

БАГАТОШАРОВІ КОМПОЗИТНІ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМИ ЗАПОБІГАННЯ ЗЛЕДЕНІННЮ ЛІТАКА

М.Л. Казакевич¹, О.І. Семенець², В.М. Казакевич³

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: kazakevich.m@gmail.com

²АТ «АНТОНОВ». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1

³ТОВ «НДТ Україна». E-mail: m_kazakevich@ukr.net

Вивільнення від льоду критичних поверхонь літальних апаратів має важливе значення при польотах в умовах зледеніння. Наявність на поверхні літака льодоутворень призводить до порушення рівномірного потоку повітря та погіршення аеродинамічних характеристик поверхонь літака, що значно впливає на безпеку польоту. Розроблено нагрівальні елементи на основі композитних наноструктурованих форм вуглецю, їх оптимізований склад та методи неруйнівного контролю для надання ефективних властивостей системам проти зледеніння. Бібліогр. 6, рис. 3.

Ключові слова: система запобігання зледенінню, нагрівальні елементи, неруйнівний контроль

Вступ. На даний час існують декілька принципів, на яких базуються системи захисту від зледеніння: механічні, хімічні або теплові. Системи проти зледеніння з механічним принципом дії забезпечують видалення льоду внаслідок механічної деформації поверхні, яку захищають. Хімічний захист від зледеніння оснований на подачі на поверхню рідини проти зледеніння, яка утворює з водою розчин з температурою замерзання значно нижче 0 °С. Тепловий принцип застосовується для випаровування води, що осіла, або для відтаювання прошарку льоду, що контактує з поверхнею, яку захищають.

За принципом управління системи проти зледеніння також поділяють на системи постійної дії (запобігання утворенню льоду) та циклічної дії (видалення льоду з поверхні). Ці два принципи поділяють відповідно на anti-icing та de-icing. Для великих транспортних літаків зазвичай застосовують теплові системи проти зледеніння, у той час як механічні та хімічні системи застосовуються переважно в малій авіації.

Необхідна енергія для роботи теплових систем відбирається від двигунів. Існують два типи теплових систем: повітряно-теплові, що використовують гаряче стиснене повітря, а також електротеплові, які працюють від електричної системи літака. Певний тип системи обирають на початкових етапах проєктування з урахуванням аеродинамічних особливостей літака та потужностей, які можна відібрати від двигуна. Системи проти зледеніння повинні забезпечувати необхідний рівень безпеки польотів, а також задану економічність та експлуатаційні характеристики.

Електротеплові системи зазвичай виконують циклічної дії. Це дозволяє покращити економічні характеристики. Основним елементом електротеплової системи є нагрівальні елементи (НЕ), які складаються зі струмопровідного матеріалу, який нагрівається та захищений з усіх сторін діелектриком.

Дротові нагрівальні елементи на основі полімерних матеріалів із використанням нанотрубок, а також нагрівачі із графеном порівняно з сучасними системами характеризуються малою вагою, швидким і рівномірним нагріванням, ефективним енергоспоживанням у порівнянні з металевими системами нагрівання [1, 2].

Циклічні електротермічні системи проти зледеніння періодично видаляють невеликі скупчення льоду, розплавляючи поверхню льоду на високій швидкості за допомогою провідного матеріалу, який виділяє тепло та захищений з усіх боків діелектриком. Плівка стрічок з вуглецевих наноматеріалів досить тонка, щоби забезпечити радіочастотну (РЧ) передачу. Це неметалева, надлегка, міцна та масштабована прозора радіопровідна покриття з використанням нанотрубок або графену може значно зменшити розмір і вартість покриттів проти зледеніння для радіочастотного обладнання. Це важливо для багатьох застосувань в авіації.

Оскільки конструкції сучасних літаків виготовляються з полімерних композитів, армованих вуглецевими волокнами, постає завдання неруйнівного контролю, у тому числі, якості композитної композиції з графеном або вуглецевими нанотрубками. Протизледеніння критичних поверхонь літака є важливим під час польотів в умовах зледеніння. Наявність льодових утворень на поверхні літака призводить до порушення рівномірного

потоків повітря та погіршення аеродинамічних характеристик поверхонь літака, що істотно впливає на безпеку польотів.

Різноманітні нові вуглецеві наноматеріали, включаючи електропровідні композити з вуглецевими нанотрубками та графеном, досліджувалися як нагрівальні елементи в [3, 4]. Нанотрубки мають дуже високу міцність на розрив. Замість того, щоб розриватися або ламатися, УНТ починає перебудовувати свої молекулярні орбіталі, пристосовуючись до нової форми (стаючи більш подовженою, стиснутою або зігнутою).

Метою роботи є розробка матеріалів електропровідної композиції та захисних слоїв НЕ, технології їх виготовлення та неруйнівного контролю НЕ електротеплової системи проти зледеніння для літака.

Авторами розроблено багат шарове покриття «ЕТМ-ЕМКАН» з оптимальним вмістом вуглецевих наноматеріалів, що дозволить ефективно реалізувати технологію захисту конструкцій літака від обмерзання. Багат шарове покриття має: перший ґрунтовий шар електроізоляційного матеріалу (антикорозійний ґрунт) і тепловиділяючий шар, який містить полімерну основу, теплопровідний діелектрик, армуючу основу та вуглецеві наноматеріали, з'єднані з вихідними контактами, та другий ґрунтовий шар електроізоляційного матеріалу і шар авіаційної фарби.

Проаналізовано залежність нагріву композитів із вуглецевих нанотрубок залежно від густини теплового потоку та потужності струму. Визначено оптимальні показники. Температуру поверхні графенової плівки можна легко контролювати, змінюючи енергоспоживання. Запропонована стратегія може стати значним прогресом у впровадженні енергозберігаючих конструкцій у сфері авіаційного транспорту.

Дослідження [5], проведені за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM) для оптимізації складу вуглецевих наповнювачів (графену та вуглецевих нанотрубок) у композиційних матеріалах для створення електропровідних елементів проти зледеніння конструкцій літаків пока-

зали, що нанотрубки забезпечують більший енергетичний ефект.

На рис. 1 показано типові SEM зображення вуглецевих нанотрубок, нанесених з дисперсії в етилацетаті на металеву підкладку. На рис. 1, а в мікрометричному масштабі можна побачити суцільний шар, утворений переплутаними нанотрубками. На зображенні в масштабі сотні мікрометрів спостерігається переривчаста структура з великими агрегатами, які утворюють сітку з порожнинами розміром до сотень мікрон (рис. 1, б). Цей ефект пояснюється агрегацією нанотрубок за рахунок взаємодії функціональних груп на їх поверхні.

За результатами дослідження шару нанотрубок з полімером можна припустити, що наночастинки вуглецю розподілені в полімерній матриці достатньо рівномірно, щоби забезпечити високі функціональні характеристики, необхідні для створення авіаційних систем проти зледеніння.

Відпрацювання на експериментальному стенді та визначення параметрів різних варіантів НЕ для впровадження на літаках. Контроль якості поверхні проводили візуальним і термічним методами. Термічний неруйнівний контроль заснований на реєстрації температурних полів об'єкта контролю. Температурне поле реєструється тепловізором, який дає видиме зображення розподілу температури. Термограма підтверджує якість (рівномірність покриття, відсутність тріщин тощо). Крім того, він дозволяє фіксувати робочу температуру. Термоконтроль використовується на завершальному етапі підключення готових НЕ до електромережі та проводиться тестування.

Полімеризаційну усадку вимірювали згідно з ДСТУ ISO 28199-1:2015. На зразок легкого тканого матеріалу розміром 140×30 мм наносили аерозоль «ЕТМ ЕМКАН». Зразок висували на клейку поверхні (тефлон) в ексікаторі. Геометричні розміри до нанесення аерозолу та після висихання до ступеня 3 вимірювали штангенциркулем з абсолютною похибкою 0,05 мм. Відносна усадка зразка після висихання складала 2 %.

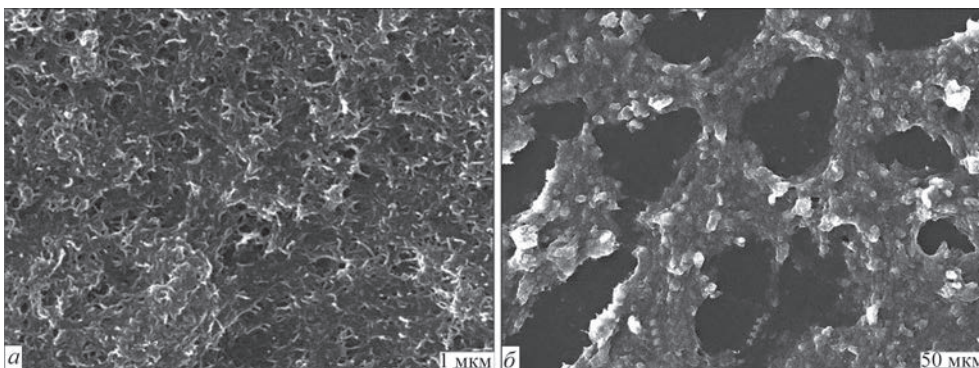


Рис. 1. SEM вуглецевих нанотрубок, нанесених із дисперсії в етилацетаті на металеву підкладку, в різних масштабах

Адгезію матеріалу «ЕТМ ЕМКАН» до металевих пластин із нанесеною авіаційною ґрунтовкою визначали методом ґратчастого надрізу згідно з ДСТУ ISO 4624:2019. На металевий зразок розміром 100×100 мм із нанесеним ґрунтом розпилювали аерозоль і після висихання до 3 ступеня скальпелем у трьох місцях робили ґратчасті надрізи з утворенням сітки з осередком 1×1 мм. Встановлено, що краї розрізів абсолютно рівні, ознак відшарування немає в жодному квадраті сітки. Адгезія оцінюється в 1 бал.

Клас термостійкості (250 °С) визначено згідно з ДСТУ ISO 4624:2019. На металеву пластину розміром 100×100 мм нанесено «ЕТМ ЕМКАН». Після висушування до ступеня 3 мультиметром визначали споживану зразком електроенергію при напрузі 115 В, а тепловізором – температуру на поверхні. Після вимикання зразок поміщали в термокамеру, нагрівали до 250 °С і витримували 15 хв. При повторному вмиканні до 115 В електроенергію, споживану зразком при 115 В, знову визначали за допомогою мультиметра (рис. 2), а температуру на поверхні – за допомогою тепловізора (рис. 3). Значення потужності та температури збігалися в межах похибки. Картина зони нагріву на тепловізорі також не змінилася.

Для визначення значення питомого теплового потоку до контактів зразка прикладали електричну напругу 115 В. Для контролю температури на поверхні зразка використовували тепловізор Flir TG267. Після досягнення температури поверхні постійних значень кількість спожитої електроенергії визначали мультиметром Keweisi KWS-AC300. Величина питомого теплового потоку розраховується шляхом ділення величини електричної потужності (90,6 Вт) на площу поверхні зразка, яку покриває «ЕТМ ЕМКАН», і дорівнює $74 \times 12 \times 6 \text{ мм} = 5,31 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Питома теплоємність для цього зразка становить 1,7 Вт/см². Електричний опір дослідного зразка, що пройшов термічні випробування, становить 145 Ом.

Композит із вуглецевих нанотрубок «ЕТМ ЕМКАН» є сучасною та вигідною заміною відомим нам систем захисту від зледеніння: він зменшує масу авіаційної конструкції, економічніший,



Рис. 2. Параметри зразка на мультиметрі



Рис. 3. Індикатори тепловізора

прозорий для радіочастотної діагностики, простий у використанні та обслуговуванні.

Неруйнівний контроль. Отримані результати випробувань дослідного зразка також дозволяють контролювати дотримання вимог якості та цілісності НЕ. Удосконалення методів неруйнівного контролю поверхонь композитних конструкцій (капілярного, ультразвукового, теплового) передбачає використання наукового комплексного підходу, що враховує властивості контрольованих поверхонь і засобів дефектоскопії. Синтез екологічно безпечних пенетрантів і нових матеріалів, у тому числі з використанням наночастинок, різко розширює ефективність і сферу застосування методів випробувань. Так, наприклад, використання сполук перехідних металів дозволяє принципово змінити технологію пошуку поверхневих мікрodefektів за допомогою змінних електромагнітних полів і виявляти пошкодження магнітних і немагнітних матеріалів. Застосування комбінованих капілярно-польових методів дає змогу вивчати топологію мікрodefektів та аналізувати приховані пошкодження конструкцій в авіації.

Прикладом нетрадиційних підходів до розробки методів дефектоскопії поверхонь є використання магнітних рідин з наночастинками для магнітопорошкової дефектоскопії та нових фізико-хімічних явищ, таких як комплексний ультразвуковий капілярний ефект, розроблений за нашою участю [6].

Одним із найважливіших інструментальних методів технічної діагностики потенційно небезпечних об'єктів є дистанційна інфрачервона тепловізійна діагностика, заснована на реєстрації

температурного поля, на принципі теплової діагностики, заснованому на порівнянні теплових полів еталонного та контрольованого об'єктів. Температурні аномалії є індикаторами дефектів, а величина температурних сигналів та їх поведінка в часі дозволяє дати кількісні оцінки параметрів об'єкта. А саме, за допомогою тепловізорів здійснюється неруйнівний термоконтроль панелей ракет і літаків. Вони виявляють дефекти: тріщини, структурні зміни, місця проникнення води.

Висновки

Одним із пріоритетних напрямків пошуку нових матеріалів і методів випробувань в авіації є розробка струмопровідних композицій і виготовлення нагрівальних елементів для електротермічної системи проти зледеніння літальних апаратів та їх неруйнівний контроль. Використовують полімерні матеріали з нанотрубками, а також нагрівачі на основі графену, що мають малу вагу, швидкий і рівномірний нагрів, а також ефективне енергоспоживання.

Проведено дослідження за допомогою скануючого електронного мікроскопа щодо оптимізації складу вуглецевих наповнювачів (графену та вуглецевих нанотрубок) у композиційних матеріалах для створення електропровідних елементів проти зледеніння конструкцій літаків.

Електропровідні композитні плівки повинні бути надзвичайно міцними з хорошою адгезією до нагрітої поверхні. Така плівка повинна бути легкою та дешевою, з фізичними характеристиками, які дозволяють покривати великі вигнуті поверхні.

Принцип теплової діагностики використовує порівняння теплових полів еталонного та контрольованого об'єкта. Температурні аномалії є індикаторами дефектів, а величина температурних

сигналів і їх поведінка в часі дозволяє дати кількісні оцінки параметрів об'єкта. Тому за допомогою тепловізійних приладів здійснюється основна частина неруйнівного контролю якості НЕ. Він дозволяє виявити такі дефекти, як тріщини, структурні зміни, місця просочування води.

Розробка стратегії нагрівальних елементів на основі композитних наноструктурованих форм вуглецю є перспективною для надання ефективних властивостей системам проти зледеніння. Розроблена технологія забезпечує систему захисту від зледеніння літака, яка може бути невід'ємною частиною аеронавігаційних панелей, а отже, конструкції літака. Таким чином, авторами запропоновано конструкцію нагрівальних елементів, їх оптимізований склад та методи неруйнівного контролю.

Список літератури/References

1. Yao, X., Hawkins, S.C., Falzon, B.G. (2021) A repairable carbon nanotube web-based electro-thermal heater and damage sensor for aerospace applications. *The aeronautical j.*, 125(1292), 1833–1843. DOI: <https://doi.org/10.1017/aer.2021.40>
2. Redondo, O., Prolongo, S.G., Campo, M. et al. (2018) Anti-icing and de-icing coatings based Joule's heating of graphene nanoplatelets. *Composites Science and Technology*, **164**, 65–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.05.031>
3. Vertuccio, L., Santis, F.De., Pantani, R. et al. (2019) Effective de-icing skin using graphene-based flexible heater. *Composites Part B*, **162**, 600–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.045>
4. (2019) *WT Chee, Carbon nanotube anti-icing and de-icing means for aircraft*. Patent US 10,457,404 B2 (45). Date of Patent: Oct. 29, 2019.
5. Kazakevych, M.L., Semenets, O.I., Kazakevych, V.M. et al. (2023) Creation and non-destructive control of electric heating elements of the aircraft icing prevention system. Proceedings of 13th The European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), 03–07 July 2023, Vol. 1(1), Lisbon, Portugal. DOI: <https://doi.org/10.58286/28081>
6. Vasylenko, I.V., Kazakevych, M.L., Pavlishchuk, V.V. (2019) Design of ferrofluids and luminescent ferrofluids derived from CoFe₂O₄ nanoparticles for nondestructive defect monitoring. *Theoretical and Experimental Chemistry*, **54**(6), 365–368. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11237-019-09582-w>

MULTI-LAYER COMPOSITE ELECTRIC HEATING ELEMENTS OF THE AIRCRAFT ICING PREVENTION SYSTEM

M.L. Kazakevych¹, O.I. Semenets², V.M. Kazakevych³

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: kazakevich.m@gmail.com

²SC «Antonov». 1 Acad. Tupolev str., 03062, Kyiv, Ukraine

³LLC «NDT Ukraine». E-mail: m_kazakevich@ukr.net

Freezing critical aircraft surfaces from ice is important when flying in icing conditions. Presence of ice formations on the surface of the aircraft leads to disruption of the uniform flow of air and deterioration of the aerodynamic characteristics of the aircraft surfaces, which significantly affects flight safety. Heating elements based on composite nanostructured forms of carbon, their optimized composition and non-destructive testing methods have been developed to provide effective properties to anti-icing systems. 6 Ref., 3 Fig.

Keywords: aircraft icing system, heating elements, non-destructive testing

Отримано 30.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 11.12.2024

Прийнято 20.02.2025