

*І. В. СЕМАК, Г. М. БОРОЗЕНЕЦЬ**Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна*

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УДАРНОЇ ДІЇ ГРАДУ НА МІЦНІСТЬ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Проведені дослідження впливу ударної дії граду на залишкову міцність обшивних вуглепластикових матеріалів. Розроблена методика утворення льодяних гранул і нанесення ударних пошкоджень на зразки. Отримані результати впливу ударної дії граду на міцність зразків при різних схемах армування матеріалу.

Ключові слова: авіаційні вуглепластики, схеми армування, ударні дії граду, залишкова міцність.

Вступ. Останнім часом в конструкціях, де основним чинником є зниження питомої ваги, широко застосовують полімерні композиційні матеріали (КМ) на основі епоксидної та поліамідної матриць, армовані волокнами вуглецю. Найбільшого поширення КМ досягнуто в авіаційних конструкціях, здебільшого в якості конструктивних елементів обшивок. При цьому застосовуються тонкі листові КМ з різними схемами армування, в залежності від конкретних місцевих навантажень.

Найбільшого застосування полімерних композиційних матеріалів досягнуто в конструкціях вітчизняних літаків АН-74, АН-148, АН-124. Раніше виконані нами дослідження показали, що вплив таких зовнішніх умов як температура і волога навколишнього середовища призводить до помітного зниження характеристик міцності полімерних композиційних матеріалів. Впровадження в практику авіабудування композиційних матеріалів з полімерною матрицею істотно залежить від їх здатності зберігати фізико-механічні властивості під впливом вологи і агресивних середовищ. [1-3].

Метою роботи є дослідження впливу ударної дії граду на залишкову міцність полімерних вуглепластикових матеріалів типу КМУ-3Л.

Матеріали та методика досліджень. Характерними і найбільш визначальними навантаженнями для обшивних матеріалів є зсувні навантаження в площині листа. Серед досить великої кількості способів механічних випробувань на зсув [4], одним з найпоширеніших є метод, рекомендований [4], згідно з яким хрестоподібний зразок (рис. 1) навантажується за допомогою чотири ланкового шарнірного механізму.

Під час експлуатації авіаційні конструкції підпадають дії різноманітних ударних навантажень, в результаті яких у вуглепластикових обшивках можуть виникати мікро- та макропошкодження структури. При цьому одним з найменш досліджених варіантів ударних дій є пошкодження від удару граду.

Для того, щоб обґрунтувати режими нанесення на зразки ударних пошкоджень, еквівалентних пошкодженням від реальних градових потоків, були використані результати роботи [5, 6], в якій наведені основні визначення і характеристики граду, місця випадання, повторюваність, форми і розміри градин, їхні питома вага і температура. Крім того, в роботі [5] отримані залежності швидкості падіння градин, ймовірності появи, густоти градового потоку від розмірів градин.

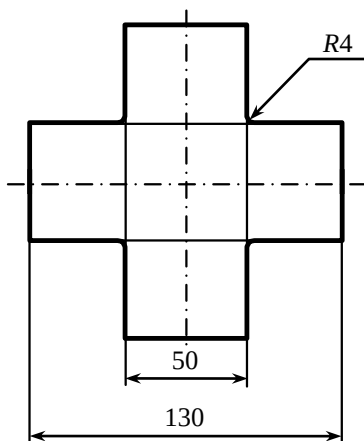


Рис.1 Зразок для випробувань на зсув згідно зі стандартом.

З урахуванням вище вказаного, для дослідження впливу ударної дії граду на міцність обшивних вуглепластикових КМ, були вибрані стандартні зразки для випробування на зсув в площині листа (див. рис. 1) з розмірами робочої зони

50 x 50 мм. Для нанесення ударних пошкоджень застосовувались сферичні гранули діаметром 15 мм, цілком утворені із прозорого льоду, які мали температуру близьку до 0°C . Бомбардування здійснювалось одиничним співударям із швидкістю 20 м/с під кутом 90° . Таким чином із найбільшою імовірністю моделюється пошкодження обшивки літака від граду на стоянці.

Для утворення гранул був виготовлений спеціальний пристрій (кокіль), який складається із двох металевих пластин з напівсферичними заглибинами, між якими розташована прокладка із вакуумної гуми з відповідними круговими вирізами $\varnothing$ 15 мм. Отримані таким шляхом сфери заповнювались дистильованою водою, після чого пристрій встановлювався в холодильну камеру і витримувався там на протязі 1,5 – 2 годин при температурі -15°C . Після замерзання води гранули витримувалися в холодильнику при температурі 4°C до з'явлення рідкої плівки на їх поверхні (на протязі приблизно 12 годин). Такий режим приготування гранул дозволяв отримати прозорий суцільний льод з питомою вагою до $0,85\text{ г/см}^3$ при температурі біля 0°C .

Для розгону льодяних гранул до заданої швидкості використовувалась спеціальна пневматична гармата ежекторного типу. Для нанесення ударних пошкоджень зразок розташовувався на спеціальній підкладці, що являла собою частину реальної панелі обшивки хвостового оперення літака трубчастої конструкції. Таким чином модулювались пружні характеристики реальної обшивки.

Швидкість гранул визначалась безпосередньо біля поверхні зразка за допомогою експериментальної установки, що наведена на рис. 2, яка працює таким чином. Промінь, що виходить із оптичного квантового генератора 1 за допомогою світло-подільної системи 2, 3 розділяється на два паралельних пучка однакової інтенсивності. Система виставляється таким чином, щоб обидва промені перетинали траєкторію руху частинки.

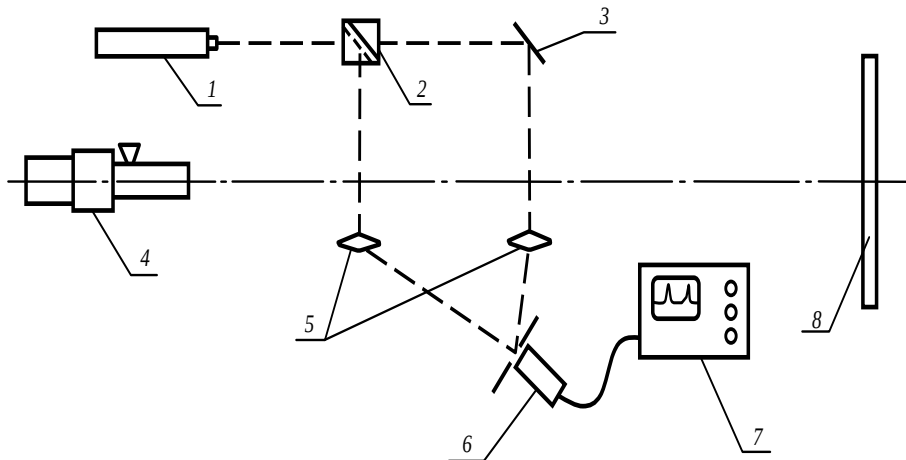


Рис.2 Схема установки для визначення швидкості частинок.

1- оптичний квантовий генератор; 2 – світлоподільник; 3 – поворотне дзеркало; 4 – пневматична гармата; 5 – лінзи; 6 – фотоприймач; 7 – осцилограф; 8 – зразок.

При перетинанні гранулою, що вилітає із гармати 4, лазерних променів формуються світлові імпульси, які за допомогою лінз 5 передаються на фотоприймач 6. По навантаженню фотоприймача формуються імпульси на екрані зв'язаного з ним осцилографа 7. По відстані між цими імпульсами визначається час, за який гранула проходить базову відстань між променями. Далі по відомим часу і відстані визначається швидкість руху, що вважається рівномірним.

Результати досліджень. За цією методикою були нанесені ударні пошкодження від граду на 50 зразках із листового вуглепластика типу КМУ-3Л. Зразки були виготовлені п'яти варіантів схем армування (табл. 1) на основі вуглеленти ЕЛУР-П-0,08 та зв'язуючого ЕДТ-69Н.

Таблиця 1

Схеми армування зразків

Варіант армування	Схема укладки шарів ЕЛУР-П-0,08	Кількість шарів
1.	+45-45+45-46-90+70-70-90+70-70+70-70	12
2.	СВМ-45+45-90-45+45-90-45+45	9
3.	СВМ-60+60-90-60+60-90-60+60	9
4.	СВМ-30+30-90-30+30-90-30+30	9
5.	СВМ-45+45-45+45-90-45+45-90-60+60	11

Примітка: СВМ – скловолоконний матеріал (склотканина)

Викладка зразків проводилась ручним способом з подальшим вакуум-автоклавним формуванням за двома різними режимами. Один з них відповідає технології розробника КМ і надалі характеризується тиском формування 0,25 МПа. Другий, який характеризується тиском 0,15 МПа, є прискореним і застосовується з метою зниження енерговитрат на виробництво КМ.

Після бомбардування місце удару на зразках піддавалося візуальному обстеженню за допомогою мікроскопа МБС-2. При цьому в жодному випадку не виявлено видимих пошкоджень (сколів, тріщин, вм'ятин тощо).

Надалі зразки випробувались до руйнування при зсуві в площині листа, згідно з рекомендаціями стандарту [4], паралельно випробувались аналогічні непошкоджені зразки (у вихідному стані).

Результати порівняльних випробувань 20 партій зразків, із 5 одиниць кожна, наведені в таблиці 2 і на рис. 3.

Таблиця 2

Результати випробування зразків
(стан зразків: А - вихідний, Б - після удару)

Тиск формування	Варіант армування	Стан зразків	Середнє значення границі міцності $\bar{\tau}_e$, МПа	Середнє значення відхилення S , МПа	Коефіцієнт варіації V , %	Зміна міцності, %
1	2	3	4	5	6	7
0,25 МПа	1	А	245,3	26,30	10,72	-9,25
		Б	222,6	31,60	14,20	
	2	А	235,8	15,3	6,49	-3,09
		Б	228,5	29,25	12,80	
	3	А	232,5	10,29	4,43	-2,62
		Б	226,4	26,15	11,55	
	4	А	216,7	18,9	8,72	+8,46
		Б	235,0	14,67	6,24	
	5	А	242,0	23,30	9,63	-7,15
		Б	224,7	16,03	7,14	
0,15 МПа	1	А	200,1	50,93	25,46	+6,85
		Б	213,8	32,91	15,39	
	2	А	228,6	23,52	10,29	+0,48
		Б	229,7	20,37	8,87	
	3	А	194,7	25,77	13,24	+6,93
		Б	208,2	31,16	14,97	
	4	А	195,8	32,04	16,37	+5,46
		Б	206,5	37,22	18,03	
	5	А	237,4	10,10	4,25	-7,41
		Б	219,8	26,36	11,97	

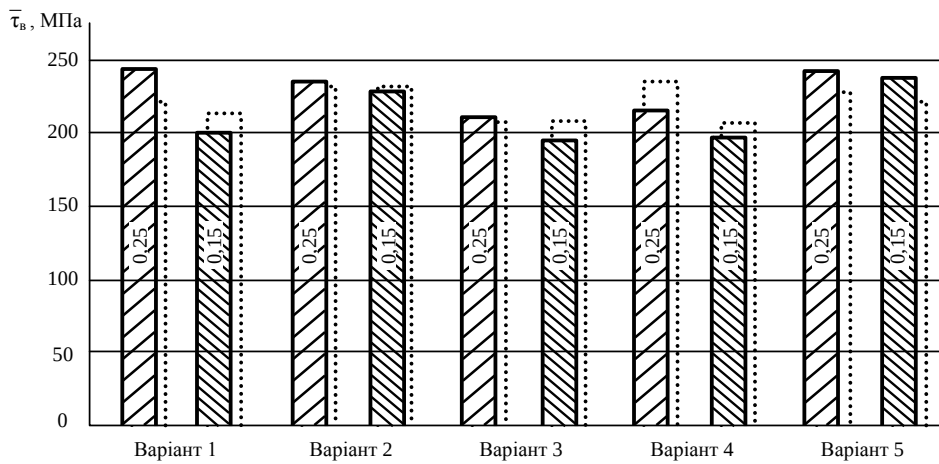


Рис.3 Номограми середніх значень границь міцності для різних схем армування.



– середні значення границь міцності у вихідному стані при тиску формування відповідно 0,25 МПа і 0,15 МПа;



– те саме після удару градом.

Висновки. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що суттєвого зниження міцності за рахунок ударної дії граду, при обраних параметрах, не спостерігається. Деякі зміни границі міцності, очевидно, слід вважати такими, що знаходяться в межах розсіювання. Особливо це стосується випадків “збільшення” міцності, які інакше важко пояснити.

Відзначимо, що збільшення міцності спостерігаються в основному для партій зразків, відформованих при тиску 0,15 МПа, які мають підвищений коефіцієнт варіації. До того ж простежується тенденція: чим більший коефіцієнт варіації – тим більше “збільшення” міцності (похибка експерименту).

Явище підвищеного розсіювання результатів випробувань КМ в порівнянні з металами загальновідоме. При цьому треба збільшувати об’єм випробувань, чого на жаль не завжди можна було зробити через обмежену кількість об’єктів випробувань.

Проведений експеримент модулював, середньостатистичний режим градового потоку і не претендує на повноту дослідження. Зафіксовані параметри реальних градових потоків змінюються в широкому діапазоні [5, 6]. Так, наприклад, тривалість випадання граду змінюється від 10 с до 45 хвилин, діаметр градин досягає 13,8 см, а вага 0,6 кГс, градини можуть мати гострі виступаючі частини і таке інше. Крім того, пошкоджуюча дія граду різко зростає при польоті літального апарату. Все це говорить про небезпечність зустрічі літака з градом і про актуальність досліджень в цьому напрямку.

Список літератури

1. Бороzeneць 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. Бороzeneць 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. Бороzeneць Г.М., Семак І.В. Вплив конструктивно-технологічних факторів на міцність вуглепластиків // Проблеми тертя та зношування. – 2017. № 2 (75). – С. 108-112.
4. ISO 14130 – «Fibre-reinforced plastic composites — Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method».
5. Прокопенко В. Ф. Фізика атмосфери: ЛНУ ім. І. Франка, 2000, 231 с.
6. Davis G.W., Sakata I.E. Design considerations for Composite Fuselage structure of Commercial Transport Aircraft. NASA CR/52296, 1981.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2025.

Семак Інна Вікторівна – старший викладач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 0673573993, E-mail: inna.semak@npp.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9742-3226>.

Бороzeneць Григорій Михайлович – канд. техн. наук, доцент, тел.: +38 068 198 59 05, E-mail: borozenecg@gmail.com.

*I.V. SEMAK, H. M. BOROZENETS***INVESTIGATION OF THE IMPACT OF HAIL STRIKES ON THE STRENGTH OF CARBON COMPOSITES IN AIRCRAFT STRUCTURES**

This paper presents the results of an experimental study on the impact of hail strikes on the residual strength of carbon-fiber composite materials used in aircraft structures, particularly fuselage skins. A special method was developed to form ice pellets and apply damage simulating hail impact when an aircraft is stationary. Samples with various reinforcement schemes were tested under two different molding pressure regimes. The findings show that, in most cases, hail impact does not cause significant reduction in material strength. In some cases, a slight increase in strength was observed, likely due to experimental variability. The study provides valuable insights into the potential damage risks from hail to aircraft structures and highlights the relevance of further research in this field to enhance the reliability and durability of aerospace components.

Key words: aerospace carbon composites, reinforcement schemes, hail impact, residual strength

References

1. Borozenets H.M., Pavlov V.M., Semak I. V. Zastosuvannya kompozytsiinykh materialiv v aviatsiinykh konstruktsiiax 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 konstruktsiinykh vuhleplastykiv. Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Problemy tertia ta znoshuvannia» № 3 (68). 2015 S. 85 – 89.
3. Borozenets H.M., Semak I.V. Vplyv konstruktyvno-tekhnologichnykh faktoriv na mitsnist vuhleplastykiv // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2017. № 2 (75). – S. 108-112.
4. ISO 14130 – «Fibre-reinforced plastic composites — Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method».
5. Prokopenko V. F. Fizyka atmosfery: LNU im. I. Franka, 2000, 231 s.
6. Davis G.W., Sakata I.E. Design considerations for Composite Fuselage structure of Commercial Transport Aircraft. NASA CR/52296, 1981.

Semak Inna Viktorivna – seniorteacher of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: inna.semak@npp.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9742-3226> tel.:+38 067 357 39 93.

Borozenets Hryhorii Mykhailovych – candidate of technical sciences, senior researcher, E-mail: borozenecg@gmail.com,. tel.:+38 068 198 59 05.