Експеримент, МПа	Розрахунок, МПа	δ , %	Експеримент, ГПа	Розрахунок, ГПа	δ , %
Склопластик	без	225.9	223.4	1.1	25.15	23.03	9.2
	із	-	213	-	20.6	22.4	8
	δ , %		2.38		9.95	1.39	
Вуглепластик	без	511.6	535.9	-4.5	53.68	59.2	-9.3
	із	-	518	-	52.2	58.8	11.2
	δ , %		1.7		1.4	0.31	

Показано, що вплив рідини на досліджені у цій роботі базові механічні характеристики матеріалу та характеристики міцності оболонки, за виключенням характеристик тріщиностійкості (критичний КІН) не залежить від наявності механічного пошкодження. В той час як критичний КІН та навантажувальна здатність конструкції залежать від впливу рідини. Зроблені висновки дають змогу розглядати окремо вплив рідини на матеріал конструкції та на пошкодження у ній у розглянутих умовах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено технологію виготовлення композиційних зразків для дослідження їх на міцність при різних навантаженнях, яка дозволяє спростити процес виробництва штучних композиційних деталей, знизити собівартість продукту з використання сучасних достатньо складних композиційних матеріалів.

2. Виявлено, що активна адсорбція різних видів рідин композиційним матеріалом спостерігається у перші 200 год витримки у рідині. Насичення матеріалу рідиною досягається після 600 – 800 год витримки. Процес адсорбції рідини композиційним матеріалом суттєво залежить від поєднання пари матеріал-рідина.

3. Отриманий комплекс базових механічних характеристик матеріалу свідчить про те що, деградація цих характеристик пропорційна до кількості рідини у пластику і відповідно до внутрішніх напружень спричинених рідиною. Спостерігається значний вплив прошивки по товщині на границю міцності, але немає жодного впливу на модуль пружності: прошивка вздовж напрямку випробування нівелює вплив рідини, тоді як прошивка поперек напрямку випробування не чинить жодного ефекту. Деградація характеристик матеріалу при витримці у рідині є інваріантною від роду рідини. Напрямок випробувань матеріалу (з урахуванням прошивки по товщині) не має впливу на деградацію критичного КІН матеріалу. Рід рідини має вплив на деградацію критичного КІН матеріалу: спостерігається різниця у 10% між витримкою у АМг10 та морській воді.

4. Зміна температури впливає на зміну внутрішніх напружень у матеріалі, що призводить до зміни механічних характеристик матеріалу у межах до 15%.

5. На основі низки експериментальних даних по дослідженню повзучості термопластичного склопластику при комбінованих статичних та циклічних навантаженнях за кімнатної температури виявлено суттєву повзучість матеріалу (0,06% / год.) у досліджуваному часово-

му діапазоні, що описується розробленою моделлю, яку можна віднести до моделей спадкового типу, в той час як для металів за розглянутих умов повзучість не спостерігається.

6. Товщина оболонки, її геометричні розміри та напрямок армування (за відсутності прошивки по товщині) не чинять впливу на зміну механічних характеристик матеріалу від сумісної дії рідини та температури.

7. Рідина має невеликий вплив на механічні характеристики оболонок із епоксидних склопластику та вуглепластику: границя міцності змінюється при кімнатній температурі на 10%, а модуль пружності практично не змінюється. У розглянутому діапазоні температур 237 – 373К температура має невеликий ефект на характеристики матеріалу: в рамках 5 – 10%.

8. Розроблено метод визначення деградації характеристик міцності композиційної оболонкової конструкції з пошкодженням при тривалому впливі робочого середовища під внутрішнім тиском з урахуванням температури. Отримані дані дозволяють вирисовувати деградовані характеристики матеріалу з урахуванням розглянутих умов для оцінки навантажувальної здатності оболонкової конструкції. Результати виконаних досліджень використовуються на підприємствах України, що підтверджується актами впровадження ДП «Антонов» і ТОВ «Прогрестех-Україна».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бондар Н.В. Вплив гідравлічної рідини та морської води на механічні характеристики полімерних волокнистих структур / Бондар Н.В., Астанін В.В. // Проблеми прочності. – 2019.– № 2. – С. 109-119

Здобувачем проведено дослідження з адсорбції робочих рідин та деградації через них базових механічних характеристик типових полімерних композиційних матеріалів, на основі чого запропоновано спосіб прогнозування цих характеристик за даних умов.

2. Бондар Н.В. Повзучість текстильно-підсиленого композита при статичному та циклічному навантаженні / Бондар Н.В., Астанін В.В. // Проблеми прочності. – 2019. – № 3. – С. 90-99

Здобувачем встановлено закономірності повзучості термопластичного композиту під квазістатичним та циклічним навантаженням за кімнатної температури та проведено чисельні моделювання процесу повзучості, на основі яких запропоновано модель повзучості.

3. Бондар Н.В. Міцність композиційної циліндричної оболонки під внутрішнім тиском з урахуванням робочого середовища / Астанін В.В., Бондар Н.В. // Питання проектування та виробництва конструкцій літальних апаратів: Зб. наук. пр. Нац. аероксм. Ун-ту ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". – 2019. – № 1. – С. 24-41

Здобувачем визначено закономірності деформування та руйнування композиційних оболонок з лейнером, виготовлених автором, при впливі робочого середовища при варіації товщиною, напрямом кута армування та типом наповнювача та проведено розрахунки за допомогою розробленого способу.

4. Бондар Н.В. Міцність композиційної циліндричної витриманої у рідині оболонки під внутрішнім тиском з урахуванням зовнішнього пошкодження у вигляді гострої тріщини / Астанін В.В., Бондар Н.В. // Питання проектування та виробництва конструкцій літальних апаратів: Зб. наук. пр. Нац. аероксм. Ун-ту ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". – 2019. – № 2. – С. 5-18

Здобувачем проведено дослідження міцності композиційних пластин та оболонок із механічним пошкодженням з адсорбованою рідиною, на основі чого встановлено вплив рідин на конструкцію з тріщиною, за рахунок чого модифіковано запропонований спосіб.

5. Bondar N.V. Deformation and failure of thermoplastic fiber-reinforced composite exposed to different liquids taking into account temperature / Astanin V.V., Bondar N.V. // Proceedings of the National Aviation University. – 2019. – № 2. – P. 51-55

Здобувачем визначено вплив робочого середовища сумісно із дією температури на композиційні пластини та оболонки із використанням експериментально-теоретичного підходу.

6. Бондар Н.В. Технологія виготовлення та граничний стан композиційних трубопроводів при навантаженні внутрішнім тиском / Астанін В.В., Бондар Н.В. // Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування». – Вінниця, 2015. – С. 21

7. Бондар Н.В. Вплив технології виготовлення на характеристики міцності композитів / Астанін В.В., Шевченко О.А., Балалаєв А.В., Бондар Н.В. // Восьмий всевітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології». – Київ, 2018. – С. 151-158

8. Бондар Н.В. Вплив робочого середовища на характеристики міцності волокнистих оболонкових конструкцій з урахуванням температури / Бондар Н.В., Астанін В.В. // Восьмий всевітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології». – Київ, 2018. – С. 192-197

9. Бондар Н.В. Вплив робочого середовища і температури на механічні характеристики полімерних волокнистих структур / Бондар Н.В., Астанін В.В. // 7-ма міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». – Харків, 2018. – С. 85-86

10. Патент 122031 UA, МПК В29С 43/20 (2006.01) Спосіб виготовлення шаруватих полімерних композиційних деталей / Астанін В.В., Бондар Н.В.; заявник Національний авіаційний університет. – № u201706490; заявл. 26.06.2017; опубл. 26.12.2017, Бюл. №12, 2017р.

11. Патент 136438 UA, МПК G01N 3/00 (2006.01) Спосіб визначення деградації механічних характеристик полімерних композиційних матеріалів та конструкцій з них / Астанін В.В., Бондар Н.В.; заявник Національний авіаційний університет. – № u201812439; заявл. 14.12.2018; опубл. 27.08.2019, Бюл. №8, 2019р.

АНОТАЦІЯ

Бондар Н.В. Міцність авіаційних оболонок із композитів з урахуванням робочого середовища та експлуатаційного пошкодження. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.07.02 – Проектування, виробництво та випробування літальних апаратів. – Національний авіаційний університет МОН України, Київ, 2019. Дисертація присвячена експериментально-теоретичним дослідженням полімерних композиційних оболонок при впливі робочого середовища та пошкодження.

Дослідження проводились на поліпропіленових та епоксидних зразках армованих склотканиною та вуглетканиною, виготовленими за термовакуумною та автоклавною технологіями. Визначались базові механічні характеристики досліджуваних матеріалів за рядом стандартів ISO. Проводилось визначення кількості адсорбованої рідини досліджуваними пластиками. Встановлювався вплив рідин на появу пошкоджень у композиті. Визначався вплив рідини на границю міцності, модуль пружності та критичний коефіцієнт інтенсивності напружень матеріалів з урахуванням температури. Досліджено короткотривалу повзучість та релаксацію полімерних композитів під квазістатичним навантаженням. Проведено експериментально-теоретичне дослідження на епоксидних склопластикових та вуглепластикових оболонках різної товщини та типу армування із поліпропіленовим лейнером. Визначався вплив робочої рідини, температури, геометричних розмірів

та типу армування на границю міцності та модуль пружності матеріалу оболонки. Проведено дослідження характеристик міцності оболонок із пошкодженням у розглянутих умовах та проведено аналогічні експерименту числові розрахунки у програмі ANSYS.

Запропонована модель поведінки полімерних текстильно-армованих композиційних оболонкових конструкцій при впливі робочого середовища під внутрішнім тиском з урахуванням температури в часовому діапазоні 0–1000 год.

Результати дисертаційної роботи впровадженні у практику проектування та виробництва.

Ключові слова: композит, деградація, рідина, температура, міцність, пружність, КІН, адсорбція, чисельне моделювання, ANSYS, склопластик, вуглепластик, Twintex.

АННОТАЦИЯ

Бондар Н.В. Прочность авиационных оболочек с композитов с учетом рабочей среды и эксплуатационного повреждения. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 – Проектирование, производство и испытание летательных аппаратов. – Национальный авиационный университет МОН Украины, Киев, 2019. Диссертация посвящена экспериментально-теоретическим исследованиям полимерных композиционных оболочек при воздействии рабочей среды и повреждения.

Исследования проводились на полипропиленовых и эпоксидных образцах армированных стеклотканью и углетканью, изготовленными по термовакuumной и автоклавной технологии. Определялись базовые механические характеристики исследуемых материалов по ряду стандартов ISO. Проводилось определение количества адсорбированной жидкости исследуемыми пластиками. Устанавливалось влияние жидкостей на появления повреждений в композите. Определялось влияние жидкости на предел прочности, модуль упругости и критический коэффициент интенсивности напряжений материалов с учетом температуры. Проведено исследование кратковременной ползучести и релаксации полимерных композитов под квазистатической нагрузкой. Проведено экспериментально-теоретическое исследование на эпоксидных стеклопластиковых и углепластиковых оболочках различной толщины и типа армирования с полипропиленовым лейнером. Определялось влияние рабочей жидкости, температуры, геометрических размеров и типа армирования на предел прочности и модуль упругости материала

оболочки. Проведено исследование характеристик прочности оболочек с повреждением в рассматриваемых условиях и проведены аналогичные эксперименту численные расчеты в программе ANSYS.

Предложена модель поведения полимерных текстильно-армированных композиционных оболочечных конструкций при воздействии рабочей среды под внутренним давлением с учетом температуры во временном диапазоне 0 – 1000 ч.

Результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования и производства.

Ключевые слова: композит, деградация, жидкость, температура, прочность, упругость, КИИ, адсорбция, численное моделирование, ANSYS, стеклопластик, углепластик, Twintex.

ABSTRACT

Bondar N.V. Strength of aviation composite shells taking into account operational environment and damage. – On the rights of manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.07.02 – Designing, production and testing of aircraft. - National Aviation University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019. Dissertation is devoted to experimental and theoretical research of polymer composite shells under influence of operational environment and damage.

Research was carried out on polypropylene and epoxy specimens reinforced by fiberglass and carbon fiber developed using thermal-vacuum and autoclave technology. Manufacturing technology of composite specimens is developed. Basic mechanical properties of the studied materials were determined according to series of ISO standards using strain recording system and test machines FP-10 and Instron 8801. Determination of amount of adsorbed liquid by the investigated plastics exposed to these fluids for 1000 hr. was carried out. Influence of liquids on appearance of damage in the composite was established. Influence of the liquid on strength, modulus of elasticity and critical stress intensity factor of considered materials taking into account temperature is determined. Influence of through thickness braiding on mechanical properties of material with adsorbed liquid is established. Experimental dependences of the investigated mechanical properties under considered conditions from temperature were obtained and numerical calculations similar to the experiment were performed. Short-term creep and relaxation of polymer composites under quasi-static load are studied. The following hypothesis is proposed: influence

of liquid on mechanical properties of material depends from amount and type of adsorbed liquid. Experimental-theoretical research was also carried out on epoxy fiberglass and carbon fiber composite shells of different thicknesses and type of reinforcement with polypropylene liner. Influence of operational fluid, temperature, geometric dimensions and type of reinforcement on strength of the shells and elastic modulus of the shells was determined. An experimental study of durability properties of shells with damage under considered conditions was conducted and numerical calculations were conducted in ANSYS program according to experiment. Approach is based on influence of fluids on mechanical properties of shell material, which is proven by experimental data.

A behavior model of polymeric textile-reinforced composite shell structures under influence of operational environment and internal pressure, taking into account a temperature in 0 – 1000 hr. time range is proposed.

Results of dissertation are implemented into design practice and production.

Key words: composite, degradation, fluid, temperature, strength, elasticity, SIF, adsorption, numerical simulation, ANSYS, fiberglass, carbon fiber, Twintex.

Підп. до друку 08.10.2019р. Формат 60×84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк. 1,5.
Тираж 100 прим. Зам. № 163-1

Видавець і виробник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення в Державний реєстр ДК № 977 від 05.07.2002