

# МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.45.046.5

DOI: 10.31471/1993-9965-2023-1(54)-7-11

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ УКЛАДАННЯ АРМУЮЧОГО МАТЕРІАЛУ СИЛОВИХ ОБОЛОНОК ІЗ ВУГЛЕПЛАСТИКА

Т. А. Манько<sup>1</sup>, О. В. Літот<sup>2\*</sup>, Л. П. Потапович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара;  
49010, м. Дніпро, проспект Гагаріна, 72

<sup>2</sup>Державне підприємство «Конструкторське Бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»;  
49008, Дніпро, вул. Криворізька, 3; e-mail: kb.u.litot@gmail.com

Стаття присвячена питанню дослідження впливу заходності укладки армуючого матеріалу та формуванню структури оболонок із вуглепластику методом мокрого намотування на прикладі тонкостінного циліндру діаметром 100 мм. При проєктуванні деталей з композиту одночасно вирішується завдання з проєктування, створення матеріалу та технології їх виготовлення. Виходячи з цієї особливості композитів, досконалість технології виготовлення є однією з найважливіших особливостей, що визначає склад і механічні параметри усієї конструкції. Таким чином, для отримання виробів, що володіють високим коефіцієнтом вагової ефективності та виконують вимоги, що застосовуються при їх проєктуванні, необхідна розробка та постійне вдосконалення технології виготовлення. Саме тому все частіше застосовуються полімерні композиційні матеріали (ПКМ), і, в першу чергу, вуглепластики при виготовленні силових елементів, термостійких панелей та герметичних оболонок, експлуатація яких потребує високих параметрів питомої міцності, жорсткості, температурної стабільності та герметичності. Наведені вище параметри повинні забезпечуватись впродовж всього часу експлуатації деталі. Велику увагу приділено проблематиці формування якісної структури вуглепластику методом мокрого намотування. В роботі досліджуються заготовки тонкостінних циліндрів діаметром 100 мм, виготовлені із вуглепластику на основі високоміцного вуглецевого волокна і епоксидного сполучного. Досліджено принцип побудови і укладання силової оболонки з раціональним кутом армування. Розглянуто різні параметри заходності укладання армуючого наповнювача при формуванні схеми намотування. За результатами експериментальних досліджень науково обґрунтовано та дано рекомендації щодо вибору технологічних параметрів при формуванні тонкостінних оболонок із вуглепластику, до яких висунуто додаткові вимоги стосовно пружності та жорсткості. Представлено оцінку отриманих результатів та висновки щодо виконаної роботи.

Ключові слова: вуглепластик, технологія виготовлення, тонкостінні оболонки, структури намотування.

The article is devoted to the study of the influence of the reinforcing material laying rate and the formation of the structure of carbon fibre shells by the wet winding method using the example of a thin-walled cylinder with a diameter of 100 mm. The design of composite parts simultaneously solves the problem of designing, creating a material and manufacturing technology. Based on this feature of composites, the perfection of manufacturing technology is one of the most important features that determines the composition and mechanical parameters of the entire structure. Thus, to obtain products that have a high weight efficiency coefficient and meet the requirements used in their design, it is necessary to develop and continuously improve manufacturing technology. That is why polymeric composite materials (PCMs), and primarily carbon fibre plastics, are increasingly widely used in the manufacture of power elements, heat-resistant panels and hermetic shells, the operation of which requires high parameters of specific strength, stiffness, temperature stability and tightness. The above parameters must be ensured

*throughout the entire service life of the part. Much attention is paid to the problem of forming a high-quality carbon fibre structure using the wet winding method. In this work, blanks of thin-walled cylinders with a diameter of 100 mm were made of carbon fibre-reinforced plastic based on high-strength carbon fibre and epoxy binder. The principle of construction and laying of a power shell with a rational reinforcement angle is investigated. Different parameters of the reinforcing filler laying in the formation of the winding scheme are considered. Based on the results of experimental studies, the paper provides scientific substantiation and recommendations for the choice of technological parameters in the formation of thin-walled carbon fibre shells, which have additional requirements for elasticity and stiffness. An assessment of the results obtained and conclusions on the work performed are presented.*

Key words: carbon fiber, manufacturing technology, thin-walled shells, winding structures.

### Вступ

До конструкцій ракетно-космічної техніки висуваються підвищені вимоги щодо міцності та надійності в умовах експлуатації. На даний час максимальне значення питомої міцності, жорсткості, низького коефіцієнта лінійного температурного розширення забезпечують конструкційні вуглепластики на основі вуглецевих високоміцних волокон і епоксидних сполучних. Так, використання вуглепластиків виправдано високими показниками питомої міцності та жорсткості, що дозволяє мінімізувати масу більшості деталей, що мають форму тіл обертання. Вуглепластики широко використовуються при виготовленні паливних баків (у тому числі безлейнерних), судин тиску, лінійних трубопроводів та ін., які призначені для зберігання або транспортування рідин та газів, а стосовно ракетно-космічної та авіаційної техніки – компонентів палива.

Прагнення знизити масу виробу призвело до створення конструкцій оболонкової форми з вуглепластиків. Особлива увага при їх формуванні приділяється питанням герметичності, які у безлейнерних конструкціях забезпечується структурою укладання матеріалу та вибором із спеціальних матриць, стійких до впливу агресивних середовищ та температур. Оцінка герметичності корелює з ефектом тріщиноутворення у процесі навантаження конструкції.

Відповідно до [1], з метою запобігання тріщиноутворенню і втраті герметичності цільнокомпозитної безлейнерної тонкостінної силової оболонки, одержуваної методом намотування, її товщину формують максимально можливою кількістю шарів. При цьому виконують необхідну підготовку армуючого матеріалу або застосовують спеціальне технологічне обладнання [2].

### Постановка задачі

При дослідженні тонкостінної оболонки корпусу діаметром 100 мм виникає необхідність у забезпеченні максимальної жорсткості та міцності за мінімальної маси. Вибір проект-

них інструментів та узгодження з технологією виготовлення вимагає оцінки напружено-деформованого стану окремих ділянок конструкції при реалізації різних схем укладання армуючого матеріалу. Ці фактори та особливості формування багатшарових структур тонкостінних вуглепластикових оболонок методом намотування потребують дослідження принципів їх побудови. Зважаючи на специфіку процесу їх формоутворення, кожен шар формується почерговими спіральними проходами, які виконуються зі зсувом кутової координати для повного перекриття всієї поверхні оболонки. Цей процес формує особливу структуру укладання, встановлену обраною кількістю заходів намотування (західністю), яка визначена траєкторією укладання стрічки в шарі, де  $\alpha$  – вибраний кут укладання (рис. 1) [3].

Особливий інтерес викликає вивчення впливу заходності перехресних структур, отриманих методом намотування, на міцність, жорсткість та герметичність.

### Основна частина

Оціночні експериментальні дослідження перехресних шаруватих структур проводили на заготовках тонкостінних циліндрів діаметром 100 мм та товщиною стінки 1 мм з вуглепластику на основі високоміцного вуглецевого волокна та епоксидного сполучного (рис. 2).

Схема армування зразків товщиною 1 мм включає три подвійні спіральні шари, укладені під кутом 45 градусів. Для оцінки радіальної жорсткості використовували вирізані з технологічного припуску циліндрів зразки з різною західністю намотування. У таблиці 1 представлені технологічні параметри намотування конструкції тонкостінного циліндра. При цьому наведено параметри величини заходності та кількість проходів при намотуванні.

Аналіз впливу заходності проведено для величин, рівних з 1 до 5 і 7. Для прийнятих геометричних параметрів (діаметр – 100 мм, ширина стрічки – 5 мм) заходність укладання, яка дорівнює 6, технологічно нереалізована. На-

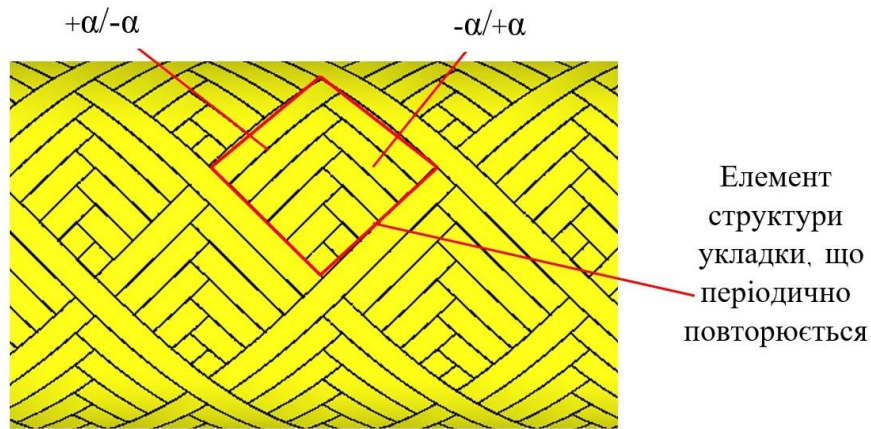


Рисунок 1 – Структура укладки при намотуванні



Рисунок 2 – Тонкостінний циліндр із вуглепластику та зразки, вирізані з технологічного припуску

ведене число проходів показує необхідну кількість подвійних спіральних витків для повного покриття поверхні оболонки намотування (таблиця 1) і значення має відповідати не менше 100. Кут довороту вказує на необхідний поворот поверхні намотування після закінчення проходу укладання його значення рекомендовано зводити до мінімуму. Графічна схема обраних структур намотування, сформована програмним комплексом WindingExpert, зображена на рисунку 3.

У роботі зразки циліндрів отримані методом мокрого намотування на верстаті MAW 20 FB5, укладанням високоміцного вуглецевого волокна, просоченого епоксидним сполучним. Кут намотування для всіх зразків становив 45 градусів. Отриману заготовку додатково опресували термоусаджувальною технологічною стрічкою, відтак полімеризували. Усі конструктивні та технологічні параметри ідентичні, за винятком обраної структури намотування, яка і є метою цього дослідження. З вуглепластикових циліндрів вирізали зразки шириною 30 мм і

Таблиця 1 – Технологічні параметри зразків

Заходність	Кількість проходів	Кут довороту, град	Перекриття,%
1/1	32	124,61	100,84
-2/1	33	35,83	103,99
3/1	32	10,44	100,84
4/1	33	84,92	103,99
5/1	32	54,16	100,84
7/1	32	179,8	100,84

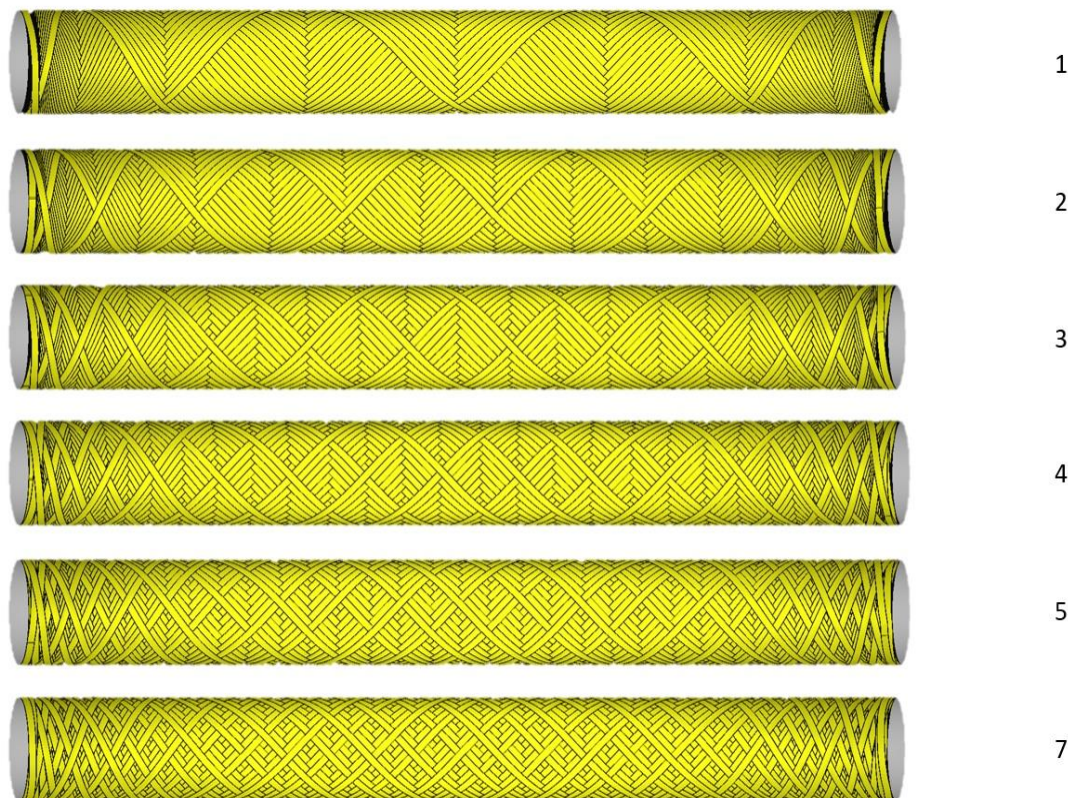


Рисунок 3 – Графічна схема вибраних структур намотування

Таблиця 2 – Геометричні параметри та результати випробування зразків

Заходність	Ширина, мм	Товщина, мм	Вага, гр	Прогин кільця, мм	Руйнівна напруга при триточковому згинанні, МПа
1	30,1	0,854	41,6	19,7	750,47
2	30,05	0,861	42,6	17,6	743,21
3	30,09	0,859	41,8	18,2	785,55
4	30,1	0,867	41,9	16,8	800,39
5	30,08	0,871	41,8	17,2	805,63
7	30,9	0,868	41,8	16,6	845,33

оцінювали деформативності зразка під зусиллям 200 Н. Також визначали руйнівну напругу при триточковому згинанні сектора зразка шириною 40 мм. Геометричні параметри отриманих зразків, а також значення деформативності та руйнівної напруги при триточковому згині представлені в таблиці 2. У таблиці наведені дані, вибрані як середні за 5 зразками для кожної заходності.

В результаті встановлено, що при виборі більш перехресних структур спостерігається зростання жорсткості зразка з 80,3 до 83,4 мм, що пов'язано з формуванням багатозаходної структури, аналогічної з текстильним плетінням, де поверхня із заходністю 7 для обраного зразка відповідає структурі типу твілл 5/5 [4]. Таке укладання дозволило більш ефективно чинити опір деформаціям у шарі, де окремі



стрічки укладені не тільки паралельно одна одній, а й з багаторазовим перекриттям [5]. Це також підтверджує значне зростання напруги, при якій відбувається руйнування матеріалу при триточковому згині з 750,47 до 845,33 МПа.

#### Висновки

1. У роботі розглянуто фактори та особливості формування багатопшарових структур тонкостінних вуглепластикових оболонок методом мокрого намотування.

2. Досліджено принцип побудови та укладання силової оболонки з вуглепластику з раціональним кутом армування для стандартної ширини стрічок та нанесення сполучного.

3. Розглянуто різний параметр західності укладання стрічки для формування схеми намотування.

4. При оцінці фізико-механічних характеристик з різними схемами укладання матеріалу встановлено перевагу структури з високим параметром західності за оцінкою жорсткості та міцності вуглепластика при триточковому вигині, значення якої склало 845,33 МПа, порівняно з простим однозахідним укладанням – 750,47 МПа.

#### Література

1. Гагауз П.М., Гагауз Ф.М., Карпов Я.С., Кривенда С.П. Проектирование и конструирование изделий из композиционных материалов. Теория и практика: учебник под. общ. ред. Я.С. Карпова. Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского, 2015. 672 с.

2. Карпов Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник. Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т; Харьк. авиац. ин-т, 2010. 768 с.

3. Борисевич В. К. Виноградский А. Ф., Карпов Я. С. Самойлов В. Я., Семишов Н. И. Конструкционное материаловедение в 2 кн. Харьков: ХАИ, 2002. 342 с.

4. Дзюба А. П., Сіренко В. М., Клименко Д. В., Левитина Л. Д., Черенков Д. А. Оптимізація композитних оболонок обертання методами теорії оптимальних процесів. *Космічна наука і технологія*. 2020. 26, № 5 (126). С. 28-37.

5. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.

#### References

1. Gagauz P.M., Gagauz F.M., Karpov Ya.S., Krivenda S.P. Proektirovanie i konstruirovanie izdeliyi z kompozitsionnyih materialov. Teoriya i praktika: uchebnik pod. obsch. red. Ya.S. Karpova: Kh.: Nats. aerokosm. un-t im. N.E. Zhukovskogo, 2015. 672 p. [in Russian]

2. Karpov Ya.S. Proektirovanie detaley i agregatov iz kompozitov: uchebnik. Kh.: Nats. aerokosmich. un-t; Khark. aviats. in-t, 2010. 768 p. [in Russian]

3. Borisevich V. K. Vinogradskiy A. F., Karpov Ya. S. Samoylov V. Ya., Semishov N. I. Konstruktsionnoe materialovedenie v 2 kn. Kharkov: KhAI, 2002. 342 p. [in Russian]

4. Dziuba A. P., Sirenko V. M., Klymenko D. V., Levytina L. D., Cherenkov D. A. Optyimizatsiia kompozytnykh obolonok obertannia metodamy teorii optimalnykh protsesiv. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia*. 2020. 26, No 5 (126). P. 28-37. [in Ukrainian]

5. Vasilev V.V. Mehanika konstruktsiy iz kompozitsionnyih materialov. M.: Mashinostroenie, 1988. 272 p. [in Russian]