

УДК 629.7.048.4: 620.22-419

DOI: 10.18372/0370-2197.1(110).20930

К.С. ЧАВА, О. О. МІКОСЯНЧИК

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА МАТЕРІАЛИ КОМПОЗИТНИХ БАЛОНІВ ВИСОКОГО ТИСКУ ДЛЯ АВІАЦІЙНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

Представлено розширений теоретичний аналіз конструктивних типів композитних балонів високого тиску (COPV) та матеріалів, що застосовуються для їх виготовлення в авіаційних і аерокосмічних системах. Розглянуто класифікацію балонів типів 1–5 залежно від співвідношення металевих і композиційних компонентів, проаналізовано їх конструктивні особливості, функціональне призначення та експлуатаційні обмеження. Проведена порівняльна характеристика матеріалів для лейнерів з урахуванням їх густини, міцнісних властивостей, корозійної стійкості та ролі в забезпеченні герметичності конструкції. Проаналізовано армуючі складові для композиційних оболонок балонів: вуглецеве, скло- E-glass, арамідне волокна, а також альтернативні армуючі компоненти (базальтове, льняне та перероблене вуглецеве волокно). Проведено порівняльний аналіз їх фізико-механічних характеристик (густина, межа міцності при розтягу, модуль пружності, видовження при розриві) та визначено їх вплив на масову ефективність, здатність витримувати високий тиск і довговічність балонів. Проаналізовано, що застосування вуглецевого волокна забезпечує максимальну питому міцність і дозволяє знизити масу конструкції до 45–70% порівняно з повністю металевими балонами; скловолокно є економічно доцільним для середніх рівнів тиску. Визначено, що для авіаційних стаціонарних систем найбільш раціональними є балони типів 2 та 3. Тип 2 (металевий лейнер зі скловолоконним обмотуванням) забезпечує зниження маси на 30–40% при збереженні прийнятної вартості, тип 3 (алюмінієвий лейнер з повним вуглецевим обмотуванням) характеризується підвищеною питомою міцністю та здатністю працювати при високих тисках, що робить його оптимальним для відповідальних авіаційних застосувань. Визначено перспективність впровадження безлейнерних конструкцій типу V. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем зберігання газів у сучасній авіаційній техніці.

Ключові слова: композиційні матеріали, міцність, армуючі волокна, лейнер, класифікація балонів, авіаційні системи, конструкція, механічні властивості.

Вступ. Композитні балони високого тиску (Composite Overwrapped Pressure Vessels, COPV) є важливим елементом сучасних авіаційних систем, забезпечуючи значне зниження ваги при збереженні високих показників міцності та надійності. Застосування композиційних матеріалів для підсилення металевих лейнерів дозволяє створювати конструкції, що відповідають жорстким вимогам авіаційної галузі щодо ваги, безпеки та експлуатаційних характеристик [1].

McLaughlan та ін. [2] у публікації NASA визначають COPV як посудину під тиском, що складається з тонкого металевого лейнера, обгорнутого структурним композитним матеріалом на основі волокон. Основною перевагою COPV у порівнянні з повністю металевими балонами є зниження ваги приблизно на 50% при збереженні необхідних характеристик міцності та безпеки. Автори підкреслюють, що COPV широко використовуються в NASA для зберігання рідин

під високим тиском у системах двигунів, наукових експериментах та системах життєзабезпечення.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю зниження маси авіаційного обладнання при збереженні високих показників безпеки та надійності. Розуміння класифікації COPV та властивостей матеріалів є критично важливим для вибору оптимальної конструкції балонів для забезпечення високого рівня їх фізико-механічних показників [3].

Метою роботи є систематизація та аналіз існуючих типів композитних балонів високого тиску, а також порівняльне дослідження характеристик конструкційних матеріалів (лейнерів та армуючих волокон) для визначення найбільш ефективних їх застосувань у сучасних авіаційних системах.

Класифікація композиційних балонів високого тиску. Балони високого тиску поділяються на чотири основні типи залежно від конструкції та співвідношення металевих і композиційних компонентів. Розуміння цієї класифікації є важливим для вибору оптимальної конструкції для конкретного застосування [4].

Однак, з огляду на стрімкий розвиток технологій адитивного виробництва та появу нових методів герметизації композитів, традиційна класифікація розширена – додано тип 5 (безлейнерні композитні балони [4, 5]) (рис. 1).



Рис. 1. Типи композитних балонів високого тиску (COPV) [4].

При виборі надійного резервуара для конкретного застосування важливо врахувати кілька факторів: ціна, вага, можливість витримувати тиск, міцність. Для обґрунтування вибору конструктивних рішень у сучасних системах високого тиску в табл. 1 представлено кожен тип композитних балонів з огляду їхньої матеріаломісткості та функціонального призначення.

Тип 1 представляє повністю металеві балони, виготовлені зі сталі або алюмінію. В роботі [4] зазначено, що такі балони є занадто важкими для використання в авіації, оскільки ПС втрачає значну частину корисного навантаження. Попри це, балони типу 1 залишаються найпростішими у виробництві та найдешевшими варіантами для стаціонарних застосувань.

Тип 2 складається переважно зі сталі або алюмінію з композитним обмотуванням на основі скловолокна. Ця конструкція має тонший металевий лейнер та композитне або волоконне обмотування, що забезпечує підсилення циліндра. Така конструкція дозволяє зменшити навантаження на циліндр у кільцевому напрямку, зробити кільцеві напруження більш рівномірними з осьовими напруженнями, при цьому зменшуючи товщину стінки та вагу балона, підвищуючи структурну ефективність [6].

Таблиця 1

Типи композитних балонів високого тиску та їх характеристики [4]

| Тип | Матеріали | Переваги | Недоліки | Застосування |
|-------|--|--|---|--|
| Тип 1 | Сталь (переважно) або алюміній | Найменш дорогий (виробничі витрати становлять приблизно 5 доларів за літр об'єму). Виробничі навички та обладнання широко доступні на міжнародному рівні. | Низька мобільність; не рекомендовано для використання в якості бортового паливного бака в комерційних транспортних повітряних суднах в зв'язку з зниженням їх вантажопідйомності. | Статичні застосування. Високооб'ємне промислове використання. Застосування в легкових автомобілях. Транспортування стисненого природного газу. Застосування в наземних сховищах. |
| Тип 2 | В основному сталь або алюміній з композитною оболонкою зі скловолокна | Більш ефективна конструкція, на 30-40% легший, порівняно з типом 1. | На 50% дорожчий за тип 1. Схильний до корозії. Ризики при зберіганні палива на ПС. | Аналогічно, що й для типу 1. |
| Тип 3 | Тонкий і легкий алюмінієвий лейнер 6061. Оболонка з полімерного композиційного матеріалу, армованого вуглеволокном | На 30% легший за тип 2. Здатність витримувати більш високий тиск. Збільшена ємність для зберігання. Менша кількість точок з'єднання, що зменшує ризик витоків. | Навички виробництва, технології та матеріали не є загальнодоступними. | Зберігання палива на транспортних засобах. Рекомендовано для суворих кліматичних умов. Транспортування водню та стисненого природного газу. Аерокосмічна та військова галузі. |
| Тип 4 | Полімерний лейнер. Вуглеволокно або вугле-скловолоконний композиційний матеріал | Найлегший COPV на ринку | Менш міцний, менш стійкий до пошкоджень, більш схильний до витоків, порівняно з типом 3. | Портативні лабораторні випробування. Калібрування. Обмежено для військового призначення. |
| Тип 5 | Виготовлено з композитним лейнером | Зменшення ваги на 90%, на 10% більше корисного об'єму порівняно з традиційними ємностями | Висока вартість, складність виробництва, висока імовірність витоків. | Використовуються переважно в аерокосмічній галузі. |

Головна конструктивна перевага балонів типу 2 полягає в поєднанні товстостінного металевого лейнера та композитної обмотки, яка наноситься лише на циліндричну частину балона, що дозволяє ефективно розподіляти навантаження та підвищувати робочий тиск до 200-250 бар. Завдяки металевій основі такі балони забезпечують абсолютну герметичність і відсутність дифузії газу, що робить їх надійними для тривалого зберігання газів. Для балонів цього типу характерні тривалий термін експлуатації до 20 років та висока стійкість до механічних пошкоджень у важких умовах роботи.

Тип 3 характеризується металевим лейнером, з суцільною оболонкою з полімерного композиційного матеріалу на основі вуглецевого волокна. Регаса та Лему [7] досліджували оптимізацію конструкції COPV типу 3 з алюмінієвим лейнером товщиною 4 мм та оболонкою з вуглецевим волокном/епоксидною смолою. Використовуючи скінченно-елементне моделювання в ABAQUS, автори оцінили вплив послідовності ламінатів, товщини та кута намотування волокон на максимальну здатність витримувати тиск розриву.

Тип 4 використовує неметалевий (полімерний, переважно поліетилен високої щільності або HDPE) лейнер, обмотаний композиційними матеріалами, що призводить до значного зниження ваги та підвищення ємності зберігання. Згідно з [8], балони типу 4 широко використовуються в середовищах високого тиску. Висока потреба даного типу балонів є аерокосмічному, автомобільному та промислового секторах.

На відміну від балонів типу 4, які мають полімерний лейнер, конструкція типу 5 передбачає повну відсутність окремого внутрішнього шару. Це дозволяє досягти максимального показника масової ефективності, що є вирішальним фактором для авіаційних та космічних систем, де кожен кілограм збереженої ваги суттєво підвищує корисне навантаження апарата. Впровадження типу 5 у наукові задачі, інженерну та виробничу практику дозволить більш точно диференціювати надлегкі конструкції, що перебувають на межі матеріалознавчих можливостей сучасності [9].

Балони типу 5 вважаються сучасним технологічним еталоном в індустрії балонів високого тиску завдяки можливості суттєвого зниження маси. Як зазначено в роботі [10], безлейнерні композитні балони забезпечують найкращу ефективність балонів серед усіх типів композитних конструкцій: відсутність лейнера усуває проблему різного теплового розширення матеріалів, безлейнерні конструкції мають найвищий коефіцієнт відношення робочого тиску та об'єму до ваги, вага виробу зменшується на 15–20% порівняно з типом 4.

Аналіз матеріалів для виготовлення лейнерів композитних балонів. Вибір матеріалу лейнера є визначальним для забезпечення герметичності та структурної цілісності балона [11]. Матеріали, які використовуються для виготовлення лейнерів представлено на рис. 2.



Рис.2. Матеріали для лейнерів композитних балонів [11].

Алюміній 6061 є одним з найбільш поширених матеріалів для лейнерів балонів типу 3. Матеріал використовується в товщині, достатній для того, щоб виконувати функції хімічного бар'єру, перешкоджаючи витоку речовин, та як оправки для намотування. Алюміній 6061 має густину 2700 кг/м³, що забезпечує його високу питому міцність [9].

Нержавіюча сталь використовується переважно для балонів типів 1 та 2. Вона характеризується високою технологічністю, легкістю зварювання та обробки. Проте, при густині близько 8000 кг/м³ нержавіюча сталь приблизно втричі важча за алюміній [12].

Перспективним напрямком для виготовлення лейнерів є застосування титану. Балони з титановим лейнером мають вищу стійкість до корозії та хороші характеристики малоциклової втоми [9].

Полімерні матеріали використовуються в балонах типу 4. Найбільш поширеним матеріалом є поліетилен високої щільності (HDPE), оскільки він забезпечує оптимальний баланс між низькою вагою, хімічною інертністю та високою стійкістю до ударних навантажень. У конструкції такого балона HDPE-лейнер виконує роль герметичного бар'єра, що запобігає дифузії газу, тоді як основне механічне навантаження сприймає зовнішня оболонка з полімерного вуглецевого композиційного матеріалу.

Композиційні матеріали для обмотування балонів. Композитне обмотування є конструктивно важливим структурним елементом COPV [13]. Композиційні матеріали широко застосовуються в авіаційній, космічній та автомобільній промисловості, де важливою складовою є зниження ваги при збереженні високої міцності (табл. 2). Завдяки комбінації армуючих волокон (скло-, вугле- та арамідне волокна) та матриці вдається забезпечити високу питому міцність, яка значно перевищує показники традиційних металів, таких як сталь чи алюміній.

Таблиця 2

Основні міцнісні характеристики намотувальних матеріалів [14]

| Марка матеріалу | Густина, г/см ³ | Міцність на розтяг, ГПа | Модуль пружності, ГПа | Видовження при розриві, % |
|------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Скло та базальт | | | | |
| Скловолокно E-glass | 2.54 – 2.6 | 3.4-3,5 | 72-73 | 2,2 -2,5 |
| Базальтоволокно | 2.6 – 2.75 | 2,8-3,2 | 80 – 95 | 2,85-3,15 |
| Арамідне волокно | | | | |
| Kevlar 49 | 1.44 | 3.6 | 124 | 2.4 |
| Twaron (Teijin) | 1.44 – 1.45 | 2.8 – 3.6 | 60 – 145 | 2.2 – 4.5 |
| Вуглецеве волокно | | | | |
| Torayca T700S | 1.80 | 4.9 | 230 | 2.1 |
| Torayca T800H | 1.81 | 5.49 | 294 | 1.9 |
| Метал (для порівняння) | | | | |
| Сталь конструкційна | 7.85 | 0.4 – 0.55 | 200-210 | 15 – 25 |

Згідно з технічною документацією виробника Toray [15], вуглецеве волокно T700S має густину 1,80 г/см³, міцність на розтяг 4,9 ГПа та модуль пружності 230 ГПа. Більш сучасне волокно T800H характеризується вищим модулем пружності

294 ГПа при міцності 5,49 ГПа та густині 1,81 г/см³. Таким чином, питома міцність вуглеволокон типу T700S та T800H становить 2722 та 3033 кН·м/кг відповідно, що більш ніж в 10 разів перевищує аналогічний параметр для неіржавної сталі (254 кН·м/кг). Це робить вуглецеве волокно оптимальним вибором для авіаційних застосувань, де критичним є зниження ваги при збереженні високої міцності.

У дослідженні Regassa та Lemu [7] було проведено оптимізацію конструкції композитного балона високого тиску типу 3 з алюмінієвим лейнером AL6061 товщиною 4 мм та з оболонкою з композиційного матеріалу на основі вуглецевого волокна T800S з епоксидною смолою TCRUF 3325-95. Використовуючи скінченно-елементне моделювання в ABAQUS, автори дослідили вплив послідовності укладання шарів, товщини та кута намотування волокон на максимальну здатність балона витримувати тиск розриву. Було створено 14 різних моделей COPV з багатошаровими оболонками вуглецеве волокно/епоксидна смола постійної товщини 6,5 мм та різними кутами орієнтації волокон. Оптимальна конструкція з восьми шарів композиту при орієнтації волокон [55°, -55°]_s у схемі намотування PP (polar-polar) забезпечила максимальний тиск розриву 24,495 МПа за методом скінченно-елементного аналізу.

Скловолокно E-glass має густину 2,54-2,60 г/см³, міцність на розтяг 3,4-3,5 ГПа та модуль пружності 72-73 ГПа [18-19]. Видовження при розриві становить приблизно 2,2-2,5%, що є вищим показником, порівняно з вуглецевим волокном (2,1% для T700S). Це надає скловолкну кращу здатність до поглинання енергії при ударних навантаженнях. E-glass залишається найбільш поширеним армуючим волокном у виробництві композиційних матеріалів завдяки оптимальному співвідношенню вартості та механічних характеристик.

Скловолокно E-glass використовується переважно в балонах типу 2 завдяки поєднанню прийнятних механічних властивостей та економічної ефективності. Хоча скловолокно має нижчі механічні властивості порівняно з вуглецевим волокном, воно ефективно застосовується у гібридних конструкціях посудин для зберігання газу, для яких висувуються нижчі вимоги до тиску. На основі чисельного моделювання та порівняння різних армуючих волокон показано [22], що гібридні балони з E-glass/T700S оптимальні з економічної точки зору при робочому тиску ≈ 700 бар, а балони, армовані лише E-glass, є економічно доцільними для тиску ≈ 350 бар, хоча вони характеризуються нижчою міцністю порівняно з повністю вуглецевими структурами. В роботі [22] на основі оцінки фізико-механічних показників COPV із різними армуючими волокнами запропоновано оптимальні співвідношення компонентів в гібридних композиційних матеріалах з точки зору механічних властивостей та економічності, зокрема для E-glass/T700S та чистого E-glass при відповідних тисках.

У табл. 3 систематизовано дані щодо зниження ваги балонів різних типів залежно від комбінації матеріалів лейнера та армувального композитного шару.

Згідно з технічною документацією [20], арамідне волокно Kevlar 49 має густину 1,44 г/см³, міцність на розтяг 3,6 ГПа та модуль пружності 124 ГПа при видовженні при розриві 2,4%. Арамідне волокно Twaron виробництва Teijin характеризується аналогічною густиною 1,44-1,45 г/см³, міцністю 2,8-3,6 ГПа та модулем пружності 60-145 ГПа залежно від конкретної марки [21].

Таблиця 3

Порівняльний аналіз ефективності різних типів композитних балонів[24-25]

| Тип балона | Матеріал лейнера | Армуючий компонент в композиційній оболонці | Зниження ваги порівняно з типом 1 |
|------------|------------------|--|-----------------------------------|
| Тип 1 | Сталь/Алюміній | Відсутня | Базова (0%) |
| Тип 2 | Сталь/Алюміній | Скловолокно | 30–40% |
| Тип 3 | Алюміній 6061 | Вуглецеве волокно | 45–55% |
| Тип 4 | HDPE (полімер) | Вуглецеве волокно/ Гібридний вугле-скло- волоконний композит | 60–70% |
| Тип 5 | Відсутній | Вуглецеве волокно | До 75% |

Важливими недоліками арамідних волокон є їх чутливість до ультрафіолетового випромінювання та вологості, що обмежує їх застосування в певних умовах експлуатації. Проте арамідні волокна зберігають достатньо високі механічні властивості, характеризуються низькою густиною та високою стійкістю до ударних навантажень.

Арамідні волокна, зокрема пара-арамідний Kevlar, широко використовувалися в конструкції COPV, зокрема в космічній програмі Space Shuttle від NASA для зберігання стиснених газів (гелію та азоту). Ці COPV були виготовлені з металевого лайнера, обмотаного ровінгом Kevlar49/Ероху, що забезпечувало значну економію маси порівняно з традиційними металевими балонами. В подальшому, з розвитком технологій одержання високоміцних вуглеволокон, в конструкції COPV частіше застосовували вуглецеві волокна, які мають кращі механічні властивості[26-27].

Сучасні наукові розробки в галузі матеріалознавства сфокусовані на впровадженні альтернативних армуючих наповнювачів, зокрема лляних, базальтових та рецикльованих вуглецевих волокон, з метою оптимізації екологічності та економічної доцільності впровадження інноваційних композиційних матеріалів без критичної втрати їхніх механічних характеристик. У сучасній науковій літературі [28-30] в якості перспективних армуючих компонентів активно досліджуються природні лляні (flax) волокна, які можуть застосовуватися як самостійно, так і в комбінації з рецикльованим вуглецевим волокном у складі гібридних композитів. Використання таких гібридних матеріалів сприяє мінімізації виробничих витрат та зниженню антропогенного навантаження на довкілля, забезпечуючи при цьому достатній рівень механічних характеристик для цільових інженерних конструкцій. Крім того, базальтові волокна (отримані з природної базальтової породи) розглядаються як екологічно прийнятний та стійкий армуючий матеріал для полімерних композитів із хорошими механічними та термічними властивостями, що робить їх перспективними для легких конструкцій. Також ведуться дослідження щодо використання переробленого вуглецевого волокна у композиційних матеріалах, що дозволяє зменшити відходи та розвинути нові технології виробництва високопродуктивних адитивних матеріалів [31,32].

Базальтове волокно виготовляється шляхом плавлення базальтових порід вулканічного походження та формування волокон з розплаву. За даними порівняльних досліджень механічних властивостей армувальних волокон (табл. 1), базальтове волокно характеризується густиною 2,63–3,05 г/см³, міцністю на розтяг 3,0–4,84 ГПа, модулем пружності 79,3–110 ГПа та видовженням при

розриві 3,1–3,2 %. У порівнянні зі скловолокном E-glass, базальтове волокно характеризується вищим або співставним рівнем міцності та вищим модулем пружності, що свідчить про його більшу жорсткість. Крім того, базальтові волокна мають значно вищу максимальну робочу температуру (до 650 °C) порівняно з E-glass (близько 380 °C), що розширює можливості їх застосування в умовах підвищених температур. Сукупність цих характеристик, разом із природним неорганічним походженням матеріалу, обумовлює його стійкість до агресивних середовищ і робить перспективним армувальним компонентом для композиційних конструкцій різного призначення [33, 34].

Використання природних волокон, таких як льон, розглядається як перспективний напрямок для створення більш екологічних композитних конструкцій. Лляні волокна характеризуються відносно низькою густиною (близько 1,4–1,5 г/см³), достатньою питомою міцністю та жорсткістю, що робить їх перспективними для використання в легких конструкціях із підвищеними вимогами до зниження маси. Крім того, льон є відновлюваною сировиною з нижчим вуглецевим слідом порівняно з синтетичними волокнами, такими як скло- або вуглеволокна. Водночас важливим при виробництві та експлуатації конструкцій з природних волокон залишається контроль їх стійкості до вологи та оцінка міжфазної взаємодії волокно–матриця, що активно досліджується в сучасних роботах [35].

Таким чином, використання альтернативних армуючих наповнювачів є перспективним напрямком для створення екологічних та економічно ефективних композиційних матеріалів, але вимагає подальших досліджень для забезпечення їх надійних експлуатаційних характеристик.

Висновки

1. Визначено, що для авіаційних стаціонарних систем найбільш ефективними є балони типів 2 та 3. Тип 2 оптимальний для модернізації існуючих систем завдяки економічності та зниженню маси на 30–40%, тоді як тип 3 забезпечує більшу питому міцність та здатність витримувати високий тиск, при зменшенні маси конструкції на 45–55%. Конструкція балонів тип 3 забезпечує максимальну ефективність для мобільних, авіаційних та високонавантажених систем.

2. Проаналізовано, що оптимальним матеріалом лейнера для типу 3 є алюміній 6061 (густина 2,7 г/см³), для типу 2 – сталь (густина 8,0 г/см³), що забезпечує баланс між міцністю, вагою та вартістю.

3. Обґрунтовано, що для оболонки з композиційного матеріалу в якості армуючого компонента найкращим вибором є вуглецеве волокно T700S та T800H (міцність 4,9–5,49 ГПа, модуль пружності 230–294 ГПа, густина 1,80–1,81 г/см³). Скловолокно E-glass залишається економічно вигідним для тиску до 350 бар, а гібридні конструкції E-glass/T700S – для тиску до 700 бар.

4. Альтернативні волокна (базальтове, льон) перспективні з точки зору екологічності та зниження вартості, але поступаються вуглецевому волокну за механічними характеристиками.

Список літератури

1. Yu B., Ma T., Zhang Y. et al. Composite over-wrapped pressure vessel technology for spacecraft propulsion systems. *Journal of Manufacturing Science and Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 3, Is. 1. P. 53–67. <https://doi.org/10.61784/msme3020>
2. McLaughlan P. B., Forth S. C., Grimes-Ledesma L. R. *Composite Overwrapped Pressure Vessels, A Primer*. NASA/SP-2011-573. Houston: NASA Johnson Space Center, 2011. P. 1–3.

3. Guidelines for Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPVs) Used in Space Systems. Aerospace Report No. TR-2003(8504)-1. The Aerospace Corporation, 2003. 156 p.
4. Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPV) Ultimate Guide. Advanced Structural Technologies, 2022. URL: <https://astforgetech.com/composite-overwrapped-pressure-vessels-copv-ultimate-guide/> (дата звернення: 04.02.2026).
5. ISO 11119-3:2020 Gas cylinders – Design, construction and testing of refillable composite gas cylinders and tubes – Part 3: Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders and tubes up to 450 l with non-load-sharing metallic or non-metallic liners or without liners, 2020.
6. Composite Pressure Vessel Resources. Infinite Composites, 2024. URL: <https://www.infinitecomposites.com/composite-pressure-vessel-resources>
7. Regassa Y., Lemu H. G. Composite Overwrapped Pressure Vessel Design Optimization Using Numerical Method. *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6, No. 8. P. 229. <https://doi.org/10.3390/jcs6080229>
8. Eko A. J., Epaarachchi J., Jewewantha J., Zeng X. A review of type IV composite overwrapped pressure vessels // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 109. P. 551–573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.108>
9. Vasiliev V. V., Morozov E. V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. 4th Edition. Elsevier, 2018. P. 453–460, 518 p.
10. Jones B. H., Li M.-C. Liner-less tanks for space application – design and manufacturing considerations. Brea, CA: Kaiser Compositek Inc., [n.d.]. 1 p.
11. Rafiee R., Torabi M. A. Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels. *Composite Structures*. 2018. Vol. 185. P. 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.068>
12. Leung P. S., Ku A. Y. Materials for High-Pressure Hydrogen Storage. In: *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage* / Ed. M. Hirscher. Wiley-VCH, 2012. P. 135–158.
13. Kim J.-W. et al. Structural CNT Composites Part II: Assessment of CNT Yarns as Reinforcement for COPV. NASA Langley Research Center, 2016.
14. Engineering, Mechanical and Dynamic Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete. *Materials*. 2023. Vol. 16. 623. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>
15. Torayca™ Technical Manual. Toray Composite Materials America, Inc., 2020. 8 p. URL: https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/Torayca-Technical-Manual_4-28-2020.pdf (дата звернення: 06.02.2026).
16. ASM Handbook. Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International, 1990.
17. EN 10025. Hot rolled products of structural steels. European Standard.
18. Saint-Gobain Vetrotex. E, R and D glass properties. Technical Data Sheet. 2002. URL: https://glassproperties.com/glasses/E_R_and_D_glass_properties.pdf (дата звернення: 06.02.2026).
19. Wallenberger F. T., Bingham P. A. *Fiberglass and Glass Technology*. Springer, 2010.
20. Kevlar® Aramid Fiber. Technical Guide. DuPont Performance Solutions. URL: https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar_Technical_Guide_0319.pdf (дата звернення: 06.02.2026).
21. Teijin Aramid. Twaron® Technical Data. URL: <https://www.teijinaramid.com/en/products/twaron> (дата звернення: 06.02.2026).
22. Bouvier et al. Modeling and simulation of a composite high-pressure vessel made of sustainable and renewable alternative fibers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.088>
23. NASA. Technical Report 20100036778. 2010. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100036778>
24. Kis D. I., Kókai E. A review on the factors of liner collapse in type IV hydrogen storage vessels. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 50, Part A. P. 236–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.316>

25. Petkoska A. T., Samakoski B., Samardjioska Azmanoska B., Velkovska V. Towpreg— An Advanced Composite Material with a Potential for Pressurized Hydrogen Storage Vessels. *Journal of Composites Science*. 2024. Vol. 8, Is. 9. P. 374. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs8090374>
26. Sutter J. K., Jensen B. J., Gates T. S., Morgan R. J., Thesken J. C., Phoenix S. L. Material Issues in Space Shuttle Composite Overwrapped Pressure Vessels. NASA Technical Report for 9th Conference on Aging Aircraft. Atlanta, GA, USA: NASA, 2006. 13 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20060020264/downloads/20060020264.pdf> (дата звернення: 15.02.2026).
27. Kezirian M. T. Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPV): Developing Flight Rationale for the Space Shuttle Program. NASA Technical Report JSC-CN-21876. Houston, TX, USA: NASA, 2010. 74 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20100036778/downloads/20100036778.pdf> (дата звернення: 15.02.2026).
28. S. Huntley, T. Rendall, M. Longana, T. Pozegic, K. Potter, I. Hamerton. SPH Simulation for Short Fibre Recycling Using Water Jet Alignment. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 2021. 35:1-2. P. 129-142. <https://doi.org/10.1080/20550340.2018.1456504>
29. Biswas W., Dong, C. Eco-Efficiency Performance for Multi-Objective Optimal Design of Carbon/Glass/Flax Fibre-Reinforced Hybrid Composites. *Sustainability*. 2024. 16(7), 2928. <https://doi.org/10.3390/su16072928>
30. Tran H. T. T., Baur J., Radjef R., et.al. Next-Generation Sustainable Composites with Flax Fibre and Biobased Vitrimer Epoxy Polymer Matrix. *Polymers*. 2025. 17(14), 1891. <https://doi.org/10.3390/polym17141891>
31. Longana M. L. et al. Reclaimed Carbon and Flax Fibre Composites: Manufacturing and Mechanical Properties. *Recycling*. 2018. 3(4). 52. <https://doi.org/10.3390/recycling3040052>
32. Tang Y. Sustainable biobased composites: From raw materials to applications. *Composites Part B*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113188>
33. Processing and Mechanical Properties of Basalt Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites. *Polymers*. 2022. 14(6). 1220. <https://doi.org/10.3390/polym14061220>
34. Liu J., Chen M., Yang J., Wu Z. Study on Mechanical Properties of Basalt Fibers Superior to E-glass Fibers. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2020. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764438>
35. Faruk O., Bledzki A. K., Fink H.-P., Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*. 2012. 37(11). P. 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Отримано: 16 лютого 2026

Прийнято: 19 березня 2026

Опубліковано: 9 квітня 2026

Чава Катерина Сергіївна – аспірантка за спеціальністю G9 «Прикладна механіка» кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058,, Email: ekaterinaserheevna@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9181-8008>

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

K. CHAVA, O. MIKOSIANCHYK

CLASSIFICATION AND MATERIALS OF HIGH-PRESSURE COMPOSITE CYLINDERS FOR AVIATION APPLICATIONS

This paper presents an extensive systematic analysis of high-pressure composite overwrapped pressure vessels (COPVs) and the materials used in their fabrication for aviation and aerospace systems. The classification of cylinders of types 1–5 is considered based on the ratio of metallic to composite components, and their structural features, functional purpose, and operational limitations are analyzed. Liner materials are examined with regard to their density, mechanical properties, corrosion resistance, and role in ensuring the hermeticity of the vessel. Special attention is given to reinforcing composite materials—carbon fiber, E-glass fiber, aramid fibers—as well as alternative materials (basalt, flax, and recycled carbon fibers). A comparative analysis of their physical and mechanical properties (density, tensile strength, elastic modulus, elongation at break) is conducted, and their influence on mass efficiency, high-pressure performance, and vessel durability is evaluated. It is shown that the use of carbon fiber provides maximum specific strength and allows the structure's mass to be reduced by 45–70% compared to fully metallic cylinders, whereas glass fiber is economically advantageous for medium-pressure levels. Based on the synthesis of research results, it is determined that for stationary aviation systems, types II and III cylinders are the most rational. Type 2 (metal liner with glass-fiber overwrap) reduces mass by 30–40% while maintaining acceptable cost, whereas type 3 (aluminum liner with full carbon-fiber overwrap) exhibits higher specific strength and the ability to operate at high pressures, making it optimal for critical aviation applications. The potential development of linerless type V constructions is also highlighted as a promising direction for future high-performance solutions. The results of this study can be applied in the design and modernization of gas storage systems in modern aviation technology.

Keywords: composite materials, strength, reinforcing fibers, liner, cylinder classification, aviation systems, design, mechanical properties.

References

1. Yu B., Ma T., Zhang Y. et al. Composite over-wrapped pressure vessel technology for spacecraft propulsion systems. *Journal of Manufacturing Science and Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 3, Is. 1. P. 53-67. <https://doi.org/10.61784/msme3020>
2. McLaughlan P. B., Forth S. C., Grimes-Ledesma L. R. Composite Overwrapped Pressure Vessels, A Primer. NASA/SP-2011-573. Houston: NASA Johnson Space Center, 2011. P. 1-3.
3. Guidelines for Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPVs) Used in Space Systems. Aerospace Report No. TR-2003(8504)-1. The Aerospace Corporation, 2003. 156 p.
4. Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPV) Ultimate Guide. Advanced Structural Technologies, 2022. URL: <https://astforgetech.com/composite-overwrapped-pressure-vessels-copv-ultimate-guide/> (дата звернення: 04.02.2026).
5. ISO 11119-3:2020 Gas cylinders – Design, construction and testing of refillable composite gas cylinders and tubes – Part 3: Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders and tubes up to 450 l with non-load-sharing metallic or non-metallic liners or without liners, 2020.
6. Composite Pressure Vessel Resources. Infinite Composites, 2024. URL: <https://www.infinitecomposites.com/composite-pressure-vessel-resources>
7. Regassa Y., Lemu H. G. Composite Overwrapped Pressure Vessel Design Optimization Using Numerical Method. *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6, No. 8. P. 229. <https://doi.org/10.3390/jcs6080229>
8. Eko A. J., Epaarachchi J., Jewewantha J., Zeng X. A review of type IV composite overwrapped pressure vessels // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 109. P. 551–573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.108>
9. Vasiliev V. V., Morozov E. V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. 4th Edition. Elsevier, 2018. P. 453-460, 518 p.

10. Jones B. H., Li M.-C. Liner-less tanks for space application – design and manufacturing considerations. Brea, CA: Kaiser Composites Inc., [n.d.]. 1 p.
11. Rafiee R., Torabi M. A. Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels. *Composite Structures*. 2018. Vol. 185. P. 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.068>
12. Leung P. S., Ku A. Y. Materials for High-Pressure Hydrogen Storage. In: Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage / Ed. M. Hirscher. Wiley-VCH, 2012. P. 135–158.
13. Kim J.-W. et al. Structural CNT Composites Part II: Assessment of CNT Yarns as Reinforcement for COPV. NASA Langley Research Center, 2016.
14. Engineering, Mechanical and Dynamic Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete. *Materials*. 2023. Vol. 16. 623. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>
15. Torayca™ Technical Manual. Toray Composite Materials America, Inc., 2020. 8 p. URL: https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/Torayca-Technical-Manual_4-28-2020.pdf (дата звернення: 06.02.2026).
16. ASM Handbook. Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International, 1990.
17. EN 10025. Hot rolled products of structural steels. European Standard.
18. Saint-Gobain Vetrotex. E, R and D glass properties. Technical Data Sheet. 2002. URL: https://glassproperties.com/glasses/E_R_and_D_glass_properties.pdf (дата звернення: 06.02.2026).
19. Wallenberger F. T., Bingham P. A. Fiberglass and Glass Technology. Springer, 2010.
20. Kevlar® Aramid Fiber. Technical Guide. DuPont Performance Solutions. URL: https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar_Technical_Guide_0319.pdf (дата звернення: 06.02.2026).
21. Teijin Aramid. Twaron® Technical Data. URL: <https://www.teijinaramid.com/en/products/twaron> (дата звернення: 06.02.2026).
22. Bouvier et al. Modeling and simulation of a composite high-pressure vessel made of sustainable and renewable alternative fibers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.088>
23. NASA. Technical Report 20100036778. 2010. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100036778>
24. Kis D. I., Kókai E. A review on the factors of liner collapse in type IV hydrogen storage vessels. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 50, Part A. P. 236–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.316>
25. Petkoska A. T., Samakoski B., Samardjioska Azmanoska B., Velkovska V. Towpreg—An Advanced Composite Material with a Potential for Pressurized Hydrogen Storage Vessels. *Journal of Composites Science*. 2024. Vol. 8, Is. 9. P. 374. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs8090374>
26. Sutter J. K., Jensen B. J., Gates T. S., Morgan R. J., Thesken J. C., Phoenix S. L. Material Issues in Space Shuttle Composite Overwrapped Pressure Vessels. NASA Technical Report for 9th Conference on Aging Aircraft. Atlanta, GA, USA: NASA, 2006. 13 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20060020264/downloads/20060020264.pdf> (дата звернення: 15.02.2026).
27. Kezirian M. T. Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPV): Developing Flight Rationale for the Space Shuttle Program. NASA Technical Report JSC-CN-21876. Houston, TX, USA: NASA, 2010. 74 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20100036778/downloads/20100036778.pdf> (дата звернення: 15.02.2026).
28. S. Huntley, T. Rendall, M. Longana, T. Pozegic, K. Potter, I. Hamerton. SPH Simulation for Short Fibre Recycling Using Water Jet Alignment. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 2021. 35:1-2. P. 129-142. <https://doi.org/10.1080/20550340.2018.1456504>

29. Biswas W., Dong, C. Eco-Efficiency Performance for Multi-Objective Optimal Design of Carbon/Glass/Flax Fibre-Reinforced Hybrid Composites. *Sustainability*. 2024. 16(7), 2928. <https://doi.org/10.3390/su16072928>

30. Tran H. T. T., Baur J., Radjef R., et.al. Next-Generation Sustainable Composites with Flax Fibre and Biobased Vitrimers Epoxy Polymer Matrix. *Polymers*. 2025. 17(14), 1891. <https://doi.org/10.3390/polym17141891>

31. Longana M. L. et al. Reclaimed Carbon and Flax Fibre Composites: Manufacturing and Mechanical Properties. *Recycling*. 2018. 3(4). 52. <https://doi.org/10.3390/recycling3040052>

32. Tang Y. Sustainable biobased composites: From raw materials to applications. *Composites Part B*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113188>

33. Processing and Mechanical Properties of Basalt Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites. *Polymers*. 2022. 14(6). 1220. <https://doi.org/10.3390/polym14061220>

34. Liu J., Chen M., Yang J., Wu Z. Study on Mechanical Properties of Basalt Fibers Superior to E-glass Fibers. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2020. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764438>

35. Faruk O., Bledzki A. K., Fink H.-P., Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*. 2012. 37(11). P. 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Kateryna Chava – PhD student in the specialty G9 “Applied Mechanics” at the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Lyubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, Email: ekaterinaserheevna@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9181-8008>

Oksana Mikosianchyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University “Kyiv Aviation Institute” 1 Lyubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, Tel.: +38 044 406 77 70, Email: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>