

*О.А. Шевченко, канд. техн. наук, Н.О. Рогожина,
(Національний авіаційний університет, Україна)*

Параметри та релаксація пошкоджень від низькошвидкісного удару вуглепластиків з різними структурами наповнювача

Були досліджені параметри та релаксація пошкоджень вуглепластиків на основі епоксидної смоли M21 та двох різних структур наповнювача, а саме двоспрямованої тканини та односпрямованої вуглецевої стрічки, від низькошвидкісного удару. Результати досліджень надані у вигляді гістограм глибин вмятин та діаметрів пошкоджень з обох сторін зразків і зроблені відповідні висновки.

Сучасні композиційні матеріали (КМ) практично замінили традиційні метали у передових конструкціях військових літальних апаратів (ЛА), а в конструкціях пасажирських літаків Boeing 787 та Airbus 350 вага конструкцій з КМ досягає 50% та більше що дозволило суттєво підвищити їх ефективність. Наразі вагова досконалість виробів авіаційно-космічної техніки залишається одним з найважливіших компонентів їх технічної досконалості. У вирішенні цієї проблеми важливу роль відіграє застосування полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) [1,2]. Конструкції сучасних ЛА з ПКМ є набагато технологічні ніж аналогічні металеві та мають меншу вагу, але вони значно дорожчі, що вимагає приділяти значну увагу збереженню льотної придатності даних конструкцій при їх експлуатації. Найбільш поширеними ПКМ у конструкціях ЛА є вуглепластики завдяки їх великій жорсткості і малої ваги, але вони є чутливими до ударних пошкоджень, що виникають при їх експлуатації, тому важливою проблемою є дослідження стійкості ПКМ, особливо вуглепластиків, до ударних пошкоджень. На фото (рис.1) представлені наслідки низькошвидкісного удару на передній (фронтальній) поверхні зразка, які є ледь видимими (рис.1а), а також на зворотній поверхні, де пошкодження є значними (рис.1б).

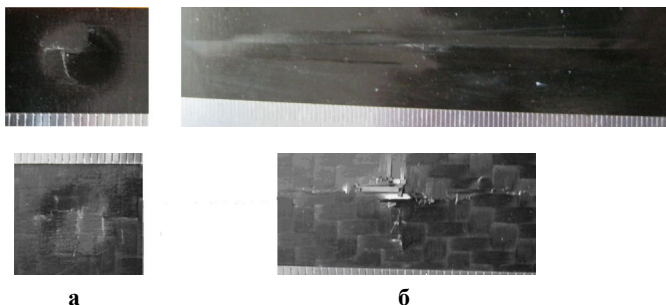


Рис. 1. Пошкодження вуглепластиків з передньої (а) та зворотної (б) сторін

Значні пошкодження на зворотній стороні вуглепластика при ледь видимих пошкодженнях на передній поверхні, які навіть мають спеціальну назву в

стандарті [3] Berely Visible Impact Damage (BVID), пояснюють актуальність досліджень пошкоджень ПКМ, і особливо вуглепластиків, при низькошвидкісному ударі з невеликою енергією. Результати комплексних досліджень стійкості до пошкодження вуглепластиків з різними матрицями та різним об'ємом вмісту волокон представлені у роботі [4]. Дослідження пошкоджень, нанесених ударами з різною енергією у діапазоні від 4 до 40 Дж у зразках з різноманітних вуглепластиків, величини яких були визначені за допомогою методу комп'ютерної томографії, ультразвукового контролю та методу оптичної термографії представлені у роботі [5]. Опис установки та методики для випробувань ПКМ на низькошвидкісний удар, а також результати порівняння пошкоджень 3 різних ПКМ від ударів з енергією від 2 до 25 Дж представлені у роботі одного з авторів [6]. За результатами даної роботи, в якій зразки з різних ПКМ мали товщину від 1,0 мм до 1,8 мм, було визначено, що для якісного порівняння чутливості до удару ПКМ необхідно мати зразки приблизно однакової товщини. Порівняльні дослідження глибин та діаметрів пошкоджень при різній енергії ударних навантажень були проведені за результатами випробувань зразків товщиною $2.00 \pm 0,05$ мм із вуглепластику та склопластику на основі епоксіфенольного сполучного та термопластичного КМ TWINTEX на основі поліпропілену [7].

Дана робота присвячена випробуванням на низькошвидкісний удар з однаковою енергією на одиницю товщини зразків з вуглепластиків 2 виконань на основі однакової епоксидної матриці HexPly M21, але різної структури наповнювача а саме двоспрямованої вуглецевої тканини та односпрямованої вуглецевої стрічки. Далі проводились дослідження діаметрів пошкоджень та їх глибини, а також релаксації пошкоджень після 7 суток витримки після їх нанесення.

Вуглепластик для зразків першого виконання - M21/40%/268T2/AS4C-6K мав середню товщину 2,50 мм і був виготовлений за препреговою технологією на основі високоєфективної, міцної епоксидної матриці HexPly M21 з температурою затвердіння 180°C, яка використовується в основних аерокосмічних конструкціях, та наповнювача на основі двоспрямованої вуглецевої тканини саржевого плетіння односпрямованим вуглецевим джгутом AS4C-6K. Зразки другого виконання середньої товщини 2,10 мм з матеріалу M21/34%/UD268/AS7-12K, який був виготовлений за препреговою технологією на основі такої ж епоксидної матриці M21, але в якості наповнювача була використана односпрямована вуглецева стрічка на основі джгута AS7-12K. Вуглепластики обох виконань мали збалансовану, квазіізотропну структуру.

Випробування проводились на спеціальній розробленій установці, яка описана у роботі [6], у відповідності зі стандартом ASTM D7136 [3]. За даним стандартом випробування зразків проводиться шляхом нанесення пошкодження ударом падаючим вантажем із заданою енергією та подальшим визначенням отриманих параметрів пошкоджень. Зразки для випробувань мали розмір 100 мм × 150 мм і фіксувалися на верхній опорній частині з прямокутним отвором 75 мм × 125 мм за допомогою спеціальних затисків. Удар наносився з висоти H [м] падаючим вантажем масою $m=2,248$ кг з сферичним 16 мм наконечником - бойком, з енергією удару, яка розраховується за формулою

$$E = C_E h,$$

де: E – потенційна енергія ударника перед ударом, Дж [Н м];

C_E – певне відношення енергії удару до товщини зразка Дж/мм, яке в даних випробуваннях дорівнювало 6,7 Дж на 1 мм товщини зразка;

h – номінальна товщина зразка.

Висота падіння вантажу (ударника) H визначалась за формулою

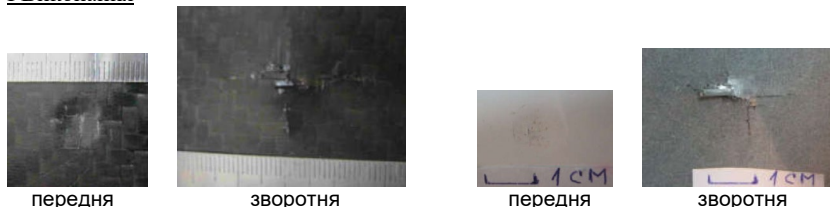
$$H = E / m_d g,$$

де: m_d – маса ударника для расчета висоти падіння, кг, ($m_d = 2,248$ кг);

g – прискорення вільного падіння, $9,81$ м/с².

Були випробувані 8 зразків з вуглепластика по 4 кожного виконання, причому на третій та четвертий зразок кожного виконання було нанесено лакофарбове покриття. Після проведення випробувань були зроблені фото пошкоджень кожного зразка як з передньої так і зі зворотної сторони за допомогою спеціальної збільшувачої вебкамери. Типові фото пошкоджень зразків двох виконань з передньої та зворотної сторін представлені на рис. 2.

I Виконання



II Виконання

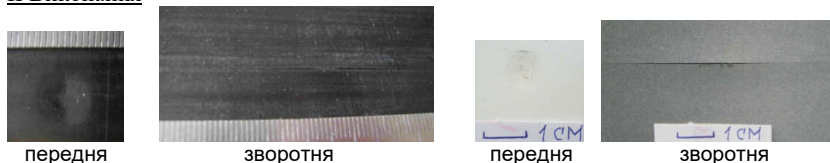


Рис. 2. Фото пошкоджень вуглепластиків з передньої та зворотної сторін

Після випробувань зразків вони закріплювались у відповідному стапелі і проводились заміри глибини d_0 (depth) пошкодження (вм'ятини) впродовж 15 хвилин після випробувань зразка за допомогою спеціального пристосування з точним (до 0,001 мм) індикатором годинникового типу, після цього фіксувалося візуально пошкодження зразка після нанесення удару, визначається тип пошкодження і максимальний розмір (діаметр) пошкодження D_{II} з передньої сторони та D_3 зі зворотної сторони за допомогою цифрового штангенциркуля. Гістограми діаметрів пошкоджень з передньої сторони D_{II} та D_3 зі зворотної сторони представлені на рис. 3.

Окрім замірів глибини вм'ятини d_0 відразу після удару у даному дослідженні повторно глибини вм'ятини d_7 замірялася через 7 діб після моменту проведення випробувань зразка з метою визначення релаксації пошкодження.

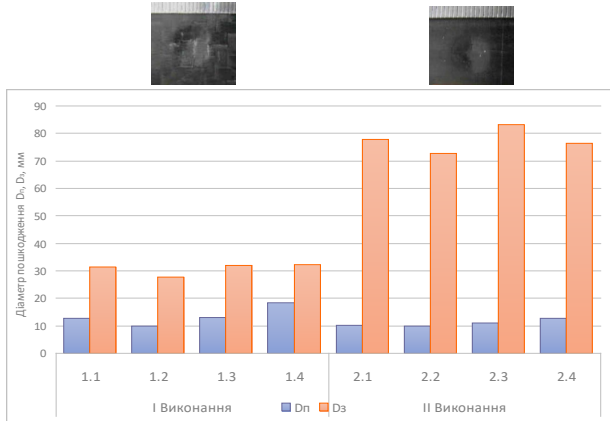


Рис. 3. Гістограми діаметрів пошкоджень з передньої сторони D_{II} та зі зворотної сторони D_{III} для зразків обох виконань

Ступінь релаксації пошкоджень протягом 7 діб після моменту проведення випробувань зразка η у відсотках визначається за такою формулою:

$$\eta = \frac{d_0 - d_7}{d_0} \cdot 100\%,$$

де: d_0 – глибина вм'ятини, визначена протягом 15 хвилин після випробувань;

d_7 – глибина вм'ятини, визначена через 7 діб після проведення випробувань зразка.

Узагальнені результати замірів глибин вм'ятин d_0 після удару та d_7 через 7 діб після випробувань, а також дані розрахунків релаксації пошкодження представлені у вигляді гістограм на рис. 4.

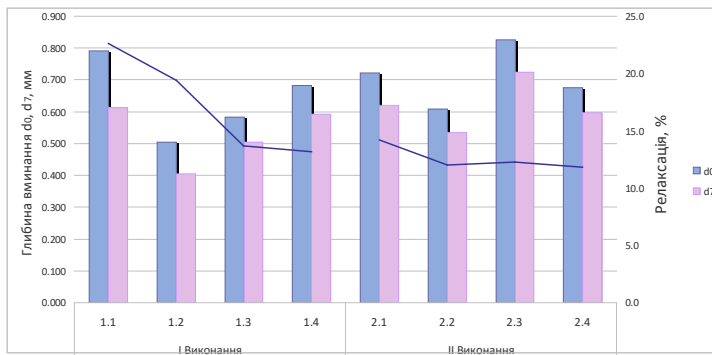


Рис. 3. Гістограми замірів глибини вм'ятини d_0 відразу після удару, d_7 через 7 діб після випробувань та криві значень релаксації пошкоджень.

Аналіз результатів випробувань, які представлені у вигляді гістограм та кривих на рис. 3 та рис. 4 дозволяють зробити наступні узагальнюючі висновки.

Висновки

Вуглепластик на основі двоспрямованої вуглецевої тканини (I виконання) у порівнянні з вуглепластиком на основі односпрямованої вуглецевої стрічки (II виконання) після удару з однаковою енергією 6,7 Дж на 1 мм товщини мають меншу глибину вм'ятини d_0 у середньому на 10,7 %, але більший діаметр пошкодження D_{II} на передній стороні у середньому на 18,4 %.

Зі зворотної сторони діаметр пошкоджень D_3 для вуглепластиків обох виконань є значно більшим у порівнянні з діаметром D_{II} на передній стороні, причому для вуглепластика на основі двоспрямованої тканини різниця складає 1,7 рази, а для вуглепластика на основі односпрямованої стрічки різниця складає більше ніж 7 разів.

Діаметр пошкоджень зі зворотної сторони D_3 для вуглепластика на основі двоспрямованої тканини у середньому у 2,5 рази менше, ніж для вуглепластика на основі односпрямованої стрічки.

Зменшення глибини вм'ятин d_0 (так звана релаксація) у вуглепластика на основі двоспрямованої тканини у середньому складає 17,2 %, а у вуглепластика на основі односпрямованої стрічки 12,6 %, що приблизно у 1,4 рази менше.

Список літератури

1. Астанін В.В., Хоменко А.В., Шевченко О.А. Композиційні матеріали у конструкціях сучасних літальних апаратів.–К.– Вісник НАУ, №3, 2004. С. 46-52.
2. Андреев А.В. Тенденции и перспективы применения полимерных композитов в европейском авиационном строительстве / Андреев А.В., Донец А.Д. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».–Вып. 2(98).–Х.,2019.С.19-31.
3. Standart ASTM D7136/D7136 M – 05 the Impact Properties of Fiber Reinforced Composite Laminated Plates. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2000. V.19. N 06.
4. Erber A., Gittel D., Geiger O., Chandhari R., Henning F., Drechsler K. Advanced Damage tolerance of CFRP Laminates Using in-SITU Polymerised Thermoplastics. SAMPE Europe, SETEC 2009. – P. 15 – 25.
5. Wagner H., Bansemir H., Drechsler K., Weimer C. Impact Behavior and Residual Strength of Carbon Fiber Textile Based Materials. SAMPE Europe, SETEC 2007.–P.15–25.
6. Damage of fiber reinforced polymer matrix composites from a drop weight impact event / Shevchenko O.A., Olefir O.I., Skrypnikov O.E. // VI Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології»: матеріали 23 –25 вересня 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – Т. I. – С. 1.3.23 – 1.3.27.
7. Deformation and damage of modern composites at low velocity impact event / Astanin V.V., Schevchenko O.A., Dydenko O.V. // Proceedings the Seventh World Congress “Aviation in the XXI-st Century” Safety in Aviation and Space Technologies. September 19-21, 2016, тези доп. – К.: НАУ, 2016. – С. 1.3.6 –1.3.10.