

Г. М. БОРОЗЕНЕЦЬ, І. В. СЕМАК, В. Г. ДЕМИДКО

Національний авіаційний університет, Україна

ОЦІНКА ЗМІНИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НЕРУЙНІВНИМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЮ

Виконано дослідження конструкційних елементів авіаційних вуглепластиків типу КМУ-3Л із широким спектром армування. При цьому вивчалась зміна фізико-механічних характеристик вуглепластиків руйнівними та неруйнівними методами контролю із врахуванням особливостей структури, органічного походженням армуючих волокон. Дослідження взаємозв'язків між показниками фізико-механічних характеристик композитів є однією із важливих задач при вирішенні проблеми розробки і застосування їх діагностики методами неруйнівного контролю серійними засобами в процесі експлуатації. На основі досвіду експлуатації конструкцій із вуглепластиків вітчизняних літаків (носки і закінцівки крила, обшивка пілонів, конструкції повітрязабирачів, створки шасі, інтерцептори, кермо напрямку) виконано аналіз накопичення пошкоджень в конструкціях. Найбільш розповсюдженими є: тріщини, пробіи, вм'ятини, розшарування. Близько 80% відсотків всіх пошкоджень виникають у процесі технічного обслуговування. Результати руйнівних випробувань стандартних зразків на розтягання, стиск, зсув та застосування неруйнівних методів контролю серійними засобами дозволило запропонувати методику визначення несучої спроможності конструкції із вуглепластиків. Такими характеристиками є показники вихреструмового дефектоскопа про наявність тріщин, питомої електропровідності та ємності в залежності від кількості циклів навантажень; тепловий метод, що показує ступінь пористості та розтріскування матриці, імпедансно-акустичний та ультразвуковий методи про наявність концентрації напружень.

Ключові слова: авіаційні вуглепластики, експлуатаційні пошкодження, вихреструмовий та ультразвуковий контроль, діелектрична проникність, тепла активність, питома електропровідність, методика контролю.

Вступ. В сучасній науковій термінології до композиційних матеріалів (КМ) прийнято відносити порівняно невелику групу матеріалів – полімери, метали, кераміку і вуглець армовані волокнами, а також наповнені полімери та дисперсійно зміцнені сплави.

Найбільшого обсягу застосування полімерних композиційних матеріалів досягнуто в конструкції вітчизняних літаків АН 148, АН-158, АН-178 із застосуванням високомодульних і високоміцних матеріалів на основі епоксидної та поліамідної матриць, армованих волокнами вуглецю.

За оцінками спеціалістів вартість виробництва деяких основних вузлів конструкцій із вуглепластиків може бути нижче вартості аналогічних металічних, а економія маси цивільних літаків досягне близько 10%. В процесі експлуатації елементи конструкцій із вуглепластиків зазнають впливу циклічних навантажень, механічних ударних дій, температури, вологості, сонячної радіації, що в комплексі спричиняє зміну їх характеристик [1-3].

Метою роботи є дослідження взаємозв'язків між показниками фізико-механічних характеристик авіаційних конструкційних вуглепластиків типу

КМУ-3Л та оцінка їх впливу на несучу спроможність елементів конструкцій в процесі експлуатації методами неруйнівного контролю.

Методика та результати досліджень. До основних особливостей конструкційних вуглепластиків в порівнянні із традиційними металічними матеріалами необхідно віднести: підвищені розсіювання властивостей, анізотропію, крихке руйнування та наявність великої кількості їх форм, підвищена чутливість до ударних пошкоджень, вплив кліматичних факторів, зміна властивостей матеріалу в процесі експлуатації в зв'язку із старінням полімерного зв'язуючого.

Ці та інші особливості поставили ряд проблем, що пов'язані із сертифікацією, розробкою критеріїв міцності і надійності і особливо із обґрунтуванням ресурсу конструкцій з композитів. Опір втомному руйнуванню для вуглепластиків в традиційному для металів сенсі є дуже високим. Криві втоми мають незначний нахил (показник рівняння утомної кривої змінюється в межах $m = 20 \dots 40$). Так, наприклад зміна навантаження при циклічних випробуваннях вуглепластиків на 5...7% визиває зміну їх довговічності на 1...2 порядки. Із-за незначного нахилу кривої втоми значно зростає розсіювання довговічності, що відповідно приводить до значного збільшення коефіцієнту надійності.

Крім цього аналіз існуючих гіпотез підсумування пошкоджень показав, що вони не придатні для узагальнення пошкоджень у полімерних композитах [1-3].

Експериментальні дослідження проводились на стандартних зразках із врахуванням вимог стандартів ГОСТ 27.002-83 «Надёжность в технике. Термины и определения», ГОСТ 25.601-80, ГОСТ 25602-80, ГОСТ-25.604-80 «Методы испытания на растяжение, сжатие, изгиб при нормальной и повышенной температурах».

Експлуатаційні пошкодження композитів можуть бути внесені у процесі технічного обслуговування і льотної експлуатації авіатехніки. Під пошкодженням необхідно розуміти деяку зону матеріалу, в якій відбулося порушення суцільності (мікротріщини у матриці, руйнування волокон тощо), що спричинило зміну механічних властивостей.

Експлуатаційні пошкодження зв'язані також із дією оточуючого середовища. Пошкодження можуть зазнавати як волокна так і матриця, а також зовнішні і внутрішні шари. Пошкодження зовнішніх шарів матеріалу можливо виявити візуально, а внутрішніх тільки методами неруйнівного контролю.

Найбільш розповсюдженими типовими пошкодженнями, які виникають у процесі експлуатації конструкцій із КМ є пробіони, тріщини, розшарування та вм'ятини.

Досвід експлуатації конструкцій із КМ виробів вітчизняних літаків (носки і закінцівки крила, обшивка пілонів, конструкції повітрязабірників, створки шасі, кермо напрямку, інтерцептори і перегородки фюзеляжа показав, що із всіх пошкоджень найбільш розповсюдженими є: пробіони – 26,5%, тріщини – 29,6%, вм'ятини – 17%, розшарування – 12,4%. Біля 65% всіх дефектів обумовлені ударними пошкодженнями, а близько 80% пошкоджень виникають у процесі технічного обслуговування.

Результати руйнівних випробувань стандартних зразків із композитів на розтягання, стискання, зсув та застосування неруйнівних методів контролю дозволило запропонувати методику визначення їх несучої спроможності. Методика охоплює питання контролю елементів вуглепластикових конструкцій за допомогою вихреструмових дефектоскопів із накладними перетворювачами, ультразвуку

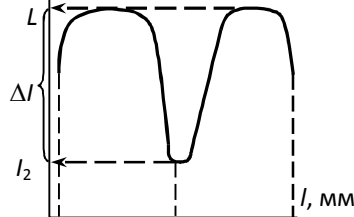
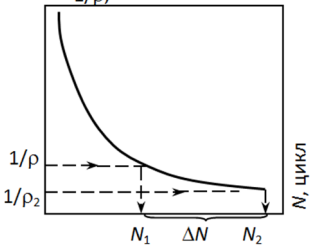
кових дефектоскопів при використанні ехо-методу, імпеданстних акустичних дефектоскопів, а також приладів теплового та ємнісного контролю.

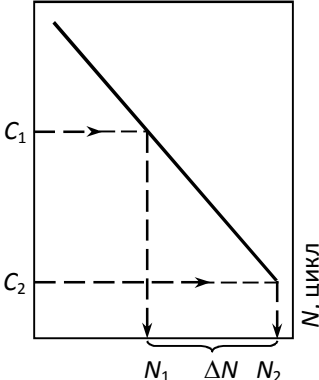
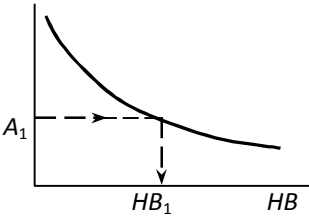
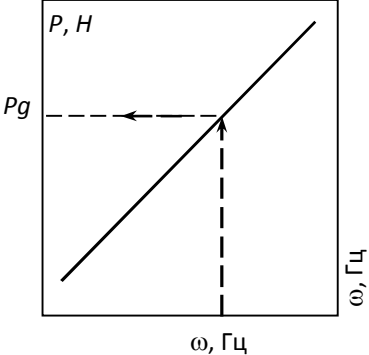
Метод вихорвих струмів ефективний при виявленні деформацій розтріскування, ударних пошкоджень в обшивці із вуглепластика. Ультразвуковий метод контролю дозволяє виявити поверхневі та внутрішні дефекти типу розшарування, непроклеї, пори в конструкціях із КМ. Вологонасиченість найбільш доцільно оцінювати методами теплового та діелектричного контролю.

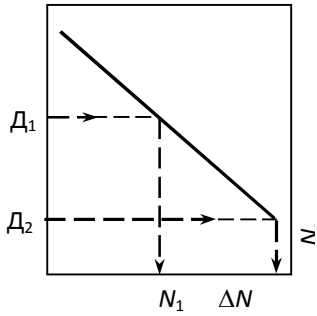
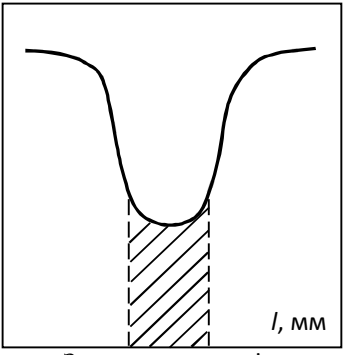
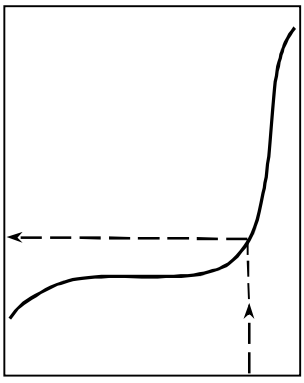
Виявлення дефектів залежить від фізичних характеристик контролюємого матеріалу (електропровідність, діелектрична проникність, затухання ультразвуку), наявності концентраторів та металічних елементів в конструкціях із КМ. На основі результатів досліджень розроблена методика із врахуванням вимог відповідно із ГОСТ 18353-78 «Контроль неруйнівний. Класифікація методів.» та доповнена змінами з врахуванням стандарту ДСТУ EN ISO 9712 і призначена для використання спеціалістами з неруйнівних методів контролю авіаційних підприємств та авіаремонтних заводів. Рекомендації із застосування основних методів неруйнівного контролю серійними приладами та визначення критеріїв пошкоджень наведено в таблиці.

Таблиця 1

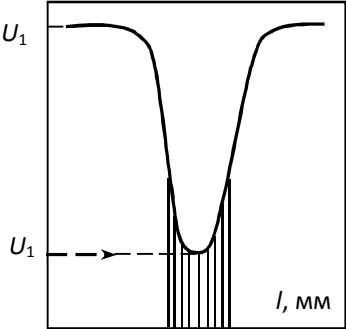
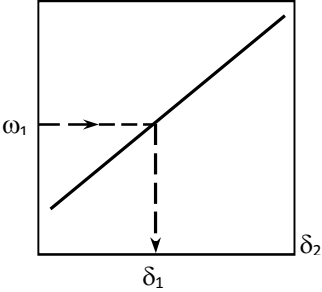
Рекомендації із вибору методів оцінки пошкоджуваності КМ та особливості застосування неруйнівних методів контролю

Метод контролю та особливості його застосування	Характерні залежності показників приладів контролю	Визначення критеріїв пошкоджень
1	2	3
<i>Вихорострумовий метод</i> Односторонній доступ, точковий контакт, вплив окрайки виробу. Прилади типу: ТВД, ДНМ-500	Залежність показників I вихорострумового дефектоскопа від крайового ефекту та наявності тріщин  Окрайка Тріщина Окрайка	Місця тріщин або руйнування вугільних волокон КМ за показниками приладів
<i>Вихорострумовий метод</i> Односторонній доступ, вплив окрайки виробу, вплив покриття. Прилади типу: ВЗ-21Н ІЕ-11;20	Залежність питомої електричної провідності вуглепластикових КМ ($1/\rho$) від кількості циклів навантаження 	Зниження довговічності вугільних волокон одно направленого вуглепластика в умовах циклічного навантаження

1	2	3
<i>Ємнісний метод</i> Односторонній доступ, вплив крайки виробу, вплив покриття поверх- ні. Прилади типу: ВЗ-21Н, ІЕ-11, ІЕ-20	Залежність ємності C перетворю- вача від кількості циклів наван- таження N C, пФ  N_1 ΔN N_2	Зниження довговічно- сті матриці, а також ступеня її деструкції в умовах циклічного навантаження
<i>Тепловий метод</i> Односторонній доступ, вплив покриття. Прилад типу: ИТА-2105	Залежність теплової активності A від твердості HB вуглепластико- вого КМ $A \left(\frac{\sqrt{\text{ВтДж}}}{\text{м}^2\text{К}} \right)$  A_1 HB_1 HB	Ступінь пористості та розрихлення матриці
<i>Імпедантсний акустичний метод</i> Односторонній доступ. Точковий контакт. Прилади типу ИАД-3 та ін.	Залежність діючого наванта- ження на обшивочний КМ від резонансної частоти його власних коливень  P_g $\omega, \text{Гц}$	Величина діючого на- вантаження залежно від резонансної частоти власних коливань

1	2	3
<i>Оптический метод</i> Односторонний доступ. Оптические та механические засоби вимі- рювання розмірів	Залежність втрати довговічності ΔN від діаметра концентратора в вуглепластиковому КМ 	Відносна величина довговічності залежно від величини концентратора напружень
<i>Ультразвуковой метод</i> Односторонний доступ, необходимость акустического контакта	Залежність затухання коливань біля місця концентрації напружень в композиті  Зона концентрации напряжений	Затухання ультразвуковых колебаний в зоне концентрации излишних напряжений
<i>Метод акустической эмиссии</i>	Залежність сумарної акустичної емісії $A_{\text{ем}}$ від діючого навантаження 	Ступінь наближення діючого навантаження до руйнуючого за зростанням інтенсивності сигналів акустичної емісії

 P_1

1	2	3
<i>Імпедансний метод</i> Точковий контакт, односторонній доступ, вплив окрайки та товщини виробу. Прилади типу: АД-60С	Залежність імпеданса U від ударного пошкодження вуглепластикового КМ 	Пошкодження вуглепластикового КМ внаслідок ударного впливу, або розшарування КМ
<i>Ультразвукова резонансна товщинометрія</i> Односторонній доступ, необхідність акустичного контакту. Прилади типу: УТ-30ПЦ, УТ-30ПА, УТ-92П	Залежність резонансної частоти ω від товщини вуглепластикового обшивочного КМ 	Товщина обшивки, місця не проклею та розшарування

Висновки. В результаті досліджень запропоновано методику комплексної оцінки несучої спроможності конструкційних авіаційних вуглепластиків типу КМУ-3Л із застосуванням неруйнівних методів контролю.

Зміна фізико-механічних характеристик елементів конструкцій із вуглепластиків в процесі експлуатації дає можливість встановлення кореляційної залежності із зміною несучої спроможності матеріалу.

Результати руйнівних методів досліджень в комплексі із неруйнівними методами контролю конструкцій із КМ можуть бути використані для оцінки залишкової міцності та наукового супроводу процесу експлуатації полімерних композитів.

Список літератури

1. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Застосування композиційних матеріалів в авіаційних конструкціях та проблеми оцінки їх стану // Науково-популярний журнал «Колега» НАН України, № 1. 2012 – С. 38-39.
2. Борозенець Г.М., Семак І.В. Оцінка впливу вологи і агресивних середовищ на фізико-механічні характеристики конструкційних вуглепластиків. Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування» № 3 (68). 2015 С. 85 – 89.
3. Матис И.Г. Электрические, радиоволновые и тепловые методы и средства неразрушающих исследований композитов // Методы с средства диагностики несущей способности изделий из композитов. – Рига: Зинатне, 1985. – С. 74 – 84.

Стаття надійшла до редакції 19.09.2019.

G. BOROZENETS, I. SEMAK, V. DEMYDKO

EVALUATION OF CHANGE OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL CARBON PLASTICS IN THE PROCESS OF OPERATION BY NON-DESTRUCTIVE METHODS OF CONTROL

Investigation of structural elements of aircraft carbon fiber plastics type CMU-3L with a wide range of reinforcement. The change of physical and mechanical characteristics of carbon plastics by destructive and non-destructive methods of control was studied, taking into account the peculiarities of the structure, the organic origin of the reinforcing fibers. Investigation of the interrelation between the indicators of the physical and mechanical characteristics of composites is one of the important tasks in solving the problem of development and application of their diagnostics by methods of non-destructive control by serial means during operation. On the basis of experience in the operation of structures made of carbon fiber plastics of domestic aircraft (socks and limbs of wings, plating of pylons, designs of air intakes, chassis flaps, interceptors, steering wheel), an analysis of damage accumulation in structures was performed. The most common are: cracks - 29.6%, holes - 26.5%, dents - 17%, bundles - 12.4%. About 80% of all damage occurs in the maintenance process. The results of the destructive testing of standard specimens for tensile, compression, displacement and the use of non-destructive methods of control by serial means allowed us to propose a method for determining the bearing capacity of the structure of carbon fiber. Such characteristics are indicators of eddy current flaw detector on the presence of cracks, specific electrical conductivity and capacity depending on the number of load cycles; thermal method showing the degree of porosity and loosening of the matrix, impedance-acoustic and ultrasonic methods for the presence of stress concentration.

Key words: aviation carbon plastics, operational damage, eddy current and ultrasonic control, dielectric constant, thermal activity, electrical conductivity, control method.

References

1. Borozenets H.M., Pavlov V.M., Semak I. V. Zastosuvannia kompozytsiinykh materialiv v aviatstsiiinykh konstrukttsiiax ta problemy otsinky yikh stanu // Naukovo-populiarnyi zhurnal «Koleha» NAN Ukrainy, № 1. 2012 – S. 38-39.
2. Borozenets H.M., Semak I.V. Otsinka vplyvu volohy i ahresyvnykh seredovyshch na fizyko-mekhanichni kharakterystyky konstrukttsiinykh vuhleplastykiv. Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Problemy tertia ta znoshuvannia» № 3 (68). 2015 S. 85 – 89.
3. Matis I.G. Elektricheskie, radiovolnovye i teplovye metody i sredstva ne-razrushajushhih issledovaniy kompozitov // Metody s sredstva diagnostiki ne-sushhej sposobnosti izdelij iz kompozitov. – Riga: Zinatne, 1985. – S. 74 – 84.

Борозенець Григорій Михайлович – к.т.н., с.н.с., доцент кафедри машинознавства, аерокосмічний факультет, Національний авіаційний університет, проспект Космонавта Комарова, 1, м. Київ-58, Україна, 03680, тел.: +380681985905.

Семак Інна Вікторівна – старший викладач кафедри машинознавства, аерокосмічний факультет, Національний авіаційний університет, проспект Космонавта Комарова, 1, м. Київ-58, Україна, 03680, тел.: +380673573993, E-mail insemak@bigmir.net.

Демидко Валерій Григорович – к.т.н., доцент кафедри вищої математики факультету транспорту, менеджменту і логістики, Національний авіаційний університет, проспект Космонавта Комарова, 1, м. Київ-58, Україна, 03680, тел.: +380672893306, E-mail vde-mydko@yahoo.com.