

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(105).19388

С.В. ШАТИЛО

*Національний авіаційний університет, Україна*

## ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПАЛИВНІ СИСТЕМИ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Надається огляд актуального стану впровадження композиційних матеріалів у конструкцію літальних апаратів, наведено проблематику застосування подібних матеріалів у паливних системах, пов'язану з вимогами до них, а також із чинниками та явищами, мають місце у подібних системах. Так, описуються основні вимоги згідно з 25-м розділом авіаційних правил, основні чинники, що впливають на працездатність паливних систем, такі як атмосферний тис, температура, вологість, тощо. Наведено дослідження, що піднімають питання зносостійкості паливних систем, описуються методи дослідження процесів тертя та зношування у парах металу та палива. Окремим абзацом йде дослідження взаємодії композиційних полімерних матеріалів із авіаційним паливом з точки зору міцності, описані явища, що виникають при такій взаємодії. Окреслюється проблематика та перспективи майбутніх досліджень трибопари полімерного композиційного матеріалу та авіаційного палива.*

**Ключові слова:** композиційні матеріали, паливо, знос, зносостійкість, міцність.

**Вступ.** Композиційні матеріали знаходять все більше застосування у конструкціях літальних апаратів. Різноманіття матеріалів, їх комбінацій, дозволяє підібрати оптимальне рішення, що відповідає необхідним характеристикам конструкції, і за масогабаритними характеристиками перевершує аналогічні вироби з металів та металевих сплавів. Перелік деталей, що виробляються з подібних матеріалів дуже широкий: від елементів інтер'єру до обшивки, силових елементів фюзеляжу та крила, таких як лонжерони, кесони, шпангоути. У найсучасніших зразках пасажирських цивільних суден, таких як Boeing 787 та Airbus A350, вміст композитів у конструкції відповідно 50% та 53% від загальної маси повітряного судна [1]. Втім за останні десятиліття цей відсоток так і не перевищив 60%, що пояснюється вичерпанням можливостей полегшення конструкції за рахунок планера літака [2]. Разом з тим, існують в аерокосмічній галузі сфери застосування та системи, у яких ступінь впровадження композиційних матеріалів є відносно низьким. Однією з таких систем є паливна система літального апарата.

**Основна частина.** Специфіка паливних систем полягає в умовах їх роботи та високих вимогах, що висуваються до них через велику залежність від них безпеки польоту літального апарату. У [3] детально описані умови для кожної з компонентів паливної системи: загалом, система повинна забезпечувати надійну подачу палива у відповідному діапазоні витрат та тисків, у всіх очікуваних режимах експлуатації повітряного судна, в тому числі при усіх маневрах, на які заявляється сертифікат і протягом яких дозволена робота основних та допоміжних двигунів. Диктуються умови щодо аналізу й випробувань,

незалежності подачі палива до двигунів, захисту від ударів блискавкою, тощо. Окремими пунктами йдуть вимоги до кожного агрегату та елементу паливної системи, починаючи від магістралей, арматури, паливних кранів і закінчуючи системами заправки й дренажу палива, що є невід'ємними частинами паливної системи.

Аналізуючи чинники, що впливають на працездатність паливної системи можна виділити основні, серед яких [4]:

**Атмосферний тиск.** Більшість сучасних літаків мають відкритий дренаж паливних баків, у зв'язку з чим підйом літака на висоту супроводжується інтенсивним виділенням з палива повітря та розчинної води, що негативно впливає на працездатність системи та посилює інші чинники.

**Температура** атмосферного повітря великою мірою визначає межі працездатності паливної системи.

**Вологість повітря** спричиняє обводнення вуглеводних палив, що вимагає прийняття конструктивних та експлуатаційних заходів, що спрямовані на запобігання утворенню та накопиченню води у системі.

**Забрудненість атмосферного повітря.** Характерний для низьких висот польоту, чинник забрудненості атмосферного повітря також має прямий вплив на експлуатаційну надійність паливної системи.

**Біологічний чинник** має пряму кореляцію із кількістю води та температурним чинником. Велика кількість (більше 15 ppm (particles per million) води у паливному баку при температурах вище нуля, посилює біологічний чинник, через що у паливній системі можуть утворитися біоплівки, що утворюються мікроорганізмами, в основному бактеріями та грибами. Ці біоплівки сприяють інтенсивному розвитку біокорозії, що у свою чергу спричиняє руйнування герметиків, корозійне руйнування силових панелей кесону, накопиченню забруднень [4].

Із водою у паливній системі пов'язано ще одне явище, що негативно впливає на працездатність. Так, при температурі нижче градусів Цельсію у більш холодних частинах паливних баків утворюються кристали льоду. Згідно з [5] найбільш критичними температурами зледеніння є діапазон температур від  $-9^{\circ}\text{C}$  до  $-11^{\circ}\text{C}$  градусів Цельсію. У цьому діапазоні відбувається накопичення кристалів льоду, що може призвести до забивання ними магістралей та агрегатів системи, особливо коли накопичення льоду переміщуються. У тому ж дослідженні виявлено, що при температурах нижче  $-18^{\circ}\text{C}$  кристали льоду змінюють свою поведінку, накопичуючись у ще більші грудки льодових кристалів, і менше розподіляючись по поверхні. Згідно з [5] дослідження виявили, що поведінка води та льоду також залежить від типу та природи матеріалу поверхонь, на яких утворюється зледеніння.

Усі перераховані вище чинники прямо впливають на працездатність, ресурс та знос паливної системи літака і потребують відповідних експлуатаційних та конструктивних прийомів. Подібні прийоми відомі та відпрацьовані у класичних паливних системах літальних апаратів, вироблених з нержавіючих сталей, алюмінію і високоміцних сплавів, що характеризуються своїми високими показниками довговічності і стійкості до корозії. Ці матеріали добре відомі та

вивчені, їх властивості та характеристики задовольняють жорстким умовам, що диктуються для паливних систем.

Питання зносостійкості в трибопарах твердого матеріалу та агресивної хімічної рідини підіймалися у різних дослідженнях. Так, у роботі [6] було експериментально досліджено зношування у системах вприску при використанні різних типів палив, у тому числі й керосину Jet-A. Експерименти проводились за стандартами ASTM (American Society for Testing and Materials) у лабораторії, на приладі Камерона-Плінта та BOCLE (Ball-on-Cylinder Evaluator), а також з паливними насосами, стандартними та спеціальними, для арктичних умов. З восьми насосів на яких проводились експерименти шість були у новому стані, тоді як ще два були відновлені, і використовувались у руйнівних тестах, для яких використання нових виробів вважалось недоречним. Було використано широкий спектр рідин та палив, як керосинів, так і дизельних, варіанти рідин і палив із додавання різних присадок. Великий акцент у дослідженні зроблений за змащувальних властивостях палив та рідин, їх вплив на окислювальний корозійний знос та затирання поверхонь матеріалу. Саме ці механізми зносу у трибопарі металу та палива лягли в основу дослідження. За підсумками цього дослідження були розроблені спеціальні тести для BOCLE, що краще підходять для оцінки змащувальних властивостей палив, досліджено вплив прямий вплив ступеню переробки палива на ці властивості.

Подібні трибологічні дослідження існують в достатній кількості і добре описують поведінку традиційних для паливних систем матеріалів, описують процеси, механізми зношування, що мають місце у таких трибопарах [7,8].

Ще один підхід до вирішення проблем зношування у паливних системах описан у роботі [9]. Дане дослідження вбачає поліпшення проблеми зносу паливних систем методом обробки палив електромагнітним полем, тим часом покращуючи їх експлуатаційні характеристики. Так, для експерименту були взяті бензин А-92 та авіаційний керосин ТС-1. Тестувалися п'ять зразків, з яких два були працювали у середовищі палива, що було обробленого електричними полями протягом години, ще два працювали у середовищі не оброблених палив, а також п'ятий зразок, що працював у бензині А-92, який був оброблений електромагнітним імпульсом, і відстояний 24 години періоду релаксації. Досліди показують суттєве зменшення зносу зразків, що працювали у паливі, що було оброблене електромагнітним полем. За даними експериментів, коефіцієнт тертя сталі ШХ15 при змащуванні контакту авіаційним керосином ТС-1, що було оброблено електромагнітним полем, є в 1,3 рази меншим, ніж коефіцієнт тертя, отриманим з керосином у стані його поставки. Це пояснюється явищем, при якому збільшується рухливість частин молекул, що викликане подрібненням малорухливих, крупних молекул змащувальних середовищ за допомогою електромагнітного поля. Оптичне порівняння поверхонь тертя показує, що при однакових швидкостях і напрямках тертя, у керосині ТС-1, що був оброблений електромагнітним полем, окисні плівки починають утворюватися значно пізніше, так через 1000 м пройденого зразком шляху окисних плівок майже не виявлено. Загалом, за результатами дослідів можна констатувати, що обробка електромагнітним полем доволі позитивно впливає на протизносні характеристики палив. Наприклад, при однаковій швидкості ковзання та пройденому шляху, знос за масою при використанні обробленого електромагнітним полем керосину ТС-1 у 3,5 рази нижче ніж у не обробленого. Відповідно, у випадку палива А-92 цей показник становить 2,5.

Наведені вище роботи та дослідження наводять широкий спектр чинників зносу у паливних системах, методи поліпшення протизносних якостей як самих металів, з яких переважно зроблені системи, так і палив, що в них застосовуються. Трибологія ж композиційних матеріалів в основному зосереджена на парах тертя полімерів із іншими полімерами, або металами. Трибопара композиційних матеріалів та агресивних рідин мало досліджена. Варто зазначити, що дослідження подібних пар є темною плямою не тільки з точки зору трибології, але й з точки зору міцності.

Окремі питання, що стосуються взаємодії композиційних матеріалів із агресивними рідинами, під тисками і під різними температурами добре розкриті у дослідженні [2]. Так, ця робота добре описує базові міцнісні характеристики та їх зміну у композиційних матеріалів при взаємодії із рідинами та під тиском. Для дослідів було використано скло- та вуглепластик, а також матеріал під назвою Twintex. В ході дослідження визначено базові механічні характеристики цих матеріалів, а також вплив на них робочого середовища та температури. У якості робочих рідин було використано мінеральну гідравлічну рідину АМГ-10 та воду із 3,5% солі. Окремо варто виділити дослідження міцності оболонок із композиційних матеріалів, з урахуванням робочого середовища, температури та пошкоджень. Результати цього дослідження показують, що рідина має хоч і відносний, але вплив на міцнісні характеристики досліджуваних композиційних матеріалів. В роботі [2] описується чинник, що у випадку зі сталями та металевими сплавами не має такого впливу, як у випадку із композиційними матеріалами (Рис. 1.), а саме адсорбція композиційного матеріалу рідиною, з якою є взаємодія. Адсорбція рідини у матеріал впливає на його міцнісні показники. Виявлено пропорційну залежність від температури відносного приросту маси та коефіцієнту швидкості адсорбції. Що характерно, зворотній процес майже неможливий.

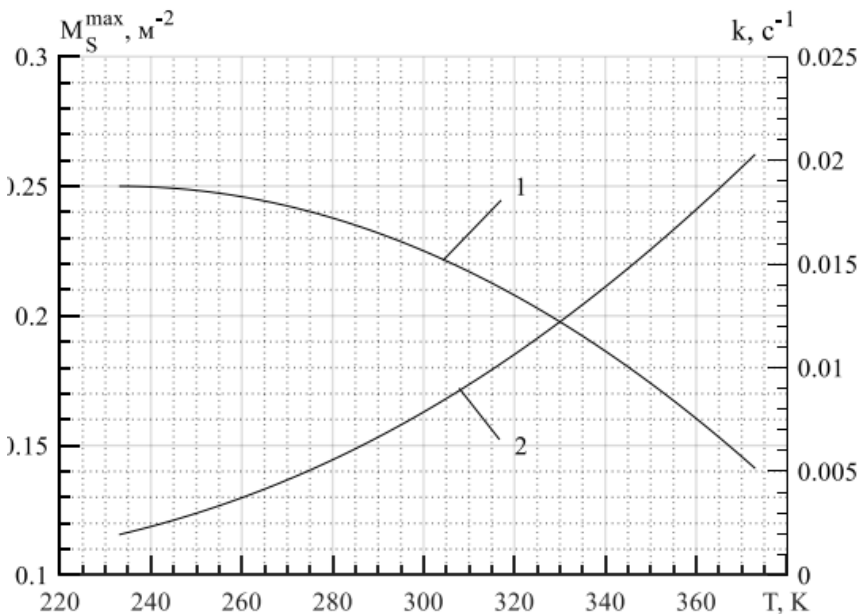


Рис. 1. Залежність максимального відносного приросту маси на  $\text{m}^2$   $M_s^{\max}$  (1) та коефіцієнту швидкості адсорбції  $k$  (2) від температури [2].

Варто зазначити, що дослідження покриває міцнісний аспект взаємодії композитів та рідин, але трибологічне питання майже не підіймається. У ході експериментів для визначення змін у розмірах зразків із інструментів дослідження використовувався лише штангенциркуль із точністю вимірювань 0,02 мм та діапазоном вимірювань 150 мм. У роботі [2] не піднімаються питання зміни шорсткості поверхонь матеріалу, хоча й констатується, що є набухання, яке вказаним інструментом не виявлено. Крім того, експерименти й розрахунки проводились в умовах статичних рідин, у яких протягом заданого часу вимочувались зразки. Враховуючи динамічний рух рідин у паливопроводах, агрегатах системи, питання взаємодії композиційних матеріалів із агресивними рідинами під тиском не можна вважати повністю розкритим наведеним вище дослідженням.

Як показує аналіз відкритих джерел [2] чисто полімерні рішення у конструкціях, що працюють під тиском та з агресивними хімічними рідинами є мало відомі або відсутні. Існують окремі інженерні рішення, як, наприклад, поєднання епоксидного вуглепластику, склопластику та металевого лейнера. Так, для проекту NASA X-33 було розроблено паливний бак з металевим чи феноло-арамідним лейнером, медіатором зі стільникового шару та епоксидним вуглепластиком назовні [10]. Подібні рішення можна назвати перехідними, перед повноцінним впровадженням повністю полімерних конструкцій.

**Висновки.** Трибологічні дослідження займаються широким колом питань пар тертя, у тому числі пар тертя металів та агресивних хімічних рідин. Подібні дослідження добре висвітлюють проблематику зносу металів від взаємодій з такими рідинами, висвітлюються технічні рішення, методи та підходи що до покращення довговічності паливних систем, вироблених з металів.

В той же час підіймається питання подібних досліджень для композиційних матеріалів, подається короткий опис дослідження взаємодії рідин и полімерних матеріалів з точки зору міцнісних характеристик, окреслюється коло питань та проблем, вирішення яких має дозволити впровадження композиційних матеріалів у вище вказані системи. Деякі питання, як наприклад трибологія пар композит-паливо досі відкриті і потребують подальших досліджень. Потребує також вивчення й питання зносу композиційних матеріалів від кристалів льоду та біологічних чинників.

### Список літератури

1. G. Marsh Airbus takes on Boeing with reinforced plastic A350 XWB // Reinforced 140 Plastics. – № 7., Випуск 12.– дек. 2007. – с. 26-27.
2. Бондар Н.В. Міцність авіаційних оболонок із композитів з урахуванням робочого середовища та експлуатаційного пошкодження: дис. канд. техн. наук.: Бондар Назарій Вікторович. - К., 2019. – 154 с.
3. Міждержавний авіаційний комітет, Авіаційні правила частина 25 норми льотної придатності літаків транспортної категорії, з Поправкою 7, 2014.
4. Сивашенко Т.І., Максютинський П.Ф. «Проектування паливних систем літальних апаратів», Київ, 2015.
5. Judith Ugbeh Johnson, Mark Carpenter, Colleen Williams, Jean-François Pons, Dan McLaren, Complexities associated with nucleation of water and ice from jet fuel in aircraft fuel

---

systems: A critical review, Fuel, Volume 310, Part A, 2022, 122329, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122329>.

6. Lacey, Paul I., Wear Mechanism Evaluation and Measurement in Fuel-Lubricated Components, TACOM MOBILITY TECHNOLOGY CENTER FORT BELVIER VA, Interim rept., 143, 1994.

7. Журавель Д. П. Моделювання процесу зношування прецизійних пар паливних систем мобільної техніки при експлуатації на біодизелі //Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. – 2018. – №. 18, т. 2. – С. 108-119.

8. Венцель Є. С., Криворотько В. М., Голубов А. С. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОШУВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ПАР ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ ДИЗЕЛЬНИХ АГРЕГАТІВ //FUNCTIONAL MODEL OF DEFINITION OF INTEGRAL INDICATORS OF QUALITY OF EDUCATIONAL ACTIVITY AND QUALITY OF HIGHER EDUCATION BY INSTITUTIONS OF HIGHER EDUCATION. – С. 3.

9. Трофимов І., Свирид М., Матієва О., Сидоренко О.. Вплив електромагнітного очищення палив та олів на формування зносостійкості фрикційних пар, 2019.

10. Патент на корисну модель № DE1650179A1 Filament wound tank design / F.R. Pflederer Опубліковано 01.1968.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2024

**Шатило Сергій Володимирович** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара, 1, м.Київ, Україна, 03058, E-mail: [4837571@stud.nau.edu.ua](mailto:4837571@stud.nau.edu.ua) [://orcid.org/0009-0002-6963-2885](https://orcid.org/0009-0002-6963-2885)

---

S.V. SHATYLO

## PROBLEMS AND PROSPECT OF THE IMPLEMENTATION OF COMPOSITE MATERIALS INTO THE FUEL SYSTEMS OF AIRCRAFTS

An overview of the current state of the implementation of composite materials into the structure of aircraft is provided, and the problems of using such materials in fuel systems, related to their requirements, as well as factors and phenomena occurring in such systems are given. Main requirements, according to the 25th chapter of aviation regulations are described, as well as factors that affect the performance of fuel systems, such as atmospheric pressure, temperature, humidity, etc. Presented multiple researches that highlights the issue of wear resistance of fuel systems, methods of researching friction and wear processes in metal and fuel pairs are described. A separate paragraph examines the interaction of composite polymer materials with aviation fuel from the point of view of strength, the phenomena provided by such interaction are described. The problems and prospects of future research on the tribopair of polymer composite material and aviation fuel are outlined.

**Keywords:** composite materials, fuel, wear, wear resistance, strength.

### References

1. Marsh, G. (2007). Airbus takes on Boeing with reinforced plastic A350 XWB. *Reinforced plastics*, 51(11), 26-29.
2. Bondar N.V. (2019) Strength of aviation composite shells taking into account operational environment and damage (Doctoral dissertation, National Aviation University).
3. Interstate Aviation Committee. (2014). *Aviation Regulations Part 25 Airworthiness Standards for Transport Category Airplanes, Amendment 7*.
4. Sivashenko T.I., Maksyutynskyi P.F. (2015) "Design of aircraft fuel systems".
5. Johnson, J. U., Carpenter, M., Williams, C., Pons, J. F., & McLaren, D. (2022). Complexities associated with nucleation of water and ice from jet fuel in aircraft fuel systems: A critical review. *Fuel*, 310, 122329.
6. Lacey, P. I. (1994). Wear mechanism evaluation and measurement in fuel-lubricated components. *US Army Contract Interim Report# BFLRF*, 286, 143.
7. Zhuravel D.P. (2018). Modeling of the process of the presidential software of fuel systems of mobile equipment at the use of biodiesel.
8. Wenzel E. S., Krivorotko V. M., Golubov A. S. STUDY OF WEAR OF PRECISION FUEL SYSTEMS OF DIESEL UNITS //FUNCTIONAL MODEL OF DEFINITION OF INTEGRAL INDICATORS OF QUALITY OF EDUCATIONAL ACTIVITY AND QUALITY OF HIGHER EDUCATION BY INSTITUTIONS OF HIGHER EDUCATION.
9. Matveeva E., Trofimov I., Svirid M., Andrievsky A., Bzenko K. (2012). Influence of electromagnetic threatment of fuels on the formation of wear resistance of friction pairs.
10. F.R. Pflederer. (1968). *Filament wound tank design* (DE1650179A1).

**Shatylo Serhii Volodymyrovych** – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzara Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 4837571@stud.nau.edu.ua., <https://orcid.org/0009-0002-6963-2885>