

**КОМПОЗИТНІ КОНСТРУКЦІЇ В АВІАЦІЙНІЙ
ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНІЙ ТЕХНІЦІ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

**КОМПОЗИТНІ КОНСТРУКЦІЇ В АВІАЦІЙНІЙ
ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНІЙ ТЕХНІЦІ**

Навчальний посібник до практичних робіт

Харків «ХАІ» 2025

УДК 629.7.02(076)
К63

Колектив авторів:

Ф. М. Гагауз, С. П. Кривенда, О. О. Вамболь,
І. М. Тараненко, В. М. Павленко

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. А. В. Гнатов,
д-р техн. наук, проф. В. В. Драгобецький

Композитні конструкції в авіаційній та ракетно-космічній техніці
К63 [Текст] : навч. посіб. до практ. робіт / Ф. М. Гагауз, С. П. Кривенда,
О. О. Вамболь, І. М. Тараненко, В. М. Павленко. – Харків : Нац. аеро-
косм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2025. – 152 с.

ISBN 978-966-662-950-3

Викладено теоретичний матеріал і рекомендації щодо самостійної підготовки й виконання практичних робіт, що охоплюють обсяг матеріалу згідно з програмою курсів «Композитні конструкції в авіаційній та ракетно-космічній техніці», «Проектування композитних конструкцій ракетно-космічної техніки» та дисциплін Мајор «Інженерія композитних конструкцій авіаційної та ракетно-космічної техніки». Описано процедури оцінювання властивостей окремих компонентів композиційних матеріалів і несної здатності деталей та агрегатів з композитів у різних випадках навантаження.

Для здобувачів вищої освіти механічних факультетів.

Іл. 74. Табл. 52. Бібліогр.: 6 назв

УДК 629.7.02(076)

ISBN 978-966-662-950-3

© Колектив авторів, 2025
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2025

ВСТУП

Композиційні матеріали (КМ) широко застосовуються в машинобудуванні, особливо в авіа- і ракетобудуванні, і, на одностайне переконання провідних наукових центрів світу, є основною альтернативою металевим сплавам на шляху підвищення ефективності технічних об'єктів. Розвиток будь-якої галузі народного господарства, особливо машинобудування, багато в чому визначається успіхами матеріалознавців, а поява нових, більш досконалих матеріалів сприяє створенню сучасних технічних об'єктів.

Результат проектування будь-якої конструкції із КМ залежить від умінь інженера знаходити розумний баланс між досить оригінальними властивостями цих матеріалів. Змінення типу армувального й матричного матеріалів та їх об'ємного вмісту, кутів армування шарів і послідовності їх укладання дає змогу в широких межах керувати фізико-механічними властивостями композитів. Це основна й найважливіша перевага КМ. Можливість змінення пружних властивостей варіюванням структурних параметрів є важливим фактором під час визначення напруженого стану конструкції, оскільки розподіл внутрішніх зусиль прямо залежить від модулів пружності. Отже, крім керування властивостями матеріалу можна керувати й напружено-деформованим станом конструкції.

Ще однією фундаментальною особливістю КМ є те, що матеріал створюється одночасно з конструкцією і всі його властивості формуються і стабілізуються під час виготовлення деталі, тому вибір розрахункових схем і моделей здійснюється з урахуванням типових або можливих технологічних процесів.

У навчальному посібнику, який розроблено для здобувачів освіти, які вивчають дисципліни, пов'язані з необхідністю узагальненого проектування конструкцій з композитів, розглянуто основні процедури перевірки параметрів початкових компонентів майбутнього композита – волокон (або шарів з них) і матриць (сполучного). Наступним кроком під час проектування є оцінювання потенційних механічних властивостей композита, що буде виготовлятися з вибраних армувальних матеріалів і сполучного. А потім вже можна проектувати в першому наближенні найбільш поширені агрегати літаків, вертольотів, кораблів, будівельних конструкцій, спортивного інвентаря та інших об'єктів. Матеріал видання спрямований на проектування типових елементів аерокосмічних конструкцій – балок, панелей, стержнів, конструкцій типу «сендвіч», з'єднань таких конструкцій за допомогою механічних елементів, а також на оцінювання пружних і міцнісних властивостей шаруватих композитів при різних типах навантажень.

Матеріали розроблених робіт можуть бути використані здобувачами вищої освіти під час виконання кваліфікаційних робіт.

Практична робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АРМУВАННЯ СИМЕТРИЧНОГО КОМПОЗИТА НА МОДУЛЬ ЙОГО ПРУЖНОСТІ

Мета роботи:

1. Засвоєння методики визначення модуля пружності пакета симетричного композита.
2. Визначення залежності модуля пружності композита від кута його армування.

Теоретичні відомості

Існують різні означення композита, наприклад таке: композиційний матеріал (КМ), або композит, – гетерофазний матеріал, окремі фази якого виконують специфічні функції, забезпечуючи йому властивості, яких не має жодний з компонентів окремо. Однак подібне означення дає лише часткове й дуже загальне уявлення про композит. Більш детальне означення можна дати, перелічивши сукупність ознак, які мають композити. Отже, *композиційними матеріалами, або композитами*, називають матеріали, що мають такі ознаки:

– наявність у складі матеріалу двох і більше компонентів, розмежованих поверхнею розділу, що істотно різняться за складом, геометричною формою, властивостями (рис. 1.1);

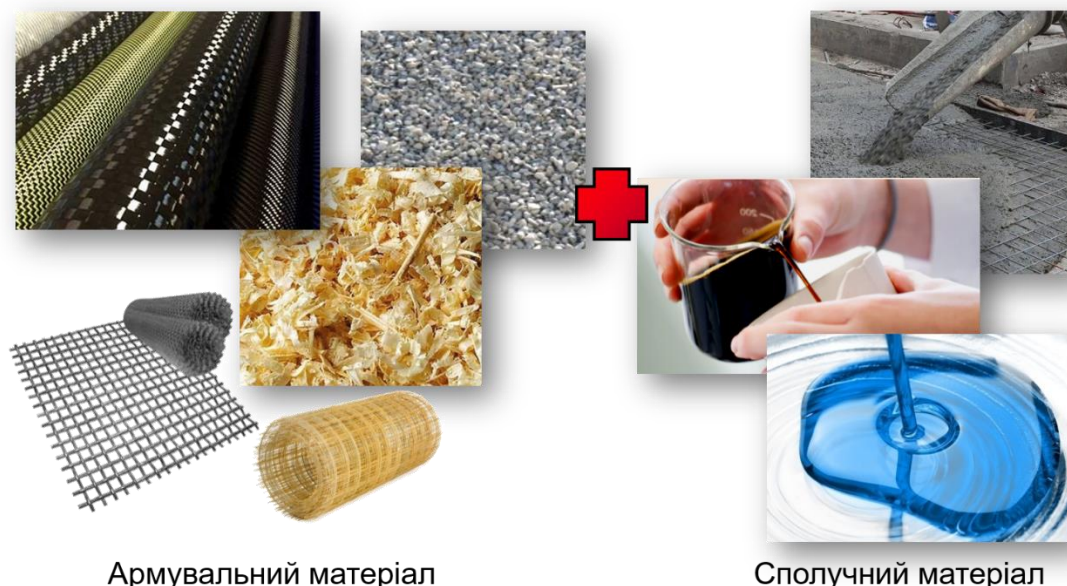


Рис. 1.1. Компоненти композитів

– наявність таких властивостей КМ, яких не мають його компоненти, узяті окремо;

- істотний вплив на властивості КМ кожного з його компонентів; властивості КМ залежать не тільки від того, які компоненти входять до його складу, але й від їх кількості;
- наперед відомі або запрограмовані властивості; склад, форму й розподіл компонентів регламентовано розробником;
- реалізація принципу спільності деформації – компоненти КМ працюють спільно (рис. 1.2);

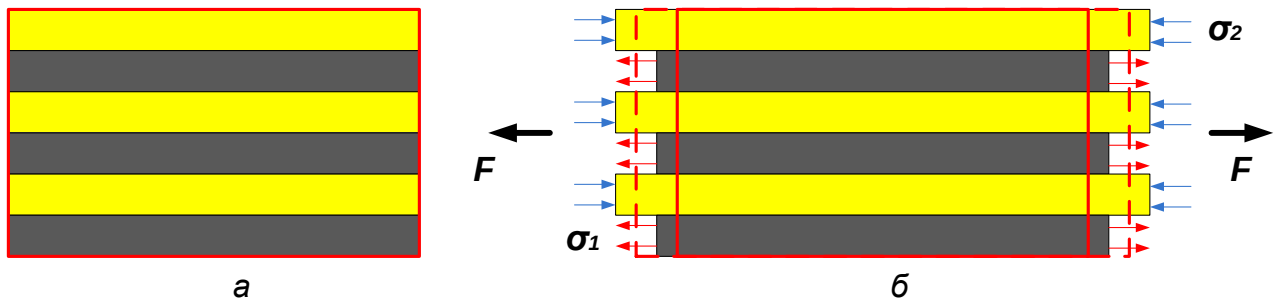


Рис. 1.2. Принцип спільності деформації КМ:
а – ненавантажений стан; б – навантажений стан

- одночасне утворення матеріалу й конструкції; неможливо відокремити матеріал від конструкції;
- однорідність складу й структури в макромасштабі (ця ознака дає змогу виключити із класу КМ біметали, деталі з покриттями, стільникові вироби тощо, які є скоріше конструкціями, ніж матеріалами) (рис. 1.3).

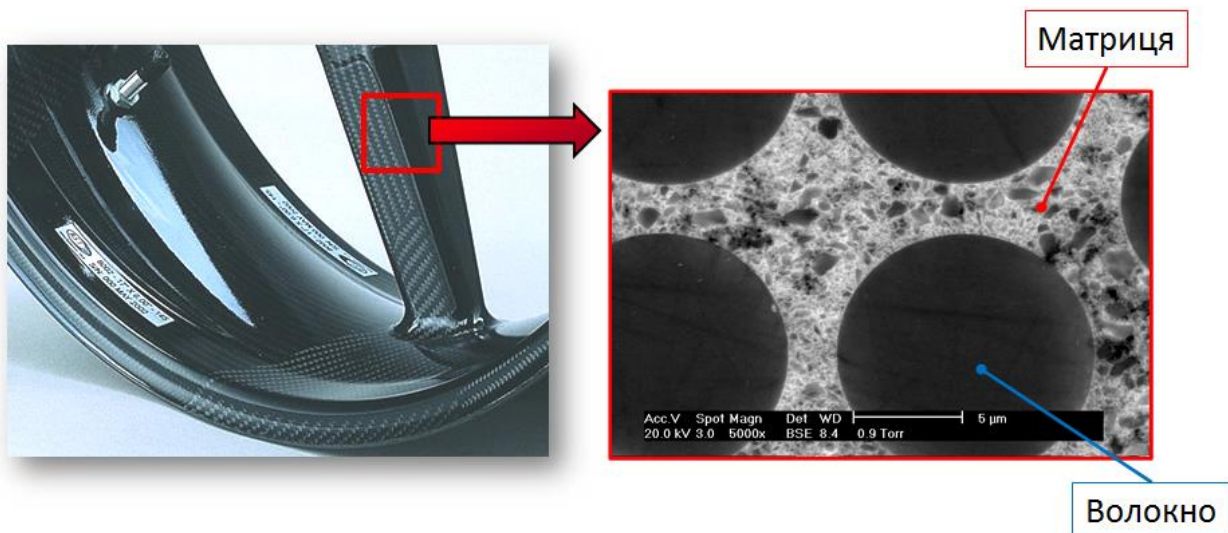


Рис. 1.3. Однорідність і неоднорідність композитів

Зазвичай складовими компонентами композитів є армувальний і матричний матеріали, між якими існують певні щільні зв'язки.

До структурних параметрів на рівні моношару односпрямованого КМ належать об'ємний уміст волокон і матриці, а також характер розташування

волокон у матриці. Односпрямовані КМ застосовуються вкрай рідко. Майже всі наявні композитні конструкції складаються з шаруватого КМ. У цьому випадку під структурою КМ розуміють кількість шарів, їх товщину та кути армування, а також послідовність укладання шарів по товщині пакета. Тим не менш, односпрямовані КМ належать до вихідних матеріалів, із них формується необхідна структура КМ виробу, а їх фізико-механічні характеристики є складовою паспорту або стандарту на композит.

Максимально реалізувати властивості КМ можна шляхом орієнтації його волокон уздовж лінії дії напружень у КМ. Так, максимальний модуль пружності буде збігатися з кутом армування 0° , якщо такий самий кут будуть мати лінії дії напружень (рис. 1.4). Це зрозуміло, адже саме волокна головним чином сприймають навантаження – забезпечують міцність. Водночас для наведеного прикладу найменший модуль пружності буде збігатися з кутом армування 90° . У цьому випадку сприймати навантаження буде матриця, яка зазвичай має набагато нижчі фізико-механічні характеристики.

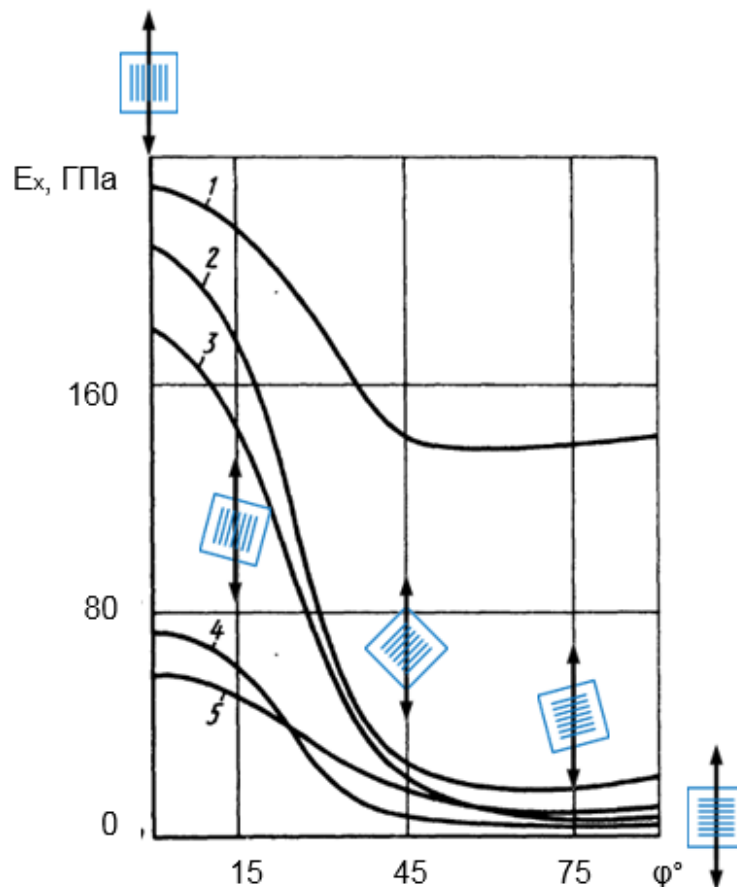


Рис. 1.4. Залежність модуля пружності від кута армування:
1 – бороалюміній; 2 – боропластик; 3 – вуглепластик;
4 – органопластик; 5 – склопластик

У випадку з модулем зсуву залежність принципово змінюється. Максимальний модуль зсуву відповідає схемі армування $\pm 45^\circ$. Водночас мінімальне значення для модуля зсуву відповідає кутам 0° та 90° (рис. 1.5).

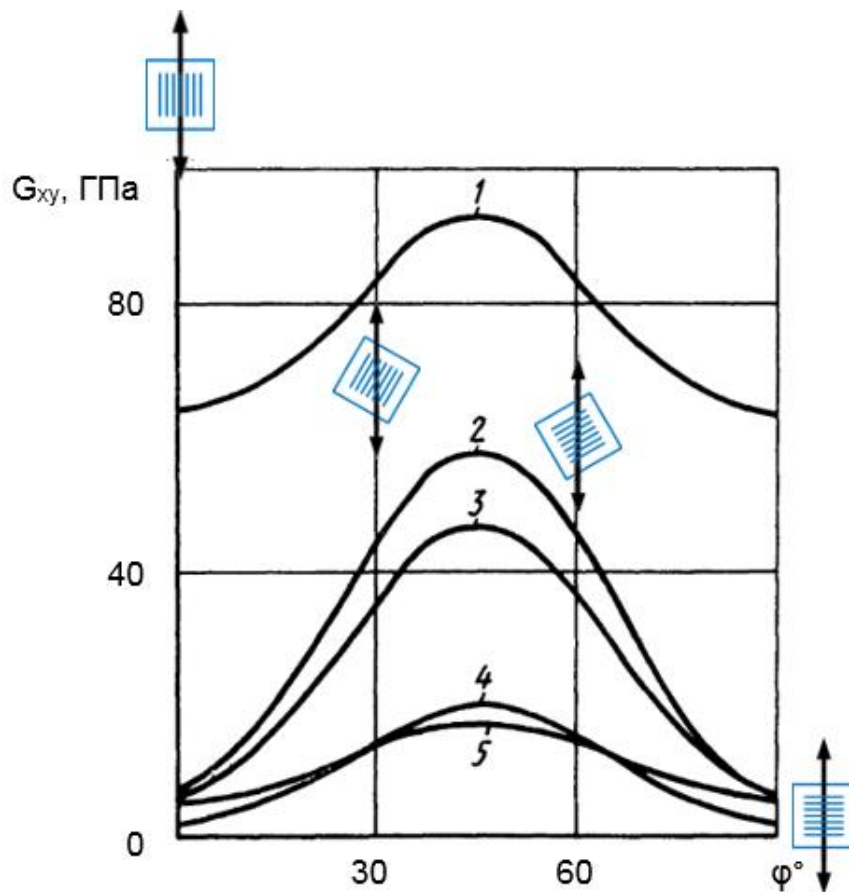


Рис. 1.5. Залежність модуля зсуву від кута армування:
1 – бороалюміній; 2 – боропластик; 3 – вуглепластик;
4 – органопластик; 5 – склопластик

Руйнування композитів для вказаних кутів армування зазвичай відбувається внаслідок руйнування матричного матеріалу (рис. 1.6).

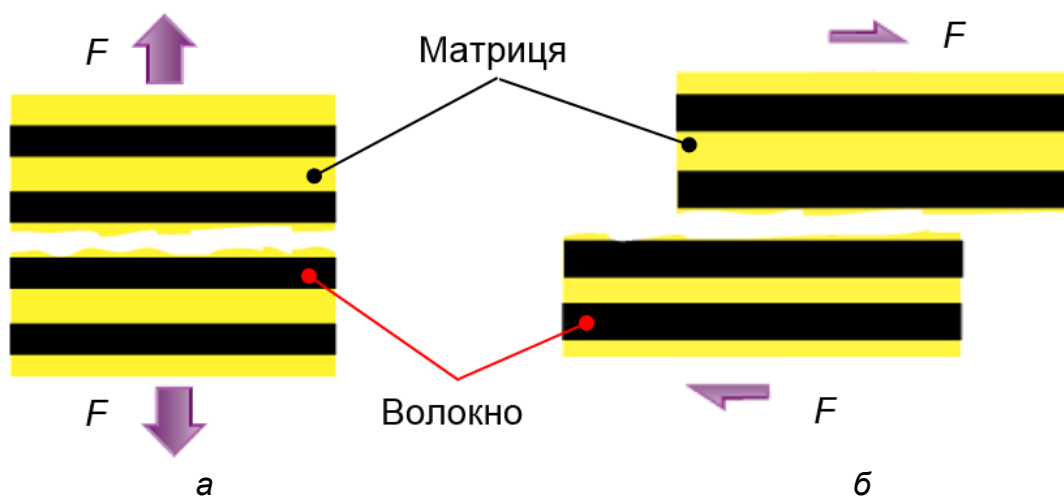


Рис. 1.6. Характер руйнування композита:
а – розтяг поперек волокон; б – зсув

Таким чином, структуру КМ задають на етапі проектування і зазвичай адаптують до певних схем навантаження і вимог конструкції. Використовуючи комбінації різної орієнтації волокон, можна отримати квазіізотропні матеріали. Визначити пружні параметри КМ можна як теоретично, адже існує достатня кількість моделей, що дають змогу це реалізувати, так і експериментально.

Матеріали й обладнання

Досліджуваним матеріалом є перехресно армований композит, виготовлений з односпрямованого вуглепластику КМУ-4Е (вуглецева стрічка ЛУП-0,08 і смола ЕНФБ). Метод формування – вакуум-автоклавний протягом 6 год під тиском 0,5 МПа при температурі 175 °С.

Схему установки для випробування показано на рис. 1.7.

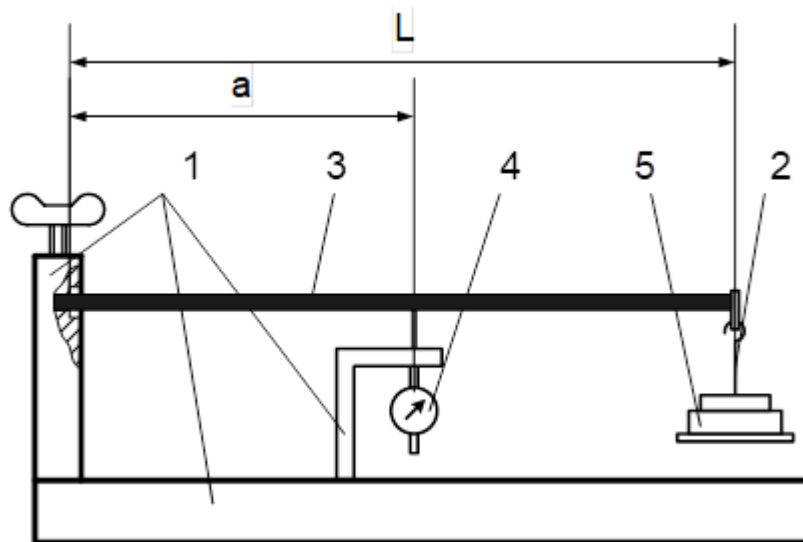


Рис. 1.7. Схема установки для випробування:
1 – рама; 2 – пристрій для навантаження; 3 – зразок;
4 – датчик переміщення; 5 – гирі

Поперечний переріз зразка – прямокутний (рис. 1.8).

Метод експериментальних випробувань ґрунтується на залежності прогинання консольної балки від її жорсткості при згині, тобто від модуля пружності шаруватого композита.

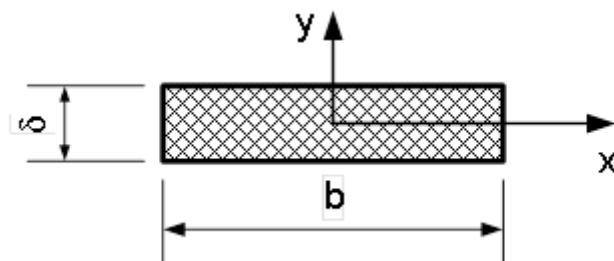


Рис. 1.8. Поперечний переріз зразка

Порядок виконання роботи

1. Визначити геометричні характеристики поперечного перерізу зразка:

- виміряти товщину δ і ширину зразка b (див. рис. 1.8) у п'яти різних поперечних перерізах по довжині;
- провести статистичне оброблення виміряних значень і знайти *середнє значення* для δ , b :

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i ; \quad \delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i ; \quad (1.1)$$

- обчислити момент інерції зразків відносно осі x (див. рис. 1.8):

$$J_x = \frac{b\delta^3}{12} . \quad (1.2)$$

2. Результати занести до табл. 1.1.

3. Розмістити зразок 1 в установці.

4. Установити пристрій для навантаження на зразок.

5. Виміряти відстань a від опори до осі приладу для вимірювання переміщень ($a = 275$ мм) і до лінії прикладання навантаження L ($L = 365$ мм) (див. рис. 1.7).

6. Відрегулювати нульову поділку на приладі для вимірювання переміщення.

7. Урахувати, що навантаження зразка $Q_1 = \Delta Q$, а ΔQ є відомим для кожного зразка.

8. Занести до табл. 1.2 показання індикатора вимірювача переміщення V_1 .

9. Повторити пункти 7 та 8 для навантажень $Q_2 = 2\Delta Q$, $Q_3 = 3\Delta Q$, $Q_4 = 4\Delta Q$ та $Q_5 = 5\Delta Q$.

10. Результати вимірювання занести до табл. 1.2.

11. Повторити пункти 3–10 для зразків 2–5.

12. Розрахувати модулі пружності для кожного зразка на кожній стадії навантаження за формулою

$$E_{zi} = \frac{Q_i}{V_i J_x} k , \quad (1.3)$$

де $k = \frac{a^2}{2} \left(L - \frac{a}{3} \right)$, $k = 10335417$ мм³.

13. Знайти середнє значення E_z , ГПа:

$$E_{ze} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{zi} . \quad (1.4)$$

Таблиця 1.1

Параметри досліджуваних зразків

Параметр	Номер зразка					
	1	2	3	4	5	6
Послідовність укладання	[0]	[±15]	[±30]	[±45]	[±60]	[±75]
δ_1 , мм						
δ_2 , мм						
δ_3 , мм						
δ_4 , мм						
δ_5 , мм						
b_1 , мм						
b_2 , мм						
b_3 , мм						
b_4 , мм						
b_5 , мм						
δ , мм						
b , мм						
J_x , мм ⁴						

14. Результати розрахунків пунктів 12–13 занести до табл. 1.2.

15. Побудувати графіки залежності $\nu = f(Q)$ для зразків 1–5.

16. Знайти теоретичні значення модуля пружності для перехресно армованого композита зі схемою укладання [±15], [±30], [±60], [±75] і [90] за експериментальними значеннями E_z для зразків 1 (схема укладання [0], E_{z0}) і 4 (схема укладання [±45], E_{z45}):

$$E_{z90} = \frac{1}{4} \left[3E_{z45} - 2E_{z0} + \sqrt{(3E_{z45} - 2E_{z0})^2 + 8E_{z0}E_{z45}} \right], \quad (1.5)$$

$$E_{z\text{теор}} = E_{z90} \frac{A(\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi) + 1}{A \sin^4 \varphi + 1}, \quad (1.6)$$

де $A = \frac{E_{z0} - E_{z90}}{E_{z90}}$.

17. Побудувати графіки залежності $E_z = f(\varphi)$ (наприклад, як зображено на рис. 1.4). Теоретичні значення показати плавною кривою, експериментальні – маркерами (точками, хрестиками тощо).

18. Зробити загальний висновок.

Таблиця 1.2

Результати вимірювання прогину зразка

Етап навантаження	Параметр	Номер зразка					
		1	2	3	4	5	6
		[0]	[±15]	[±30]	[±45]	[±60]	[±75]
1	Q_1 , Н						
	v_1 , мм						
	E_{z1} , ГПа						
2	Q_2 , Н						
	v_2 , мм						
	E_{z2} , ГПа						
3	Q_3 , Н						
	v_3 , мм						
	E_{z3} , ГПа						
4	Q_4 , Н						
	v_4 , мм						
	E_{z4} , ГПа						
5	Q_5 , Н						
	v_5 , мм						
	E_{z5} , ГПа						
E_{ze} , ГПа							

 E_{z0} E_{z45} $E_{z90} = \text{_____ ГПа}$

Контрольні запитання

1. Як можна дослідити анізотропію композитів?
2. Наведіть означення модуля пружності.
3. Чому необхідно вимірювати ширину й товщину зразка в кількох різних поперечних перерізах?
4. Як точність вимірювання товщини й ширини зразка впливає на визначення модуля пружності?
5. Як прогин композитної балки залежить від рівня навантаження?
6. Чим пояснюється великий модуль пружності для зразка зі схемою армування [0] порівняно з величиною, обчисленою теоретично для зразка з армуванням [90]?

Практична робота № 2

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОЛОКНИСТИХ АРМУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИТІВ

Мета роботи:

1. Ознайомлення з методикою визначення фізико-механічних характеристик волокнистих армувальних матеріалів і процедурою вхідного контролю армувальних матеріалів.
2. Засвоєння складу КМ, умов сумісності компонентів композита й класифікації композитів.
3. Вивчення видів волокон й армувальних матеріалів.

Теоретичні відомості

Композиційними матеріалами, або композитами, називають матеріали, що мають такі ознаки:

- наявність у складі матеріалу двох і більше компонентів, розмежованих поверхнею розділу, що істотно різняться за складом, геометричною формою, властивостями;
- наперед відомо або запрограмовано сполучення компонентів та їх розподіл;
- істотний вплив на властивості КМ кожного з його компонентів;
- наявність таких властивостей КМ, яких не мають його компоненти, узяті окремо;
- однорідність складу й структури в макромасштабі (ця ознака дає змогу виключити із класу КМ біметали, деталі з покриттями, стільникові вироби тощо, що є скоріше конструкціями, ніж матеріалами).

Основними компонентами КМ є *матричні й армувальні матеріали*. Матричні матеріали виконують функції сполучної речовини: з'єднують між собою окремі армувальні матеріали, перерозподіляють зусилля між ними й фіксують форму виробу. Армувальні матеріали надають КМ необхідних механічних властивостей.

Армувальні матеріали повинні мати високі міцність і жорсткість, малу густину, стабільність властивостей у широкому температурному інтервалі, бути, якщо можливо, хімічно стійкими й сумісними з матричними матеріалами.

Як армувальні матеріали можуть використовуватися:

- безперервні волокна (кручені й некручені нитки, джгути, ровінги, ровниця тощо);
- короткі волокна, штапельні нитки тощо;
- тканини різного переплетення (полотняного, ситцевого, сатинового, саржевого, трикотажного тощо), стрічки та ін.;

– неткані матеріали типу матів.

Компоненти КМ мають відповідати таким умовам сумісності:

- хороша взаємна адгезія;
- взаємна нерозчинність у всьому інтервалі температур (під час виробництва й експлуатації);
- відсутність хімічної взаємодії у всьому інтервалі температур;
- однаковість коефіцієнтів термічного розширення;
- жорсткість матричного матеріалу має бути нижчою за жорсткість армувальних матеріалів.

Переваги композиційних матеріалів:

1. Високі показники щодо конструктивної міцності (питома міцність і жорсткість, зносостійкість, корозійна стійкість, в'язкість руйнування, енергія поглинання при поширенні тріщини, питома ударна в'язкість, надійність і живучість при знакозмінних навантаженнях).

2. Радіопрозорість деяких КМ.

3. Стійкість до агресивних середовищ.

4. Немагнітність і високі діелектричні властивості деяких КМ.

5. Раціональний розподіл матеріалу в конструкції деталей, вузлів та агрегатів, можливість створення рівномірних в усіх перерізах деталей, оскільки остаточно властивості матеріалу формуються в процесі виробництва елементів конструкції.

6. Можливість виробництва великогабаритних елементів конструкцій, завдяки чому зменшуються кількість механічних з'єднань і, отже, маса вузлів та агрегатів.

Недоліки композиційних матеріалів:

1. Низькі фізико-механічні властивості в неголовних напрямках, особливо міжшарова міцність.

2. Низькі твердість і контактна міцність.

3. Схильність до старіння (змінення властивостей у процесі експлуатації, зазвичай, у бік погіршення).

4. Повзучість і плинність матеріалу, що спостерігається при тривалому впливі значних навантажень.

5. Труднощі перероблення й утилізації відходів деталей, що вийшли з ладу, вузлів та агрегатів із КМ.

Класифікація композиційних матеріалів

Композиційні матеріали можна класифікувати за такими ознаками: за матеріалом компонентів, за типом арматури та її орієнтацією, за способом одержання композицій і виробів з них, за призначенням.

Залежно від матеріалу матриці (матеріалознавчий принцип) КМ поділяють на такі групи:

1) композиції з металевою матрицею – металеві КМ (МКМ);

2) композиції з полімерною матрицею – полімерні композиційні матеріали (ПКМ);

3) композиції з керамічною матрицею – керамічні композиційні матеріали (ККМ);

4) композиції з вуглецевою матрицею – вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ).

Полімерні КМ зазвичай розрізняють *за видом армувальних волокон*. Наприклад, ПКМ, армовані скляними волокнами, називають склопластиками, металевими – металопластиками, органічними – органопластиками, борними – боропластиками, вуглецевими – вуглепластиками, азбестовими – азбопластиками і т. д.

Що стосується МКМ, то ще немає чітко визначених правил щодо їх найменування. Найчастіше на початку назви пишуть матричний матеріал, потім армувальний матеріал, наприклад: мідь-вольфрам.

За орієнтацією й типом арматури (конструкційний принцип) усі КМ можна поділити на три групи: ізотропні, ортотропні й анізотропні.

Ізотропними називають матеріали, що мають однакові властивості в усіх напрямках (дисперсійно-зміцнені й хаотично-армовані матеріали). Зміцнення здійснюється відрізками волокон або ниткоподібними кристалами (вусами). При цьому КМ виходять квазіізотропними, тобто анізотропними в мікрооб'ємах, але ізотропними в об'ємі всього виробу. Такі КМ з огляду на геометрію відносять до КМ із нуль-вимірним армувальним компонентом (усі розміри армувального компонента набагато менші від розмірів елементарного об'єму КМ).

Ортотропними називають матеріали, що мають три площини симетрії, відносно яких властивості КМ є практично однаковими.

Анізотропними називають матеріали, властивості яких залежать від напрямку.

Армувальні матеріали можуть бути односпрямованими, сітчастими, шаруватими, тривимірними або сітчастими з поперечним прошиванням, тому з огляду на геометрію КМ можна поділити на дві групи:

– КМ із одновимірним армувальним компонентом, один розмір якого є порівняним з розмірами елементарного об'єму КМ (КМ, армовані волокнами);

– КМ із двовимірним армувальним компонентом, два розміри якого є порівняними з розмірами елементарного об'єму КМ (шаруваті КМ, КМ, армовані тканинами й фольгою).

Якщо КМ містить декілька армувальних компонентів, різних за розмірами або природою, то їх називають поліармованими.

За способом одержання (технологічний принцип) полімерні КМ можна поділити на ливарні, пресовані й намотувальні. Металеві КМ за цим способом поділяють на ливарні й деформівні (спікання, гаряче пресування, дифузійне зварювання, плазмове напилювання на волокна або дроти матричного матеріалу з подальшим пресуванням або спіканням тощо).

За призначенням (експлуатаційний принцип) КМ можна поділити на такі:

- загальноконструкційного призначення (несні конструкції літаків, ракет, авіадвигунів, суден і т. д.);
- жароміцні (для лопаток турбін, камер згоряння та інших виробів);
- термостійкі (для виробів, що експлуатуються в умовах різких теплозмін, наприклад, для облицювання каналів МГД-генераторів);
- фрикційні й антифрикційні;
- удароміцні (броня літаків, танків);
- теплозахисні;
- зі спеціальними властивостями (електричними, магнітними, оптичними тощо).

Класифікація армувальних матеріалів

Волокна, що використовуються як арматура, повинні мати такі властивості: високу температуру плавлення, малу густину, високі міцність і жорсткість у всьому інтервалі робочих температур, технологічність, мінімальну розчинність у матриці, високу хімічну стійкість, відсутність фазових перетворень у зоні робочих температур, нетоксичність під час виготовлення й експлуатації, сумісність волокон з матеріалом матриці.

Для армування зазвичай застосовують такі види волокон: металеві волокна й дроти, неорганічні полікристалічні, скляні, органічні, короткі волокна у вигляді монокристалів або мінеральних волокон.

Волокнисті армувальні елементи – зазвичай це безперервні кручені й некручені нитки, джгути (ровинги), стрічки, тканини різного переплетення, металеві волокна й дроти, а також порошки (монокристали), штапельні тканини, мати та ін. Форма армувальних елементів залежить від природи волокон, способів їх вироблення й подальшої текстильної переробки, а також від технологічних процесів виробництва деталей з композиційних матеріалів.

Скляні волокна. При достатньо малій густині $((2,4...2,6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3)$ скляні волокна мають високу міцність, низьку теплопровідність, стійкість до хімічного й біологічного впливу. Цим пояснюється широке застосування скловолокон, ровингів, тканин та інших матеріалів на основі скловолокон для створення деталей та елементів конструкцій зі склопластиків.

Найбільш широко застосовується безлужне алюмоборосилікатне Е-скло (до його складу входять оксиди SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O та деякі інші компоненти).

Безперервні волокна одержують витягуванням розплавленої скломаси через фільтри діаметром 0,8...3,0 мм з подальшим швидким витягуванням їх до діаметра 3...19 мкм.

Штапельне волокно одержують шляхом витягування безперервного скловолокон з подальшим розриванням його на відрізки певної довжини.

Кварцове волокно зазвичай одержують витягуванням стержнів, оскільки кварц навіть при температурі 2400 К має дуже високу в'язкість, що утруднює його формування з розплаву.

Поверхню скляних волокон покривають замаслювачем, що запобігає пошкодженню волокон під час різного роду ткацького перероблення й адсорбуванню на волокнах вологи з навколишнього середовища. Існує два види замаслювачів: пасивні й активні (гідрофобно-адгезійні). Пасивні замаслювачі (наприклад, парафінова емульсія або замаслювачі на основі крохмалю) застосовуються тільки на стадії ткацького перероблення волокна. Перед нанесенням сполучного на армувальний матеріал ці замаслювачі видаляють шляхом термічного або хімічного оброблення.

Після видалення замаслювачів на поверхню волокон часто наносять апрети – речовини, що сприяють створенню міцного зв'язку на межі «волокно – матриця». Як апрети застосовують зазвичай кремнійорганічні й металоорганічні сполуки. Найперспективнішими є активні замаслювачі, що запобігають руйнуванню поверхні волокна, підвищують адгезію між скловолокном і полімерною матрицею й поліпшують переробку волокон.

Скловолокна мають високі термостійкість і жароміцність. При підвищенні температури модуль пружності кварцового волокна збільшується від 74 ГПа при 300 К (27 °С) до 83 ГПа при 1200 К (900 °С). Міцність безлужного алюмосилікатного скла починає знижуватися при 600 К (327 °С), натрій-кальційсилікатних, борних, свинцевих й фосфатних – при 400...500 К (150...250 °С), а модуль пружності зменшується незначно аж до температури розм'якшення.

Скловолокна застосовуються в композитах у вигляді джгутів і ниток з елементарних волокон, стрічок, тканин різноманітного переплетення, матів, полотен та інших нетканих матеріалів (рис. 2.1).

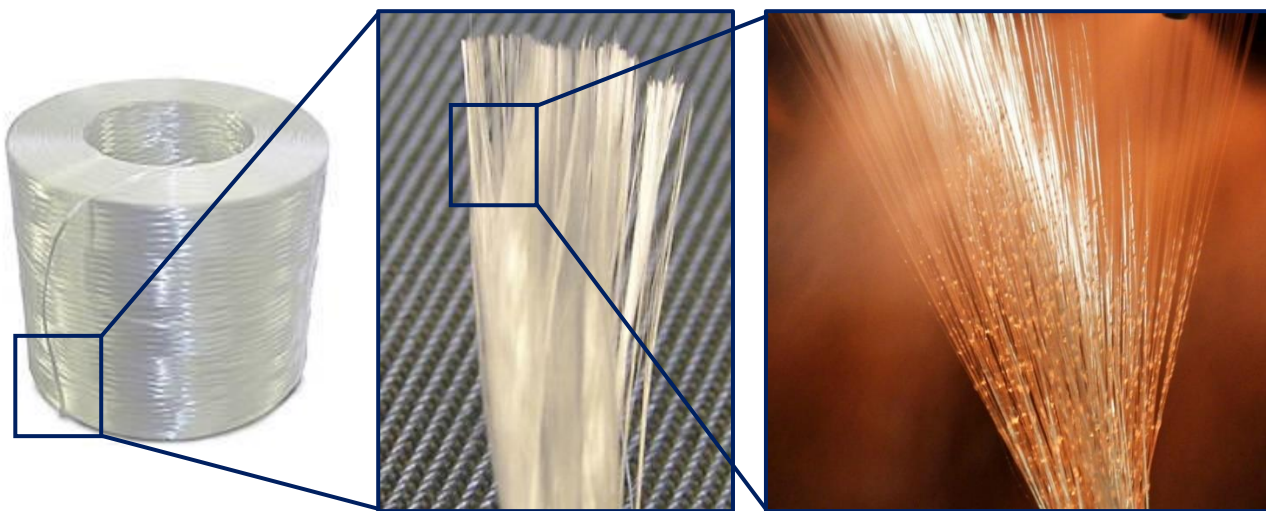


Рис. 2.1. Скловолокнистий ровінг

Ткани армувальні матеріали одержують шляхом текстильного перероблення крученої комплексної нитки, джгута, пряжі або ровингів. Для

текстильної переробки використовують скловолокна діаметром 3...4 мкм. Ткані армувальні матеріали є технологічними, зручними при виготовленні великогабаритних виробів, дають змогу отримати високий уміст арматури у склопластиках.

Органічні волокна. Найчастіше для виробництва деталей конструкцій авіаційної та ракетно-космічної техніки використовують волокна на основі ароматичних поліамідів – арамідні волокна (рис. 2.2). Застосовують також поліамідні (наприклад, капрон, найлон та ін.) і поліімідні волокна (рис. 2.3).



Рис. 2.2. Кевларова нитка



а



б

Рис. 2.3. Армувальні матеріали на основі найлону:
а – найлонова стрічка; б – найлонова нитка

Арамідні волокна мають унікальний комплекс властивостей: високу міцність при розтягуванні й модуль пружності, термостабільність, широкий температурний діапазон робочих температур, високу міцність від утомленості й високі діелектричні властивості, низьку повзучість.

Завдяки малій густині арамідні волокна за питомою міцністю

перевершують усі відомі нині армувальні волокна й металеві сплави, поступаються тільки вуглецевим і борним волокнам за питомим модулем пружності.

Арамідні волокна добре піддаються текстильному переробленню. Міцність після текстильної переробки становить 90 % початкової міцності ниток, що дає можливість застосовувати арамідні волокна у вигляді різних тканин.

Вуглецеві волокна є найперспективнішими армувальними матеріалами, оскільки мають такі унікальні властивості: мала густина ($1,43 \dots 1,83 \text{ г/см}^3$), високі міцність (до 3500 МПа) і питома міцність, високі жорсткість (модуль пружності $E = 250 \dots 600 \text{ ГПа}$) і питома жорсткість. Крім того, вуглецеві волокна мають високу теплостійкість (у вакуумі або інертному середовищі), малі коефіцієнти тертя й термічного розширення й можуть бути провідниками й напівпровідниками.

Вуглецеві волокна підрозділяються на карбонізовані (максимальна температура термообробки – $900 \dots 2000 \text{ }^\circ\text{C}$, уміст вуглецю – $80 \dots 90 \%$) і графітізовані (температура термообробки – до $3000 \text{ }^\circ\text{C}$, уміст вуглецю – понад 99%).

Вуглецеві волокна одержують методом термохімічної переробки органічних вуглевмісних волокон:

- поліакрилонітрильних волокон (ПАН-волокон);
- гідратцелюлозних волокон (ГЦВ) – віскозних волокон;
- волокон, які одержують з нафтових і кам'яновугільних пеків.

Найбільш дешевими й доступними початковими матеріалами є нафтові й кам'яновугільні пеки, що являють собою суміш олігомерних продуктів. З них формують волокна, пропускаючи розплав при температурі $100 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$ через фільтри діаметром $0,3 \text{ мм}$. Потім сформоване волокно витягують до ступеня витягання $100000 \dots 500000 \%$. При цьому досягається висока орієнтація макромолекул волокна.

Процес одержання вуглецевого волокна складається з таких етапів:

1. Формування початкового волокна.
2. Термохімічна переробка волокна на ранній стадії карбонізації з нагріванням до температури $450 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$. При цьому внаслідок хімічних реакцій видаляються радикали зі структури ланцюгових молекул полімеру, залишається основний ланцюг молекул полімеру, що складається з атомів вуглецю.

3. Високотемпературна карбонізація або графітізація волокна з нагріванням до 2000 або $3000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Термохімічну обробку проводять у вакуумі або інертному середовищі – азоті, гелії, аргоні. Для поліпшення якості волокон і запобігання усадці термохімічну обробку проводять одночасно з деяким витягуванням волокон (волокна мають бути в натягнутому стані).

Вуглецеві волокна мають фібрилярну будову. Характерний елемент

структури – закриті пори, які можуть займати до 33 % об'єму волокна. Пори мають голкоподібну форму, орієнтовані вздовж основного волокна, їх середня довжина становить $(2...3) \cdot 10^{-2}$ мкм, а діаметр – $(1...2) \cdot 10^{-3}$ мкм. Збільшення кількості пор знижує міцність волокна при розтяганні. Вуглецеві волокна, які застосовуються для армування конструкційних матеріалів, умовно поділяють на дві групи: високомодульні ($E = 300...700$ ГПа, $\sigma^f = 2,0...2,5$ ГПа) і високоміцні ($E = 200...250$ ГПа, $\sigma^f = 2,5...3,2$ ГПа). Отримано також волокна високої міцності з великим модулем пружності.

Вуглецеві волокна добре піддаються текстильному переробленню, тому їх досить широко використовують у вигляді тканин, ровингів, ровниці, джгутів та інших матеріалів (рис. 2.4).

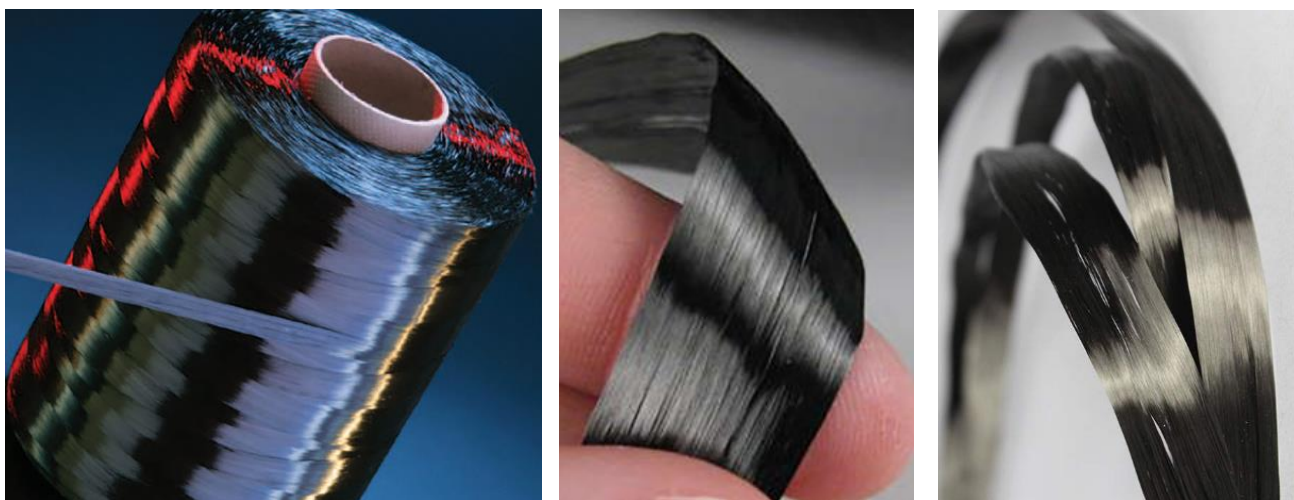


Рис. 2.4. Вуглецеве волокно

До недоліків вуглецевого волокна можна віднести таке:

- схильність до окиснювання на повітрі (особливо при температурі $300...400$ °C);
- висока хімічна активність при взаємодії з металевими матрицями;
- виникнення електричного потенціалу на межі «волокно – металева матриця»;
- відносно слабка адгезія до полімерних матриць.

З метою усунення цих недоліків проводяться дослідження щодо нанесення на вуглецеві волокна металевих і керамічних покриттів.

Борні волокна. Волокна бору є одними з перспективних армувальних матеріалів для композитів з полімерною й металевою матрицями. Волокна бору мають малу густину ($2,55...2,65$ г/см³), високу міцність при розтяганні (до 3500 МПа) і стисканні, великий модуль пружності ($E = 380...420$ ГПа), високі твердість і зносостійкість (мікротвердість – до 4000 кгс/мм²; твердість за Моосом – 9,3 ум. од., алмазу – 10 ум. од.), високу температуру плавлення (2050 °C). Борні волокна мають високу зсувну жорсткість ($G = 180$ ГПа), низьку тепло- й електропровідність.

Основний метод одержання борних волокон – осадження бору з

газової суміші трихлористого бору (BCl_3) і водню (H_2) на вольфрамову нитку діаметром близько 12 мкм при температурі 1000...1100 °С під тиском, близьким до атмосферного. Унаслідок осадження утворюється серцевина з боридів вольфраму (WB , W_2B_5 і WB_4) діаметром 15...17 мкм, навколо якої розташовується шар полікристалічного бору. Нагрівання вольфрамової нитки здійснюється через ртутні електричні контакти, які одночасно утворюють гідравлічні затвори для герметизації камери реактора. Швидкість руху волокна через реактор безперервної дії становить 0,8...1,0 м/хв. Осадженням одержують бороволокно зазвичай діаметром 100 мкм (іноді 150 і 200 мкм).

Таким чином, борні волокна – неоднорідні за складом і структурою, анізотропні. Границя міцності серцевини волокна менша від границі міцності волокна в цілому. Серцевина волокна навантажена великими стискальними напруженнями, а бор в зоні, що прилягає до вольфрамової нитки, – розтяжними. Це призводить до утворення радіальних тріщин у борних волокнах унаслідок великих залишкових напружень, які збільшуються зі збільшенням діаметра волокна.

Для підвищення жаростійкості борних волокон, захисту їх від впливу деяких металевих матриць і підвищення адгезії волокон до деяких матричних матеріалів волокна покривають карбідом кремнію шляхом осадження з парогазової фази в середовищі аргону й водню. Волокна бору, покриті тонким шаром карбиду кремнію, називають *борси́ком*.

Волокна бору широко застосовуються у виробництві композитів на основі полімерної й алюмінієвої матриць. Композити на основі борних волокон та алюмінієвої матриці мають кілька переваг порівняно з аналогічними матеріалами з полімерною матрицею. Такі КМ, наприклад, можуть працювати при температурі до 370 °С (640 К), і їх можна переробляти на звичайному технологічному устаткуванні, яке застосовується в металургійному виробництві.

Недоліки борних волокон:

1. Міцність борних волокон має значний статистичний розкид. Коефіцієнт варіації міцності залежно від дефектності структури поверхні волокон становить 17...36 %.

2. Через високу жорсткість і великий діаметр борні волокна досить обмежено піддаються ткацькому переробленню. Їх використовують тільки вздовж основи частіше стрічок, іноді тканин. Уздовж утку використовуються органоволокна (бороорганострічки й тканини), скловолокна (боросклотканини й стрічки), вуглеволокна (боровуглетканини, стрічки), комбіновані ткани матеріали, наприклад боросклотканини, стрічки та ін.

Металеві волокна й дроти є дуже ефективними армувальними матеріалами. Для композиційних матеріалів, що працюють при низьких і помірних температурах, використовують сталеві й берилієві волокна; для композитів, які експлуатуються при помірних і високих температурах, – вольфрамові, молібденові волокна й волокна зі сплавів тугоплавких металів.

Волокна й дроти зі сталей. Найчастіше для виготовлення тонкого високоміцного дроту використовують корозійностійкі (нержавіючі) сталі аустенітного, аустенітно-мартенситного класів і мартенситно-старіючі сталі. Завдяки застосуванню оптимальних технологій виготовлення одержують дроти зі значним ступенем наклепу, іноді з мартенситною структурою, а іноді дроти, додатково зміцнені в процесі штучного старіння.

При температурах 350...400 °С відбувається зниження міцності наклепаних сталевих дротів, винятком є дроти зі сталей ВНС-9, Н13М10ДО16, Н8М18ДО14, що зберігають свої міцнісні властивості при температурі 450...500 °С.

Вольфрамові й молібденові волокна і дроти. Вольфрамові волокна є досить технологічними для виготовлення композитів, що експлуатуються при високих температурах. Вольфрамовими волокнами зміцнюють жароміцні нікелеві та інші сплави. Уведення у вольфрам і сплави на його основі дисперсних частинок (окису торію ThO₂, карбідів) або легувальних елементів (Re, Ti, V тощо) дає можливість істотно підвищити жароміцність і знизити повзучість матеріалів.

Для підвищення тривалої міцності вольфрамових волокон при високих температурах на їх поверхню розпиленням наносять тонкі бар'єрні покриття (4...12 мкм) з карбідів титану й гафнію, окисів алюмінію й гафнію тощо. Найефективнішим є покриття карбідом гафнію (HfC), що дає змогу уникнути рекристалізації вольфрамових волокон при температурі 1100...1200 °С протягом 1000 год.

Як *коротковолокнисту арматуру* можна використовувати подрібнені мінеральні волокна, наприклад волокна азбесту. Але найперспективнішими є ниткоподібні монокристали, або вуса.

Монокристалічні волокна мають такі самі переваги, що й скляні та борні волокна. Їх граничне відносне подовження – як у скляних волокон (3...4 %), а модуль пружності – як у борних волокон і вище (40000...68000 кгс/мм²).

Розглянуті вище волокна й нитки застосовують як армувальні матеріали для композитів без оброблення або після різних видів перероблення: скручування, перемотування, ткацької переробки та ін.

Армувальні матеріали за геометричною ознакою:

- *нитки* – кручені або некручені пасма волокон;
- *джгути* – декілька скручених ниток або пасм;
- *ровинги* – пасма паралельних нескручених волокон;
- *ровниці* – система паралельних щільно покладених волокон;
- *тканини*: однорідні, гібридні, одношарові, багатошарові (за складом і геометрією); полотняні, саржеві, ситцеві, сатинові, трикотажні, спеціальні (за типом переплетення ниток);
- *стрічки*: однорідні – з волокон або ниток одного матеріалу; гібридні – з двох і більше типів волокон або ниток; односпрямовані; ткани.

Найпростішою схемою переплетення ниток у тканині є полотняне переплетення, коли кожна нитка основи й утку проходить по черзі зверху й знизу нитки, яка її перетинає. Більш складним є саржеве переплетення, коли кожна нитка основи й утку проходить по черзі зверху й знизу двох ниток, які її перетинають. При цьому на поверхні тканини утворюється діагональна структура ліній.

Вітчизняною промисловістю випускається широкий асортимент скло-, органо- й вуглетканин, гібридних тканин одношарового й багатошарового переплетення.

Вхідний контроль армувальних матеріалів

Метою вхідного контролю є не тільки відбраковування некондиційних матеріалів, але й визначення параметрів у межах допусків для подальшого коригування технологічного процесу. Перелік заходів вхідного контролю армувальних матеріалів наведено в табл. 2.1.

Перевірці якості армувальних матеріалів за дефектами зовнішнього вигляду, за відповідністю геометричним розмірам і вимогам нормативно-технічної документації піддають 5 % обсягу контрольованих матеріалів (див. табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Вхідний контроль армувального матеріалу

Параметри, що перевіряються	Документи для проведення контролю
Товарно-транспортна накладна	Звіряння даних про вантаж
Маса вантажу, нетто	Звіряння даних про вантаж
Паспорт	ДСТУ 28006–88
Маркування місць	«-«
Упакування матеріалу	ДСТУ 28006–88
Дефекти матеріалу	«-«
Ширина матеріалу	ДСТУ 3811–72, 3812–72
Лінійна щільність, г/м	«-«
Руйнівні напруження при розтяганні й стисканні в готових КМ	Технологічна інструкція
Товщина моношару, мм	Технологічна інструкція
Нанесення апрету, %	ТУ6-06-І 106–83
Вологість фактична, %	ДСТУ 6611–73

Для перевірки за фізико-механічними показниками від партії відбирають зразки у кількості 10 % від одиниць упаковки. При одержанні незадовільних результатів перевірки хоча б за одним показником проводять повторну перевірку за цим показником, але вже подвоєної кількості одиниць продукції. Результати повторного випробування поширюються на всю партію.

Методика проведення вхідного контролю

Для всіх видів армувальних матеріалів визначають уміст вологи, розривне навантаження й подовження при розриві, а для матеріалів, що містять замаслювачі, – уміст речовин, що видаляються під час прожарювання. Для ниток і ровингів визначають лінійну щільність, скручуваність й рівномірність скручення, для тканин, нетканого полотна, стрічок – лінійні розміри, поверхневу щільність, займистість.

Для визначення вмісту вологи (для всіх армувальних матеріалів) і речовин, що видаляються прожарюванням (тільки для скломатеріалів), від рулону (катушки) матеріалу відмотують зовнішній шар, відрізають один-два зразки масою не менше 5 г і зважують на лабораторних вагах з точністю до $\pm 0,001$ г. Кожний зразок поміщають в окремий тигель з відомою масою, висушують у сушильній шафі при температурі $(107 \pm 2)^\circ\text{C}$ не менше 30 хв. Після висушування й охолодження до $18 \dots 25^\circ\text{C}$ зразки зважують і визначають вологість W_r і вологовміст W_c кожного зразка:

$$W_r = \frac{m - m_1}{m_1} \cdot 100\%; \quad W_c = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де m , m_1 – маса зразка перед висушуванням і після нього відповідно.

Для визначення скручуваності й рівномірності скручення використовують круткомір з ковзним лівим затискачем. Відстані між затискачами беруть такими: 250 мм для ниток зі скручуваністю до 400 витків на 1 м і 500 мм для ниток зі скручуваністю більше 400 витків на 1 м.

Під час заправляння нитки в затискачі круткоміра не допускаються її розтягування й розкручування. Скручуваність ниток визначають методом безпосереднього розкручування до повної паралельності елементарних або складових ниток.

Рівномірність скручення визначають таким чином. Від катушки відмотують і відрізають 1 м нитки, затискають кінці цього відрізка пальцями, перегинають навпіл, зводячи кінці разом, утворюється петля. Надавши петлі прямовисного положення, підраховують кількість витків, що утворюються по нитці.

Скручуваність виражають кількістю витків на 1 м нитки, рівномірність скручення – кількістю витків у петлі нитки.

Для визначення розривного навантаження й подовження при розриві від рулону (катушки) матеріалу відмотують і відрізають не менше п'яти відрізків завдовжки 220 мм кожний. Для тканини й стрічки з кожного відрізка вирізають смужки завширшки 40 мм: для стрічки – у напрямку основи, для тканини – у напрямку основи й утку (для стрічки завширшки менше 50 мм використовують усю ширину стрічки). Потім висмикують з обох боків поздовжні нитки так, щоб ширина смужки дорівнювала 25 мм.

Смужки тканини, стрічки або відрізки нитки, ровингу проклеюють папером по кінцях клеєм типу БФ. Довжина непроклеєної ділянки має становити (80 ± 2) мм. Для затвердіння склеєні зразки витримують у сушильній шафі при температурі (107 ± 2) °С не менше 30 хв.

Зразки поміщають у затискачі розривної машини, відстань між якими (100 ± 1) мм. Швидкість опускання нижнього затискача – 60...100 мм/хв.

Якщо в процесі випробувань визначають тільки розривне навантаження, то зразки вирівнюють у затискачах вручну, без підвішування вантажу для попереднього натягу. Якщо необхідно визначати й подовження при розриві, то після закріплення зразка у верхньому затискачі до нижньої його частини підвішують вантаж попереднього натягу масою не більше 0,25 % від передбачуваного розривного навантаження, після чого фіксують зразок у нижньому затискачі.

Якщо під час проведення випробувань розрив зразка відбувся в затискачі або на відстані менше 5 мм від нього, то результат не враховують і піддають випробуванням додатковий зразок. За остаточний результат випробувань беруть середнє арифметичне результатів усіх випробувань.

Щоб визначити лінійну щільність ниток і ровингів, від бобіни відмотують і відрізають не менше трьох відрізків матеріалу з такою довжиною: при лінійній щільності до 5 текс – 200 м; 5...80 текс – 100 м; 80...300 текс – 25 м; понад 300 текс – 1 м. Кожний відрізок матеріалу зважують окремо з похибкою не більше 0,5 % від маси, що зважується. Лінійну щільність T_ℓ , текс, визначають за формулою

$$T_\ell = \frac{m}{\ell}, \quad (2.2)$$

де m – маса відрізка нитки, г; ℓ – його довжина, км.

Для визначення лінійних розмірів тканини (стрічки) від рулону (катушки) відмотують і відрізають не менше 0,5 м матеріалу, розкладають на рівній поверхні й вимірюють ширину тканини (стрічки) у декількох місцях.

Товщину тканини (стрічки) вимірюють з допомогою товщиноміра не менш ніж у п'ятьох місцях. Діаметр контактної площадки приладу має дорівнювати 5,0...11,3 мм, питомий тиск на зразок у місці виміру – 0,1 МПа.

Для визначення поверхневої щільності тканини й лінійної щільності стрічки відбирають не менш ніж по п'ять зразків і кожний зважують із похибкою не більше 0,01 г (рис. 2.5).

Потім вимірюють довжину й ширину зразків металевою лінійкою з похибкою не більше 1 мм. Поверхневу щільність тканини T_a , г/см², обчислюють за формулою

$$T_a = \frac{m}{A} = \frac{m}{hb}, \quad (2.3)$$

де m – маса зразка, г; h , b – довжина й ширина зразка відповідно, см.

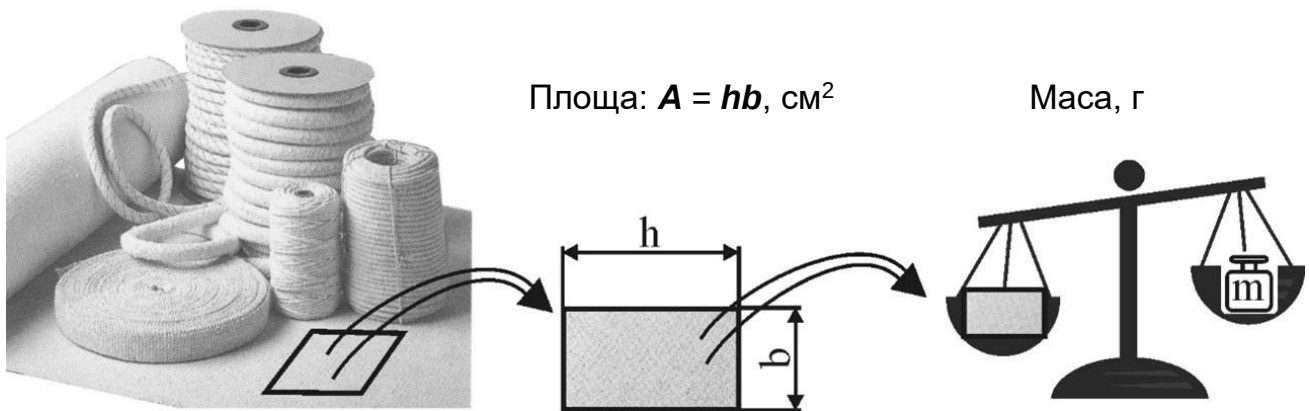


Рис. 2.5. Визначення поверхневої щільності 2D-армувального матеріалу

Лінійну щільність стрічки T_ℓ , кг/100 м, визначають так:

$$T_\ell = \frac{m_1}{\ell} \cdot 100, \quad (2.4)$$

де m_1 – маса зразка стрічки, кг; ℓ – його довжина, м.

За остаточний результат випробувань беруть середнє арифметичне результатів усіх випробувань.

Визначення займистості тканини й стрічки проводять шляхом безпосереднього зіткнення поверхні матеріалу з відкритим вогнем газового пальника протягом не менше 1 хв. Матеріал вважається незаймистим, якщо вогонь не поширюється за межі ділянки зразка, що стикається з полум'ям пальника, і після видалення з полум'я матеріал негайно гасне.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити типи й види армувальних матеріалів, їх властивості й маркування (див. дод. 1).
2. Вивчити перелік заходів вхідного контролю й методику визначення основних показників і параметрів армувальних матеріалів, які підлягають перевірці.
3. Визначити лінійну щільність ниток, ровингів і стрічок, а також поверхневу щільність тканин за вказівкою викладача.
4. Визначити діаметр нитки за допомогою мікроскопа (рис. 2.6) і розривне навантаження для неї з використанням розривної машини або спеціальної системи навантаження (рис. 2.7). Результати занести до табл. 2.2.
5. Визначити тип переплетення тканини й кількість ниток у напрямку основи й утку на вибраній площадці тканини розміром 10x10 мм (рис. 2.8, 2.9).
6. Визначити тип, марку й основні властивості трьох-чотирьох видів тканин та одного-двох видів стрічок (за вказівкою викладача). Результати занести до табл. 2.3, 2.4.

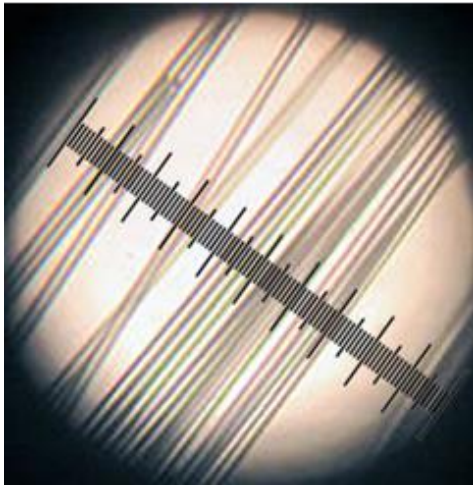


Рис. 2.6. Скловолоконистий ровінг під мікроскопом

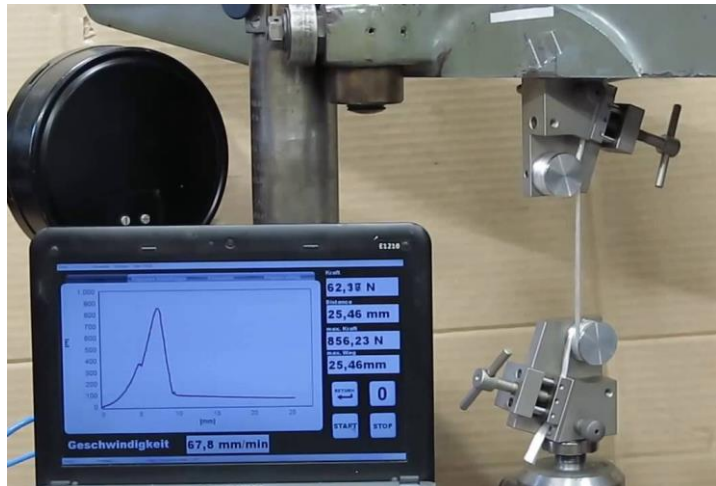
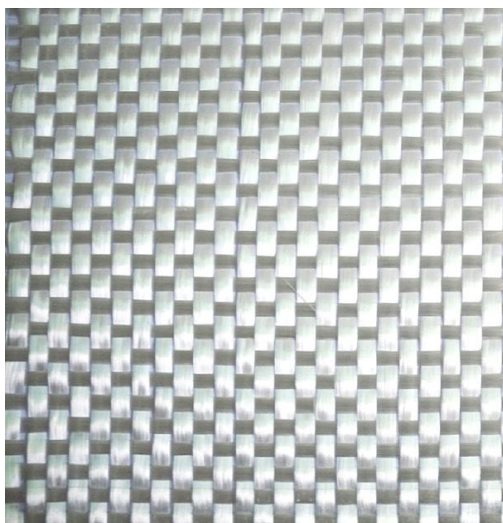
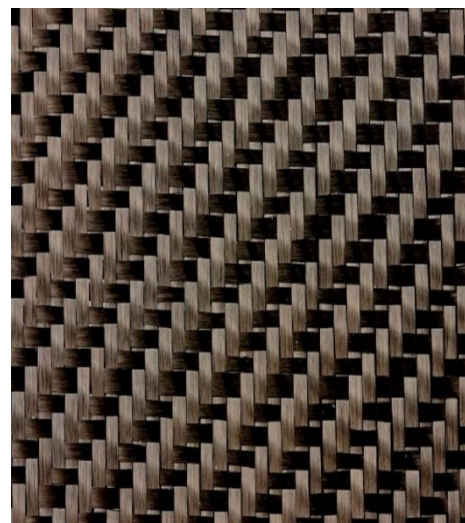


Рис. 2.7. Випробування на розтяг скловолокна (ASTM D2105)



а



б

Рис. 2.8. Ткани армувальні матеріали:
а – склотканина (10 x 10 мм); б – вуглецева тканина (10 x 10 мм)

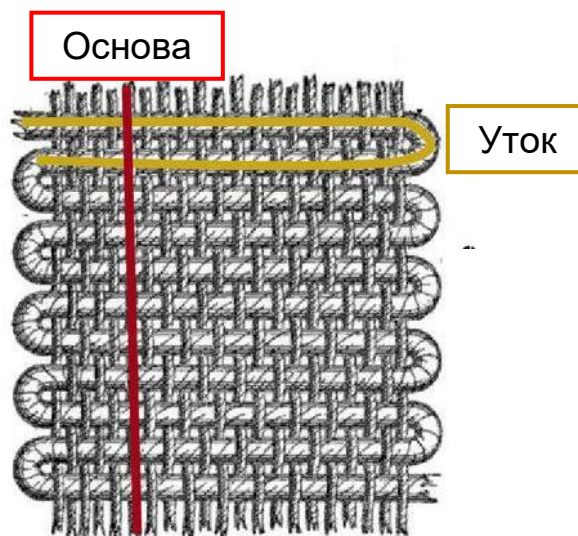


Рис. 2.9. Напрямки основи й утку в тканині

Таблиця 2.2

Результати випробування волокон (див. рис. 2.1–2.4)

№ п/п	Вид армувального матеріалу	Діаметр, мм (див. рис. 2.6)	Довжина нитки, м	Маса нитки, г	Лінійна щільність, текс	Площа перерізу волокна, мм ²	Розривне навантаження, Н (див. рис. 2.7)	UTS, МПа	Займистість	Плавильна здатність
1										
2										
3										
4										
5										

Таблиця 2.3

Результати випробування стрічки (див. рис. 2.3, а)

№ п/п	Матеріал стрічки	Товщина стрічки, мм	Ширина стрічки, мм	Довжина стрічки, м	Вага стрічки, кг	Лінійна щільність, кг/100м	Займистість, плавильна здатність
1							
2							

Таблиця 2.4

Результати контролю тканин (див. рис. 2.8)

№ п/п	Тип і марка тканини	Товщина, мм	Маса, г	Довжина, м	Ширина, м	Площа, м ²	Поверхнева щільність, г/см ²	Кількість волокон на 10 мм (див. рис. 2.9)		Займистість, плавильна здатність
								основа	уток	
1										
2										

Контрольні запитання

1. Наведіть означення КМ, дайте характеристику компонентів і назвіть умови їх сумісності.
2. Як і за якими ознаками класифікують композиційні матеріали?
3. Які властивості КМ залежать від властивостей армувальних волокон і які вимоги ставляться до армувальних волокон?
4. Виробництво, властивості, маркування й застосування різних видів волокон.
5. Наведіть класифікацію армувальних матеріалів.
6. Маркування, властивості й застосування в КМ різних видів тканин.
7. Зміст вхідного контролю й методика визначення показників і характеристик армувальних матеріалів.
8. Як визначають вологість і вологовміст матеріалів?
9. Як визначають і в яких одиницях виражають лінійну щільність ниток, ровингів, стрічок і поверхневу щільність тканин?
10. Як підготовляють зразки тканини для визначення розривного навантаження й подовження при розриві?
10. Як визначають діаметр і розривне навантаження ниток, товщину стрічки або тканини?
11. Які види переплетення тканин ви знаєте? Як визначають щільність переплетення тканин уздовж основи й утку?
12. Як визначають займистість армувальних матеріалів?

Практична робота № 3

ПРИГОТУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПКМ І ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Мета роботи:

1. Вивчення складу й основних властивостей матричних матеріалів, що найчастіше застосовуються в ПКМ.
2. Ознайомлення з технологією приготування матричних матеріалів (сполучних) і методикою визначення їх основних технологічних параметрів.

Теоретичні відомості

До сполучних КМ ставляться певні вимоги як у процесі виготовлення матеріалу, так і в процесі експлуатації композитних деталей і виробів.

На етапі виготовлення до матричних матеріалів ставляться такі вимоги:

- висока змочуваність та адгезія до армувального матеріалу;
- низька усадка під час ствердіння;
- низька в'язкість сполучних при високій життєздатності;
- висока швидкість затвердіння.

На етапі експлуатації матричні матеріали мають відповідати таким вимогам:

- високі фізико-механічні характеристики;
- висока термостійкість;
- стійкість до агресивних середовищ, атмосферного впливу, кліматичних і біологічних факторів та ін.

Крім смол до складу сполучних входять твердники, пластифікатори (за необхідності), розчинники та інші компоненти.

Полімерні сполучні на основі епоксидних смол

Епоксидні смоли й багатокомпонентні сполучні на їх основі широко застосовуються як матричні матеріали при виробництві деталей, вузлів та агрегатів АКТ із ПКМ. Це пояснюється їх високою адгезією до більшості армувальних матеріалів, малою усадкою під час ствердіння, досить високою когезійною міцністю в затверділому стані, високою хімічною стійкістю та іншими позитивними властивостями.

Епоксидні смоли – олігомери, що містять у молекулах епоксидні або гліцидилові групи й здатні перетворюватися на полімери просторової (сітчастої) будови. Епоксидні групи можуть знаходитися в аліфатичних циклах або ланцюгах, гліцидилові групи – частіше на кінцях ланцюгів.

Існує велика кількість епоксидних смол. Найпоширенішими є так звані діанові епоксидні смоли (на основі дифенілпропану або діану).

Діанові епоксидні смоли – в'язкі рідини або тверді крихкі речовини від ясно-жовтого до коричневого кольору, які розчиняються в толуолі, ксилолі, ацетоні, сумішах кетонів зі спиртами. Діанові епоксидні смоли маркуються так: ЕД-5, ЕД-8, ЕД-16, ЕД-20, ЕД-22. Чим вищий порядковий номер, тим нижча в'язкість олігомеру. Як сполучні для ПКМ застосовуються смоли марок ЕД-16, ЕД-20, ЕД-22 тощо.

Завдяки високій реакційній здатності епоксидних і гідроксильних груп як твердники епоксидних смол можна використовувати мономерні, олігомерні й полімерні сполуки різних класів і, отже, у широкому діапазоні варіювати режими ствердіння (температура, час) і властивості одержуваних тривимірних полімерів.

Для холодного ствердіння епоксидних смол як твердники застосовуються аліфатичні поліаміни, найчастіше поліетиленполіаміни (ПЕПА) або гексаметилендіаміни (ГМД), їх уміст становить 5...15 % від маси смоли. Життєздатність композицій з такими твердниками при 15...25 °С становить 1...3 год, тривалість затвердіння – 24 год (хоча ступінь затвердіння продовжує збільшуватися ще протягом 10...30 діб). Ступінь ствердіння при кімнатній температурі не перевищує 65...70 %. Для його підвищення й поліпшення та стабілізації властивостей продуктів затвердіння проводять термооброблення при 60...120 °С протягом 2...12 год.

При виробництві ПКМ найчастіше застосовуються твердники гарячого ствердіння. Як твердники найчастіше застосовуються ароматичні діаміни й поліаміни, їх уміст становить 15...50 % від маси смоли. Ствердіння проводять при 100...180 °С протягом 1,5...4,0 год. Продукти ствердіння мають високі показники щодо механічної міцності, хімічної стійкості та теплостійкості.

Для гарячого ствердіння епоксидних смол використовують, наприклад, такі ангідриди дикарбонових кислот: фталевий ангідрид (ФА), малеїновий ангідрид (МА), метилтетрагідрофталеєвий ангідрид (МТГФА) та ін. Уміст твердника становить 50...100 % від маси смоли. Крім зазначених твердників до складу сполучного вводять 0,1...2,0 % каталізаторів ствердіння. Ствердіння проводять при 120...180 °С протягом 1,5...2,5 год. Продукти ствердіння мають високу термо- й вологостійкість, підвищені механічні й діелектричні властивості.

Як твердники для гарячого ствердіння використовують також фенолоформальдегідні (резольні й новолачні) смоли, мочевино- і меламіноформальдегідні смоли (25...75 % від маси епоксидної смоли). Ствердіння проводять при 150...210 °С протягом від 10 хв до 12 год.

Об'ємна усадка епоксидних смол під час ствердіння становить 2...8 %. При затвердінні епоксидних смол не виділяються леткі речовини, що визначає достатньо просту технологію їх перероблення.

Теплостійкість за Мартенсом більшості затверділих матричних матеріалів становить 50...100 °С. Особливо високу теплостійкість (180...250 °С) мають матричні матеріали УП-610, УП-612, УП-632. Твердість за Брінеллем

більшості затверділих сполучних становить 90...100 кгс/мм², підвищену твердість мають сполучні К-54/6 (НВ = 177...197 кгс/мм²) і ЕА (НВ = 295...344 кгс/мм²). Водовбирання за 24 год для більшості сполучних становить 0,03...0,08 %.

Полімерні сполучні на основі фенолоформальдегідних смол

Фенолоформальдегідні смоли застосовуються як сполучні завдяки добре налагодженому й достатньо простому процесу їх виробництва, низькій собівартості й поєднанню таких цінних властивостей у затверділому стані, як теплостійкість, твердість, хімічна стійкість тощо. Для виробництва ПКМ використовуються як терморезактивні, так і термопластичні смоли. Останні твердіють під впливом твердників. Смоли використовують у вигляді спиртових розчинів, водних дисперсій і порошків.

Через значну крихкість, низьку адгезію до деяких армувальних матеріалів фенолоформальдегідні смоли в чистому вигляді в ПКМ застосовуються рідко, а частіше в композиціях з іншими смолами. Для одержання КМ із високими міцністю, теплостійкістю, стійкістю до дії кислих і лужних середовищ найчастіше застосовуються фенолоформальдегідні смоли в композиції з епоксидними смолами.

Типи й марки застосовуваних фенолоформальдегідних сполучних:

- на основі бакелітового лаку (Р-2М – смола загального призначення, модифікована полівінілбутиралем та аніліном; Р-2Ц – швидкотвердна смола, модифікована ефірами целюлози);
- фурфурілфенолоформальдегідні смоли ФФП, ФФ-1С та ін.;
- фенолоформальдегідні тверді смоли (СФ-341 – порошок від жовтого до коричневого кольору; СФ-342 – анілінова смола конструкційного призначення для теплоізоляційних деталей; СФ-010 – новолачна смола тощо);
- гексафенольні тверді смоли СФ-3045, СФ-3046, що застосовуються для виготовлення гнучких пластиків тощо.

Сполучні на основі кремнійорганічних смол

Кремнійорганічні смоли (поліорганосилоксани) відрізняються від інших смол високою теплостійкістю й можливістю працювати в широкому інтервалі температур (173...623 К). Крім цього ці смоли мають високу хімічну стійкість до різних органічних розчинників, за винятком ароматичних і хлорованих розчинників, також мають низьку стійкість і до мінеральних мастил. Кремнійорганічні смоли мають хороші діелектричні властивості.

Адгезія кремнійорганічних сполучних до волокон становить 14,6...18,6 МПа. Однак їх когезійна міцність є відносно невеликою, тому механічна міцність кремнійорганічних ПКМ значно нижча за міцність поліефірних, фенолоформальдегідних і епоксидних. Значні тиски формування, тривалий цикл твердіння й висока вартість полімерів обмежують застосування

кремнійорганічних сполучних областю електроізоляційних і теплозахисних ПКМ.

У виробництві ПКМ використовують смоли марок К-9, К-31, поліметилсилоксанові лаки К-554, К-812 та ін. Смола К-9 має температуру розм'якшення 333...358 К і тривалість затвердіння 50...180 хв при температурі 473 К (200 °С). Лак К-812 являє собою толуольно-ацетоновий розчин продуктів гідролітичної поліконденсації метилтрихлорсилану безбарвного або жовтого кольору з умістом сухого залишку (40±3) %.

Визначення вмісту компонентів сполучного

Для просочення арматури найчастіше застосовують 50%-ні розчини полімерів у розчинниках. Склад найбільш часто застосовуваних матричних матеріалів, які використовуються у виробництві КМ для АКТ, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Склад 50%-ного розчину сполучного

Найменування компонентів	Марка сполучного, уміст компонентів, мас. ч.				
	5-211-Б	5-211БН	ЕНФБ	ЕНФБ-М	ЕНУП
Смола епоксидна ЕД-20	100	50	—	—	—
Смола епоксидна УП-631В	—	50	—	—	50
Смола епоксидна ЕН-6	—	—	до 6	до 6	—
Смола СФ-341А	70	70	100	100	100
ФФГ-ефір	—	—	20	20	—
Каталізатор УП-605/3	—	—	3,6	6,3	4,5
Спиртоацетонова суміш 1:1	170	170	—	—	—
Спиртоацетонова суміш 1:2	—	—	130	130	—
Ацетон	—	—	—	—	155

Уміст армувального матеріалу в КМ не може перевищувати певної величини. Ця величина визначається умовами змочування всіх волокон арматури в процесі виробництва КМ і сумісності роботи арматури в готовому виробі.

Відношення об'єму волокон (арматури) до об'єму КМ, виражене у відсотках, називають ступенем армування. Ступінь армування зазвичай не перевищує 75 %.

Рекомендований уміст сполучного в КМ з різними армувальними матеріалами й матеріалами матриць наведено в табл. 3.2.

Для визначення потрібного вмісту компонентів сполучного, необхідного для просочення наповнювача заданого типу, насамперед треба визначити загальну масу сполучного. Для цього можна скористатися даними, наведеними в табл. 3.2.

З урахуванням неминучих технологічних втрат (10...15 %) необхідну масу сполучного M_c для просочення армувального матеріалу можна обчислити за формулою

$$T_c = (M_a + M_c) K_c K_e \cdot 0,01, \quad (3.1)$$

де M_c – маса сполучного, необхідного для просочення, кг; M_a – маса армувального матеріалу, що просочується, кг; K_c – процентний уміст сполучного в КМ; K_e – коефіцієнт технологічних втрат ($K_e = 1,10 \dots 1,15$).

Таблиця 3.2

Уміст сполучного в КМ

Армувальний матеріал	Марка сполучного, уміст смоли, %		
	5-211Б, 5211БН	ЕНФБ, ЕНФБ-М	ЕНУП
Стрічка вуглецева	30...36	32...38	32...38
Т-10-80	28...34	32...34	–
Т-13	37...45	–	–
А-1, А-2, Е-100	28...35	32...38	–

Розв'язавши рівняння (3.1) відносно M_c , одержимо формулу для розрахунку M_c :

$$M_c = \frac{M_a K_c K_e \cdot 0,01}{1 - K_c K_e \cdot 0,01}. \quad (3.2)$$

Масу кожного з компонентів багатоконпонентного сполучного визначають за співвідношенням

$$M_i = \frac{M_c m_i}{\sum m_i}, \quad (3.3)$$

де M_i – маса шуканого компонента сполучного, кг; M_c – маса сполучного, необхідного для просочення, кг; m_i – питомий масовий уміст шуканого компонента в рецептурі сполучного, мас. ч.

Примітка. Визначаючи масу сполучного за формулою (3.2) та його компонентів за формулою (3.3), уміст розчинника не враховують. Необхідну масу розчинника для приготування 50%-ного розчину визначають за табл. 3.1.

Приготування сполучних

Перед використанням усі компоненти сполучного мають пройти вхідний контроль на відповідність паспортним даним.

Сполучне готують партіями. Партія – маса сполучного, виготовленого за одне завантаження реактора.

Крім основного компонента – смоли, у сполучне залежно від його призначення й фізико-хімічних властивостей уводять твердники, каталізатори, прискорювачі, пластифікатори й пігменти. Щоб надати сполучному необхідної технологічної в'язкості, уводять розчинники. Зазвичай для просочення армувальних матеріалів сполучним на основі епоксидних смол та їх сумішей з іншими смолами застосовують розчини 50%-ної концентрації.

Перед змішуванням компонентів сполучного необхідно підготувати деякі з них. Анілінофенолформальдегідну смолу СФ-341А з метою прискорення розчинення піддають дробленню на дробарці так, щоб діаметр кусків не перевищував 0,5 см. Смоли ЕН-6 і УП-631У охолоджують до температури 5...10 °С для поліпшення умов відбору необхідного матеріалу. Інші компоненти підготовки не потребують.

Сполучне у виробничих умовах готується в емальованому (або з нержавіючої сталі) реакторі ємністю 20...50 л з мішалкою, що працює зі швидкістю 60...80 об/хв, з люком для завантаження й нижнім зливальним краном. Перед приготуванням сполучного і після нього апарат промивають ацетоном.

У реактор при працюючій мішалці заливають розрахункову масу розчинника й завантажують усі інші компоненти в довільному порядку. Суміш компонентів ретельно перемішується протягом однієї-трьох годин до одержання гомогенного розчину. Приготування сполучного проводять при температурі 18...25 °С і відносній вологості повітря не більше 75 %. Отримане сполучне зливають через фільтр у чисту, ретельно висушену металеву тару з герметичною кришкою й ставлять ярлик.

Щоб просочення армувального матеріалу було якісним і сполучне було рівномірно розподілене в КМ, сполучне повинно мати певні технологічні параметри, які контролюють перед змішуванням компонентів.

Визначення і контроль технологічних параметрів сполучного

Контроль сполучного проводять для кожної партії після закінчення приготування, а також після зберігання раніше приготовленого сполучного перед просоченням армувального матеріалу. Основними технологічними параметрами, які необхідні для розрахунку режимів просочення, є *концентрація розчину, його густина, в'язкість, поверхневий натяг і кут змочування*.

Концентрацію розчину сполучного визначають за результатами вимірів густини й температури. Густина визначають ареометром з точністю до 0,001 г/см³, температуру – термометром з точністю до 0,5 °С.

Для визначення густини розчин сполучного наливають у мірний циліндр та обережно опускають у нього ареометр так, щоб його нижній край знаходився на відстані 1,5...2,0 см від дна циліндра, і проводять вимірювання густини. Знаючи густина сполучного, можна визначити його концентрацію за табл. 3.3, а сполучного 5-211Б – за номограмою (рис. 3.1).

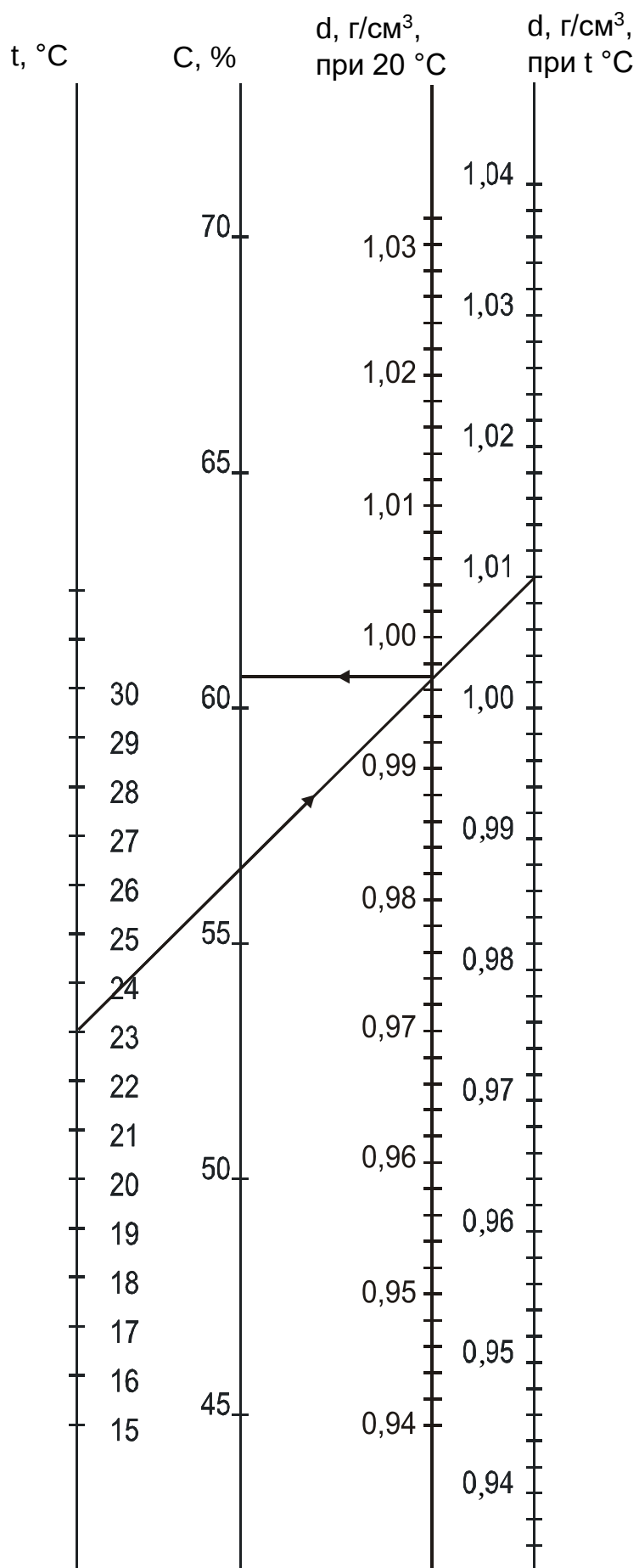


Рис. 3.1. Номограма для сполучного 5-211 Б

Таблиця 3.3

Густина й концентрація 50%-ного розчину сполучного

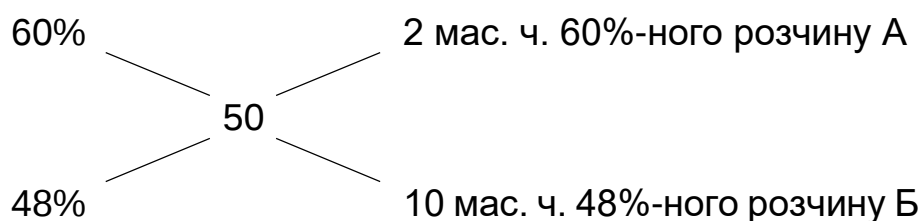
Марка сполучного	Густина сполучного при температурі 20 °С, г/см ³	Концентрація сполучного при температурі 20 °С, %
5-211Б	0,92...0,99	45...54
5-211БН	1,001...1,021	48...52
ЕНФБ	0,977...1,030	48...55
ЕНФБ-М	0,977...1,030	48...55
ЕНУП	0,998...1,040	45...52

Для визначення необхідної концентрації розчину використовують так зване правило «хреста». Якщо побудувати «хрест», то задану концентрацію розчину необхідно записати в місці перетину ліній.

Початкові концентрації двох змішуваних розчинів (для розчинника концентрація дорівнює нулю), які отримано вимірюванням, записують один під одним зліва від перетинних ліній; потім ці концентрації віднімають від заданої, записаної в центрі, отримані значення (за модулем) записують по діагоналі справа. Ці числа вказують, скільки частин (за масою) наявного розчину слід узяти, щоб одержати розчин заданої концентрації.

Приклад. Є 60%-ний розчин А і 48%-ний розчин Б. Потрібно виготовити n кілограмів 50%-ного розчину В для просочення.

Відповідно до правила «хреста» маємо



Таким чином, щоб одержати n кілограмів 50%-ного розчину В, необхідно взяти $2n/12$ кілограмів розчину А і $10n/12$ кілограмів розчину Б.

При регулюванні концентрації розчину сполучного за допомогою розчинника концентрацію останнього беруть такою, що дорівнює нулю.

В'язкість розчину сполучного визначають за допомогою віскозиметра (рис. 3.2) або методом кульки, що падає (рис. 3.3). Для цього в мірний циліндр наливають розчин сполучного й заміряють висоту стовпа рідини. Кульку підносять до поверхні розчину, кидають і заміряють час її падіння. На кульку в розчині сполучного діє рушійна сила

$$F_p = \frac{4}{3}\pi r_k^3 (\rho_k - \rho_c)g, \quad (3.4)$$

де r_k – радіус кульки, м; ρ_k, ρ_c – густина матеріалів кульки й сполучного, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с².



а



б

Рис. 3.2. Віскозиметри:
а – віскозиметр цифровий ротаційний; б – віскозиметр Уббелодє

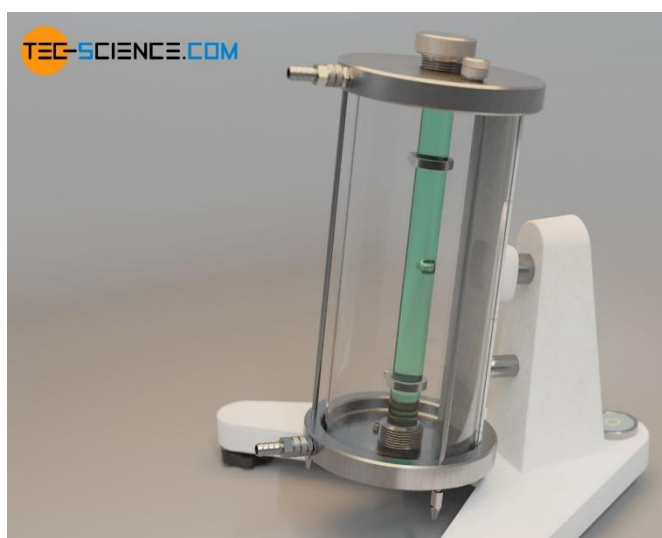
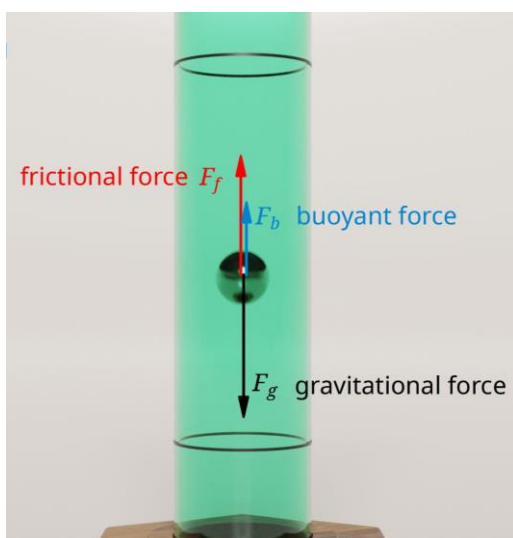


Рис. 3.3. Метод кульки, що падає

Силу опору руху при падінні кульки з постійною швидкістю можна визначити за формулою Стокса

$$F_o = 6\pi r_k V \mu, \quad (3.5)$$

де V – швидкість падіння кульки, м/с; μ – в'язкість розчину, Па·с.

Оскільки при усталеному русі $F_p = F_o$, то з (3.4) і (3.5) можна визначити в'язкість сполучного, Па·с,

$$\mu = \frac{2gr_k^2(\rho_k - \rho_c)}{9V}. \quad (3.6)$$

За виразом (3.6) можна знайти в'язкість сполучного з точністю, достатньою для технологічних розрахунків.

Поверхневий натяг сполучного визначають методом зважування краплі. Цей метод ґрунтується на положенні, відповідно до якого маса m_k краплі, що відривається під дією сили тяжіння від кінчика вертикальної трубки, є пропорційною поверхневому натягу рідини на межі з повітрям.

При цьому сила тяжіння зрівноважується силою поверхневого натягу, що діє по колу краплі вертикально:

$$m_k g = 2\pi r_k \alpha, \quad (3.7)$$

де m_k – маса краплі, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; r_k – радіус капілярної трубки, м; α – поверхневий натяг досліджуваного розчину, Н/м.

Розв'язавши рівняння (3.8) відносно α , Н/м, одержимо

$$\alpha = \frac{m_k g}{2\pi r_k}. \quad (3.8)$$

Щоб розрахувати поверхневий натяг, необхідно виміряти масу краплі за допомогою сталагмометра (рис. 3.4) – приладу, заповненого досліджуванним розчином, де забезпечується вільне падіння краплі під дією сили власної ваги внаслідок перевищення нею сил поверхневого натягу в момент відриву краплі.

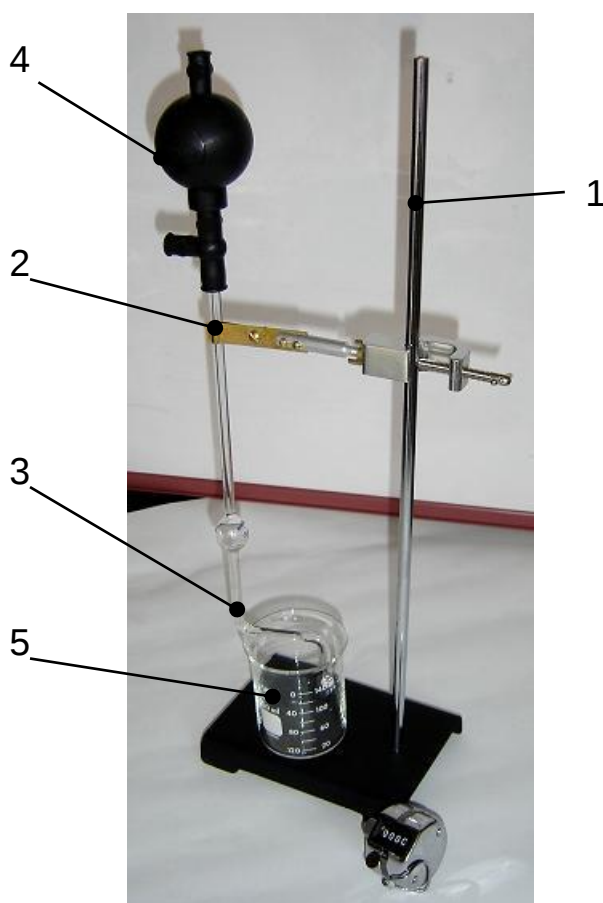


Рис. 3.4. Прилад для визначення маси краплі

На штативі 1 приладу з допомогою тримача 2 закріплено вигнуту скляну трубку 3, один кінець якої вільний для проникнення розчину, а на іншому кінці розміщено гумову грушу 4.

За допомогою груші здійснюють заправлення сталагмометра досліджуваним розчином сполучного. Потім, злегка здавлюючи грушу, по краплях збирають розчин у попередньо зважену посудину 5, рахуючи при цьому краплі. Масу однієї краплі можна визначити за співвідношенням

$$m_k = \frac{M_1 - M_0}{n}, \quad (3.9)$$

де M_1 – маса посудини з розчином; M_0 – маса порожньої посудини; n – кількість крапель. Замість сталагмометра можна використати звичайну піпетку з відомим радіусом капілярної трубки.

Змочуваність твердого тіла рідиною характеризується значенням крайового кута змочування. На межі поділу «тверде тіло – газ» сила, що діє вздовж поверхні поділу, прагне розтягти краплю по цій межі, а сила, що діє на межі «тверде тіло – рідина», – стягнути її. Нарешті, сила, що діє на межі «рідина – газ», напрямлена по дотичній до поверхні рідини. Дотична утворює з поверхнею твердого тіла в точці стикання трьох фаз кут θ – кут змочування (рис. 3.5).

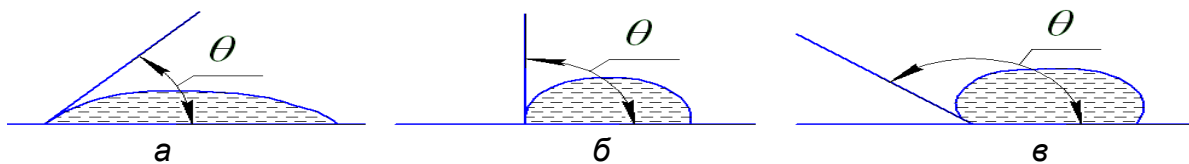


Рис. 3.5. Крайові кути змочування:

a – ($\theta < 90^\circ$) змочування; *б* – ($\theta = 90^\circ$) перехідний випадок; *в* – ($\theta > 90^\circ$) незмочування

Щоб визначити кут змочування, на предметному столі необхідно встановити пластинку досліджуваного матеріалу (попередньо ретельно зачищену і знежирену), увімкнути проєктор і переконатися в тому, що пластинку встановлено паралельно до променів проєктора.

На поверхню пластинки необхідно нанести з піпетки краплю досліджуваного розчину й зафіксувати на екрані сліди поверхні пластинки й краплі розчину. Далі необхідно побудувати дотичну до сліду краплі в точці стикання трьох фаз (твердого тіла, рідини й повітря) і виміряти крайовий кут змочування транспортиром.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з типами й видами матричних матеріалів (див. дод. 1). Вивчити й законспектувати теоретичні відомості до роботи.

2. Використовуючи табл. 3.4, 3.5 і формули (3.2), (3.3), визначити масу сполучного та його компонентів, необхідну для просочення заданої маси

армувального матеріалу. Для цього одержати у викладача дані про марку сполучного (див. табл. 3.4), вид і марку армувального матеріалу (див. табл. 3.5) та його масу в кілограмах.

Приклад формулювання завдання. Визначити масу сполучного типу 5-211-Б та його компонентів, необхідну для просочення 20 кг склотканини Т-10-80. Визначити склад і масу розчинника для одержання 50%-ного розчину. Визначити загальну масу 50%-ного розчину сполучного. Результати занести до табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Результати розрахунку

Вид і маса армувального матеріалу, кг	Маса сполучного, кг	Найменування й маса компонентів					
		1		2		3	
		Масова частка	Маса, кг	Масова частка	Маса, кг	Масова частка	Маса, кг
Для приготування ____%-ного розчину розрахункову масу сполучного необхідно розчинити в ____ кг розчинника такого складу: _____.							
Загальна маса ____%-ного розчину дорівнює ____ кг							

3. Для заданого розчину сполучного типу 5-211-Б експериментально визначити:

- концентрацію розчину сполучного (використати ареометр, термометр і номограму, зображену на рис. 3.1);
- в'язкість розчину сполучного методом кульки, що падає;
- поверхневий натяг сполучного методом зважування краплі.

Результати експериментів і розрахунків занести до табл. 3.5.

Приклад формулювання завдання. Є розчин сполучного типу 5-211-Б. Експериментально визначити концентрацію розчину, його в'язкість і поверхневий натяг.

Концентрації розчину сполучного типу 5-211-Б

Вихідні дані: $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\rho_c = 1032\text{ кг/м}^3$

Розрахунок: за номограмою концентрація $C = 65\%$

В'язкість розчину сполучного типу 5-211-Б

Вихідні дані: _____

Розрахунок: за формулою (3.6) в'язкість $\mu = 2,80\text{ мПа}\cdot\text{с}$

Поверхневий натяг розчину сполучного типу 5-211-Б

Вихідні дані: _____

Розрахунок: _____

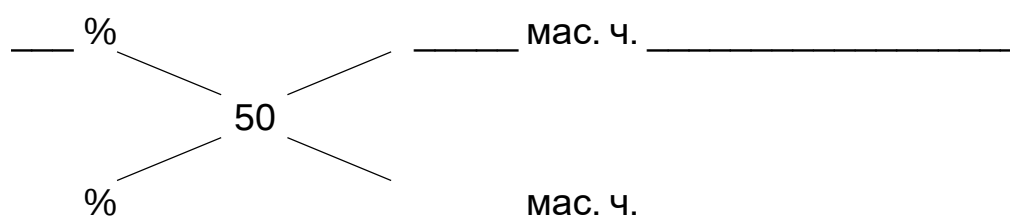
Результати експерименту

Технологічні параметри сполучного			
Густина, кг/м ³	Концентрація, %	В'язкість, Па·с	Поверхневий натяг, Н/м

4. За певною концентрацією сполучного типу 5-211-Б, користуючись правилом «хреста», визначити маси заданого розчину сполучного й розчинника, необхідні для одержання розчину сполучного заданої концентрації, за масою такого, що дорівнює необхідній масі розчину, визначеній за п. 2.

Приклад формулювання завдання. Розрахувати необхідну масу сполучного типу 5-211-Б із заданою концентрацією і розчинника для приготування _____ кг 50%-ного розчину за правилом «хреста».

Розрахунок:



Контрольні запитання

1. Які матричні матеріали застосовуються при виробництві ПКМ для використання в конструкціях авіаційної та ракетно-космічної техніки?
2. Як визначають уміст основних компонентів ПКМ? Що називають ступенем армування?
3. Як розраховують масу початкових компонентів у складі сполучного?
4. Які технологічні параметри сполучного контролюють у процесі його приготування?
5. Як визначають концентрацію розчину й доводять її до необхідної?
6. Як визначають в'язкість розчину і в яких одиницях її виражають?
7. Як визначають поверхневий натяг розчину і в яких одиницях його виражають?
8. Як визначають кут змочування розчином твердого матеріалу?

Практична робота № 4

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОДНОСПРЯМОВАНИХ КМ ВІД ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ І СТУПЕНЯ АРМУВАННЯ

Мета роботи:

1. Засвоєння методики розрахунку міцності й жорсткості односпрямованих КМ з безперервними волокнами в напрямку армування за відомими характеристиками матричного й армувального матеріалів.
2. Розрахунок критичної та оптимальної об'ємних часток волокон у КМ залежно від властивостей арматури й матеріалу матриці.

Теоретичні відомості

Основні компоненти КМ:

– *матричні матеріали*, що виконують функції сполучної речовини, надають матеріалу або виробу форми, роблять матеріал монолітним і розподіляють зусилля між волокнами (фенолоформальдегідні, меламіноформальдегідні, кремнійорганічні, ненасичені гетероцепні поліефіри, епоксидні смоли, поліаміди тощо);

– *армувальні матеріали (АМ)*, що характеризуються високою міцністю й жорсткістю (монокристали, нитки, джгути, тканини, дроти, сітки тощо) і які сприймають основну частину навантажень на елементи деталей або конструкцій.

Розглянемо вимоги, які ставляться до АМ і матриці.

Вимоги до АМ. Волокна, які використовуються як армувальний матеріал, повинні мати такі властивості: високу температуру плавлення, низьку густину, високу міцність у всьому інтервалі робочих температур, технологічність, мінімальну розчинність у матриці, високу хімічну стійкість, відсутність фазових перетворень у зоні робочих температур, нетоксичність під час виготовлення й експлуатації.

Для армування здебільшого застосовують такі види волокон: ниткоподібні кристали, металевий дріт, органічні волокна, неорганічні полікристалічні волокна й різні ткани й неткані армувальні матеріали на їх основі.

Вимоги до матеріалів матриць: висока адгезія до армувальних матеріалів; хімічна стійкість і нейтральність до армувальних матеріалів; високі міцність і теплостійкість; мінімальна усадка при затвердінні; мінімальний коефіцієнт питомого теплового розширення; висока еластичність (жорсткість значно менша, ніж АМ).

Матриця в армованих композиціях надає виробу форми й робить матеріал монолітним, виконує функції сполучного. З'єднуючи численні волокна, матриця сприймає різного роду зовнішні навантаження при розтягу, стиску, згині, зсуві й передає зусилля на волокна.

Оскільки матриця є еластичною, зусилля від зруйнованих або дискретних (коротких) волокон передаються сусіднім волокнам, концентрація напружень поблизу різного роду дефектів при цьому знижується. Матриця захищає волокна від механічних пошкоджень та окиснення. Висока міцність КМ зумовлена адгезією (зчепленням) на межі матриці й арматури.

Якщо розтягне навантаження напрямлене по осі паралельних між собою волокон, то для одержання ефекту зміцнення граничне відносне подовження матриці має дорівнювати відносному подовженню волокон або бути більшим за нього. Для забезпечення монолітності КМ при поперечному навантаженні потрібні матриці, відносне подовження яких більше за пружну деформацію волокон. Крім того, чим еластичніша матриця, тим меншою має бути товщина її прошарку між волокнами й тим більше волокон може бути введено в КМ.

Визначення міцності односпрямованих КМ з безперервними волокнами в напрямку армування

Вихідними даними для розрахунку є (рис. 4.1):

- діаграма дійсних напружень волокон $\sigma = f(\varepsilon)$ (крива 1);
- діаграма дійсних напружень матриці (крива 2).

Діаграма дійсних напружень КМ (крива 3), яку необхідно визначити, складається з трьох ділянок:

- I – матриця й волокна деформуються пружно;
- II – матриця переходить у пружнопластичний стан, волокна продовжують деформуватися пружно;
- III – обидва компоненти системи перебувають у стані пластичної деформації.

Будемо вважати, що міцність зв'язку на межі «волокно – матриця» є достатньою для забезпечення спільної деформації аж до руйнування, тобто

$$\varepsilon_M = \varepsilon_B = \varepsilon_K, \quad (4.1)$$

де ε_M , ε_B , ε_K – ступінь деформації матриці, волокна й композиції відповідно.

Тоді зовнішнє навантаження, яке сприймає композиційний матеріал у напрямку армування (P_{xk}), дорівнює сумі навантажень, що припадають на матрицю (P_{xm}) і волокна (P_{xb}):

$$P_{xk} = P_{xm} + P_{xb} \quad (4.2)$$

при розтягуванні вздовж осі x.

Скориставшись тим, що силу можна подати як добуток напруження на площу поперечного перерізу, рівність (4.2) перепишемо у вигляді

$$\sigma_{xk} A_{xk} = \sigma_{xm} A_{xm} + \sigma_{xb} A_{xb}, \quad (4.3)$$

де σ_{xk} , σ_{xm} , $\sigma_{xв}$ – розтяжні напруження в матриці, волокнах і всій композиції в напрямку осі x; A_{xm} , $A_{xв}$, A_{xk} – площі поперечного перерізу матриці, волокна й композиції відповідно.

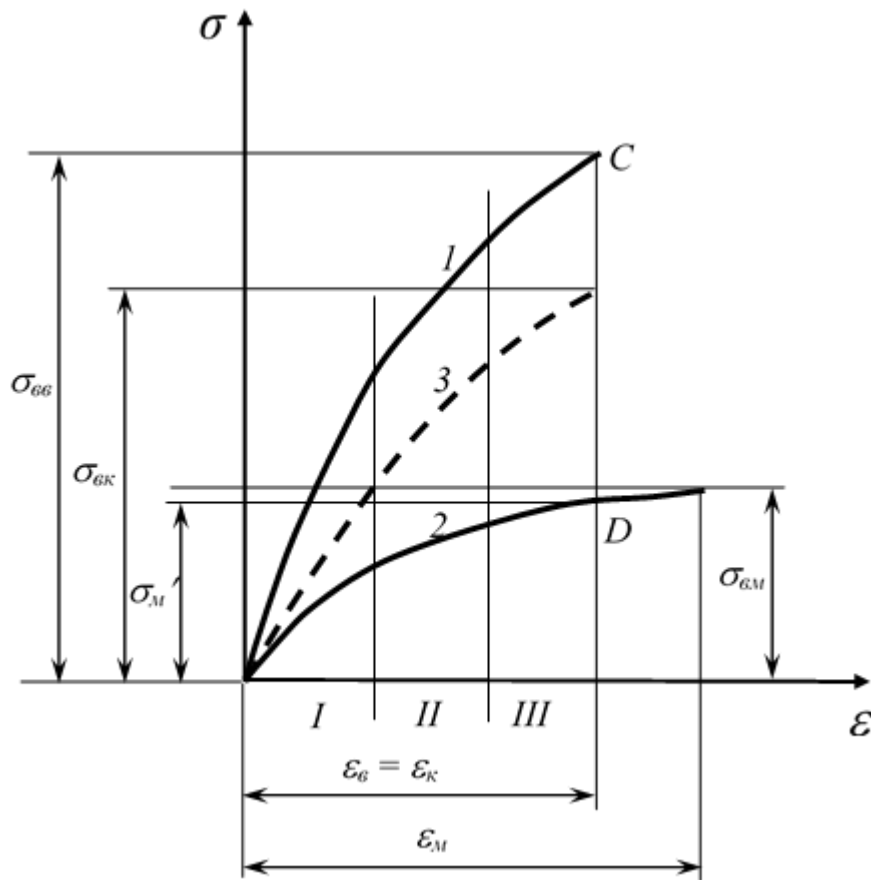


Рис. 4.1. Вихідні дані для розрахунку:

- 1 – діаграма дійсних напружень волокна; 2 – діаграма дійсних напружень матриці;
3 – діаграма дійсних напружень КМ

Поділивши обидві частини рівняння (4.3) на A_{xk} , одержимо

$$\sigma_{xk} = \sigma_{xm} V_m + \sigma_{xв} V_v, \quad (4.4)$$

де $V_m = A_{xm} / A_{xk}$; $V_v = A_{xв} / A_{xk}$ – об'ємні частки матриці й волокна в композиційному матеріалі.

Питома об'ємна частка волокна в композиційному матеріалі, що дорівнює відношенню площі поперечного перерізу волокна до площі поперечного перерізу односпрямованого композиційного матеріалу, має назву ступеня армування КМ: $V_v = A_{xв} / A_{xk}$. У випадку, коли КМ армований волокнами в різних напрямках, тканинами або іншими видами армувальних матеріалів, ступінь армування визначається відношенням об'єму армувального матеріалу до об'єму композиційного матеріалу.

З урахуванням того, що $V_m + V_v = V_k = 1$, рівняння (4.4) можна записати в такому вигляді:

$$\sigma_{\text{хк}} = \sigma_{\text{хв}} V_{\text{в}} + \sigma_{\text{хм}} (1 - V_{\text{в}}). \quad (4.5)$$

Використавши поняття граничних напружень, маємо

$$\sigma_{\text{ехк}} = \sigma_{\text{ехв}} V_{\text{в}} + \sigma'_{\text{хм}} (1 - V_{\text{в}}), \quad (4.6)$$

де $\sigma_{\text{ехв}}$ – середнє значення границі міцності волокна при розтяганні; $\sigma'_{\text{хм}}$ – напруження в матриці в момент розриву волокон.

Слід усвідомити, що $\sigma'_{\text{хм}}$ – це не границя міцності матриці, а напруження, що відповідає деформації, яка дорівнює граничній деформації волокон до руйнування $\varepsilon_{\text{в}}$ (див. рис. 4.1). Для визначення $\sigma'_{\text{хм}}$ із точки С, що відповідає максимальній деформації волокон, необхідно опустити перпендикуляр на вісь ε . Ордината точки D і буде $\sigma'_{\text{хм}}$.

На практиці зроблені припущення часто змінюються, тому що через наявність дефектів волокна руйнуються не одночасно, а послідовно. Волокна з більшими дефектами руйнуються при менших напруженнях, далеких від границі міцності, волокна з меншими дефектами руйнуються при більших напруженнях, а в цілому міцність композиції буде трохи нижчою від розрахованої за формулою (4.5).

Те саме можна сказати й для випадку, коли матриця має недостатній запас пластичності: на межі поділу і в тілі матриці утворюються тріщини й відбувається передчасне руйнування КМ у цілому.

Оптимальна об'ємна частка волокон

Відповідно до рівняння (4.5) міцність КМ має підвищуватися пропорційно об'ємній концентрації волокон $V_{\text{в}}$.

Зазвичай при $V_{\text{в}} > 0,70 \dots 0,75$ (уміст матеріалу матриці 30...25 % і менше) матеріал матриці не повністю змочує й склеює між собою всі волокна в єдине ціле. При цьому КМ виявляють схильність до утворення тріщин і розшаровувань, спостерігається неодноразове руйнування волокон, і міцність КМ різко знижується. Тому ступінь армування $V_{\text{в}} = 0,70 \dots 0,75$ слід уважати максимально можливим для більшості композиційних матеріалів.

З іншого боку, при дуже малих $V_{\text{в}}$ крихкі волокна не можуть обмежувати деформацію матриці й руйнуються, а матриця ще матиме запас міцності й сприйматиме навантаження. У цьому випадку міцність КМ може бути нижчою від міцності неармованої матриці, оскільки введення волокон рівносильне введенню в матрицю ниткоподібних пор. Якщо волокна практично не працюють ($\sigma_{\text{хв}} V_{\text{в}} = 0$), то залежність міцності композиції від об'ємної частки волокон (4.5) має вигляд

$$\sigma_{\text{хк}} = \sigma_{\text{хм}} (1 - V_{\text{в}}), \quad (4.7)$$

де $\sigma_{\text{хм}}$ – границя міцності матриці (волокна не працюють і $\sigma_{\text{вв}} \rightarrow 0$).

Графік залежності міцності КМ від концентрації волокон за рівняннями (4.6) (пряма 1) і (4.7) (пряма 2) зображено на рис. 4.2.

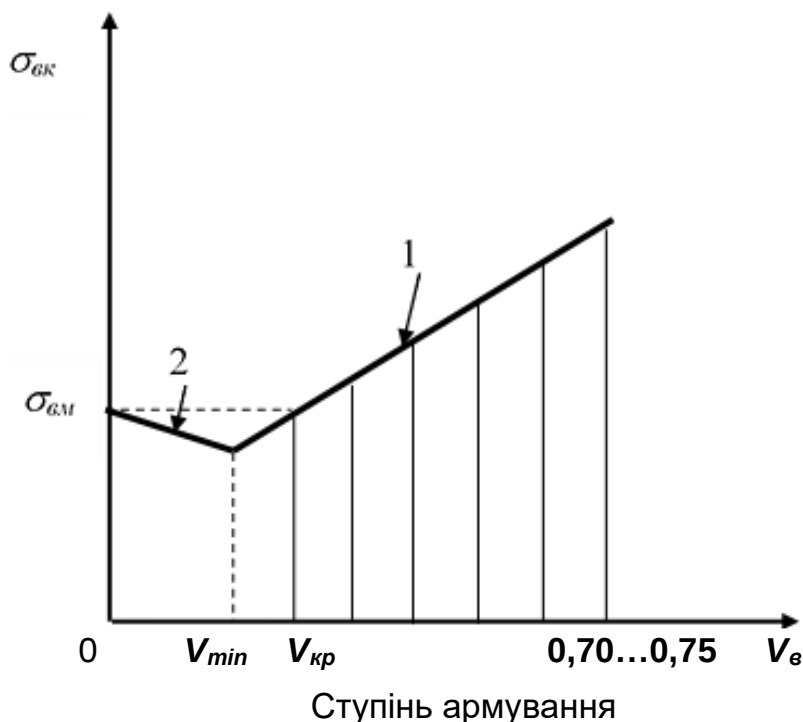


Рис. 4.2. Залежність міцності КМ від ступеня армування

Об'ємна частка волокон у точці перетину прямих 1 і 2 є мінімальною об'ємною концентрацією волокон. Їй відповідає мінімальна міцність КМ. Мінімальну об'ємну частку волокон можна знайти, прирівнявши вирази (4.6) і (4.7) і розв'язавши отримане рівняння відносно V_{min} :

$$\sigma_{хв}V_{min} + \sigma'_{хм}(1 - V_{min}) = \sigma_{хм}(1 - V_{min}), \quad (4.8)$$

$$V_{min} = \frac{\sigma_{хм} - \sigma'_{хм}}{\sigma_{хв} - \sigma'_{хм} + \sigma_{хм}}. \quad (4.9)$$

Із формули (4.9) і рис. 4.2 випливає, що існує така об'ємна частка волокон (V_{min}), при якій міцність КМ може бути меншою від міцності неармованої матриці. Розраховувати цю величину немає необхідності.

Критичною об'ємною часткою волокон $V_{кр}$ називають таку об'ємну частку, при якій міцність КМ стає такою, що дорівнює міцності неармованої матриці. Починаючи з цього ступеня армування міцність КМ поступово збільшується.

Величину $V_{кр}$ можна розрахувати, прирівнявши в рівнянні (4.6) міцність КМ і міцність неармованої матриці:

$$\sigma_{вв}V_{кр} + \sigma'_м(1 - V_{кр}) = \sigma_{вм}, \quad (4.10)$$

звідки

$$V_{кр} = \frac{\sigma_{вм} - \sigma'_м}{\sigma_{вв} - \sigma'_м}. \quad (4.11)$$

Для більш раціонального армування і зміцнення при невеликій об'ємній частці волокон значення $V_{кр}$ має бути якомога меншим. На практиці цього досягають, уводячи в матрицю волокна з границею міцності, що є значно більшою за σ'_m . Для пластичних матриць зазвичай величина σ'_m наближається до величини границі плинності.

При низькій міцності волокон критичний ступінь армування може бути більшим за 50 %.

Максимальний ступінь армування, який вибирають з умови якісного змочування матеріалом матриці всіх волокон, зазвичай дорівнює 0,70...0,75. При більших ступенях армування КМ перестає працювати як монолітний матеріал, волокна можуть розриватися по черзі, і міцність КМ інтенсивно знижується, що призводить до його руйнування.

Міцність односпрямованих КМ у поперечних напрямках (у напрямках, перпендикулярних до напрямку волокон) визначається міцністю матричного матеріалу. За умов високої адгезії матеріалу матриці до волокон і монолітності матеріалу поперечна міцність дорівнює границі міцності матриці.

Визначення модуля пружності односпрямованих КМ у напрямку армування та в поперечному напрямку

Передбачається, що модулі пружності волокон E_v і матриці E_m є відомими. Із закону Гука випливає, що

$$\sigma_{xk} = E_{xk} \varepsilon_{xk}; \quad \sigma_{xv} = E_v \varepsilon_{xv}; \quad \sigma_{xm} = E_m \varepsilon_{xm}, \quad (4.12)$$

де E_{xk} , E_v , E_m – модулі пружності композиційного матеріалу, волокон і матриці відповідно.

Підставивши значення напружень з (4.12) у (4.5) і скоротивши всі члени на відносну деформацію ($\varepsilon_{xk} = \varepsilon_{xv} = \varepsilon_{xm}$), одержимо рівняння для розрахунку модуля пружності КМ у напрямку армування x :

$$E_{xk} = E_v V_v + E_m (1 - V_v). \quad (4.13)$$

Під час визначення модуля пружності КМ E_{yk} у напрямку, перпендикулярному до волокон, слід ураховувати, що напруження КМ, волокон і матриці в напрямку y є однаковими:

$$\sigma_{yk} = \sigma_{yv} = \sigma_{ym}. \quad (4.14)$$

Абсолютна деформація КМ Δ_{yk} є сумою абсолютних деформацій волокон Δ_{yv} і матриці Δ_{ym} :

$$\Delta_{yk} = \Delta_{yv} + \Delta_{ym}. \quad (4.15)$$

Оскільки абсолютна деформація $\Delta = l\varepsilon$, рівняння (4.15) можна записати так:

$$\varepsilon_{ук} \ell_{ук} = \varepsilon_{ув} \ell_{ув} + \varepsilon_{ум} \ell_{ум}. \quad (4.16)$$

Поділивши всі члени цього рівняння на $\ell_{ук}$ і врахувавши, що $V_{\text{в}} = \frac{\ell_{ув}}{\ell_{ук}}$ та $V_{\text{м}} = \frac{\ell_{ум}}{\ell_{ук}}$, запишемо рівняння (4.16) у такому вигляді:

$$\varepsilon_{ук} = \varepsilon_{ув} V_{\text{в}} + \varepsilon_{ум} V_{\text{м}}. \quad (4.17)$$

Із закону Гука випливає, що

$$\varepsilon_{ук} = \frac{\sigma_{ук}}{E_{ук}}; \quad \varepsilon_{ув} = \frac{\sigma_{ув}}{E_{\text{в}}}; \quad \varepsilon_{ум} = \frac{\sigma_{ум}}{E_{\text{м}}}. \quad (4.18)$$

Підставимо значення деформацій з (4.18) у (4.17) і з урахуванням (4.14) скоротимо всі члени рівняння на $\sigma_{ук} = \sigma_{ув} = \sigma_{ум}$, унаслідок чого одержимо

$$\frac{1}{E_{ук}} = \frac{V_{\text{в}}}{E_{\text{в}}} + \frac{V_{\text{м}}}{E_{\text{м}}}, \quad (4.19)$$

звідки

$$\frac{1}{E_{ук}} = \frac{E_{\text{м}} V_{\text{в}} + E_{\text{в}} V_{\text{м}}}{E_{\text{в}} E_{\text{м}}}. \quad (4.20)$$

Підставивши $V_{\text{м}} = (1 - V_{\text{в}})$, одержимо модуль пружності односпрямованого КМ у напрямку, перпендикулярному до напрямку волокон E_y :

$$E_{ук} = \frac{E_{\text{в}} E_{\text{м}}}{E_{\text{в}} (1 - V_{\text{в}}) + E_{\text{м}} V_{\text{в}}}. \quad (4.21)$$

Аналогічно за відомими характеристиками компонентів можна визначити модуль зсуву КМ, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт лінійного температурного розширення КМ у напрямку армування й у напрямку, перпендикулярному до волокон, та інші характеристики КМ.

Порядок виконання роботи

1. Одержати завдання для розрахунку двох видів односпрямованих КМ (рис. 4.3–4.6).
2. Занести в таблиці назву, марку й основні характеристики міцності й жорсткості для компонентів першої (табл. 4.1) і другої (табл. 4.2) пар.
3. Визначити $V_{кр}$ для кожної пари за формулою (4.11) (границя міцності КМ при $V_{кр}$ дорівнює границі міцності матриці), а результати занести до табл. 4.1, 4.2.

4. Розрахувати максимальну границю міцності для двох КМ ($V_e = 0,70 \dots 0,75$), результати занести до табл. 4.1, 4.2.

5. Побудувати графік залежності $\sigma_{хкм} = f(V_e)$ для двох видів КМ у межах ступенів армування від $V_{кр}$ до $V_e = 0,70 \dots 0,75$ (див. рис. 4.2).

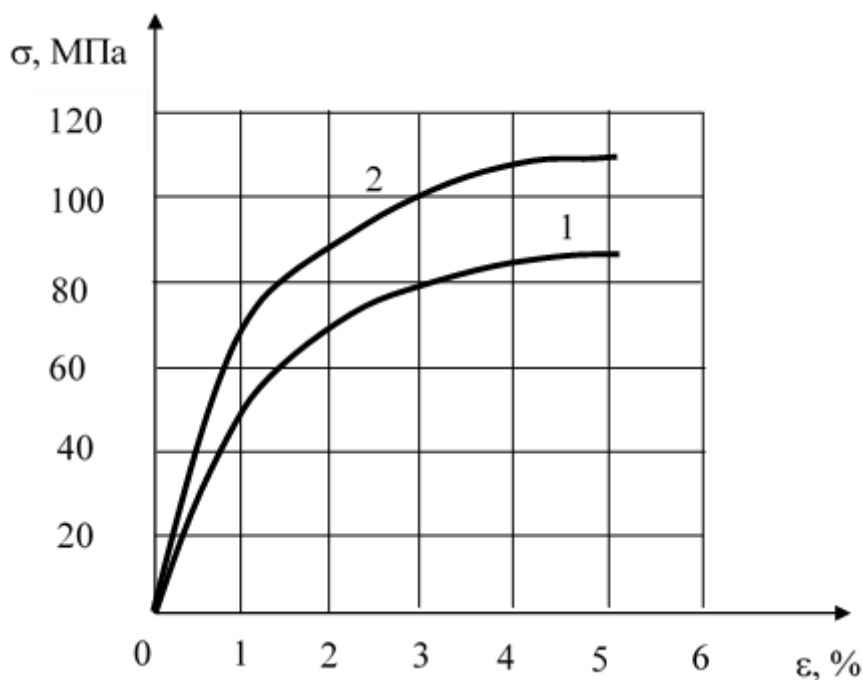


Рис. 4.3. Матричні матеріали на основі епоксидних смол:
 1 – ЕД-20 + 10 % бутилгліцидилового ефіру + твердник ТЕТА (триетилентетрамін);
 2 – епоксидна матриця УП-2171 (для склопластиків)

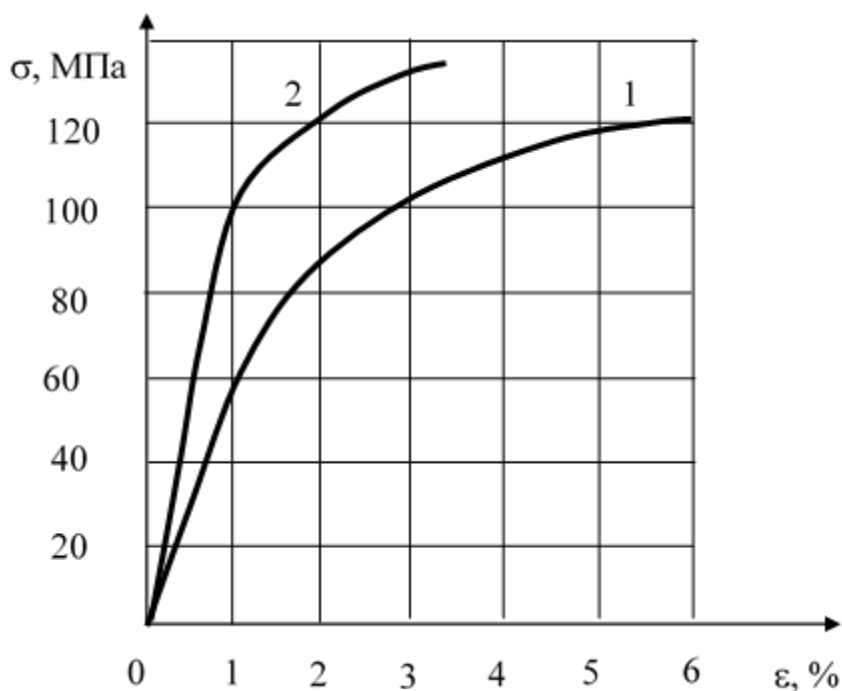


Рис. 4.4. Матричні матеріали на основі епоксидних смол:
 1 – ЕД-20 + оксиетілований поліамін (твердник);
 2 – епоксидна матриця УП-2159 (для склопластиків)

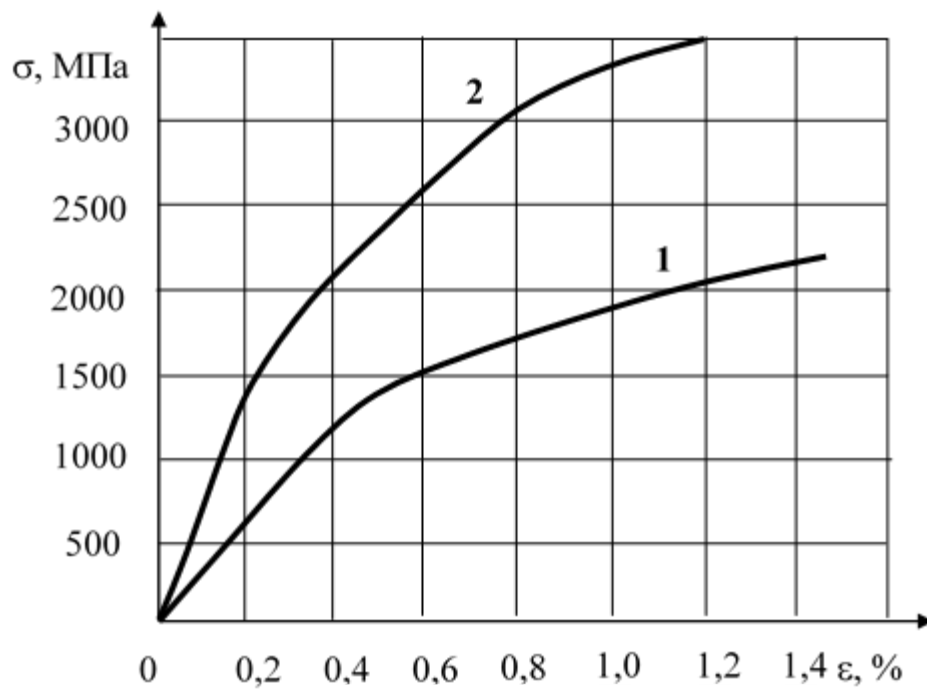


Рис. 4.5. Скловолокно та вуглеволокно:
 1 – скловолокно марки Е ($\sigma_{\text{с}} = 2200$ МПа);
 2 – вуглеволокно вищого сорту ($\sigma_{\text{с}} = 3500$ МПа)

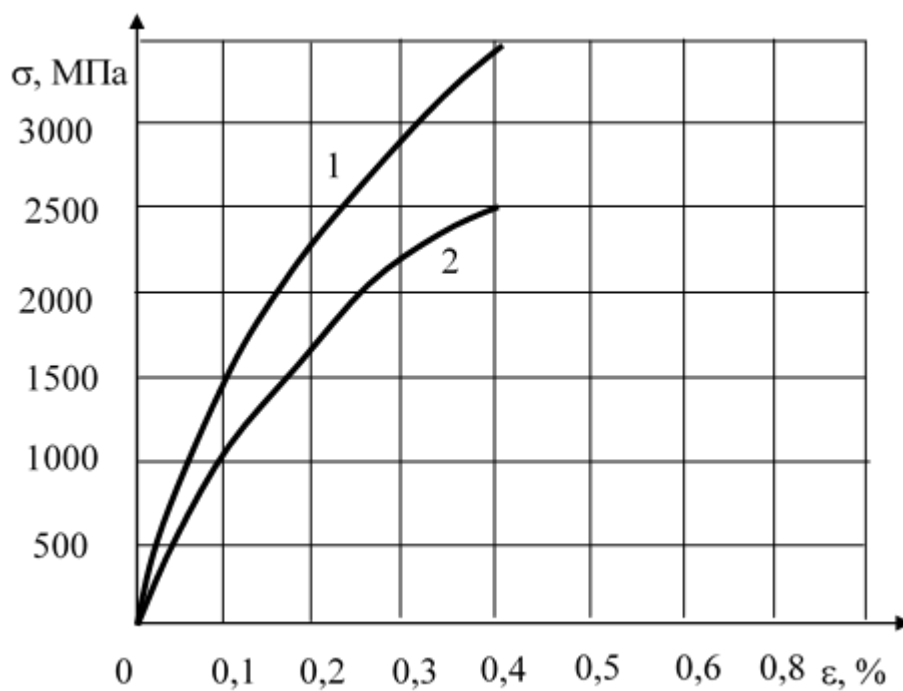


Рис. 4.6. Бороволокно й карбідокремнієве волокно:
 1 – бороволокно ($\sigma_{\text{с}} = 3500$ МПа);
 2 – карбідокремнієве волокно ($\sigma_{\text{с}} = 2500$ МПа)

6. Зробити висновки щодо кожного КМ за такими пунктами (занести до табл. 4.1, 4.2):

- а) границі армування;
- б) можливі границі міцності КМ від $\sigma_{\text{вм}}$ до $\sigma_{\text{хк.мах}}$;

в) максимальна границя міцності КМ становить 76 % від міцності армувального матеріалу.

7. Розрахувати модуль пружності КМ у напрямку армування й поперечному напрямку за відомими характеристиками компонентів, а результати занести до табл. 4.1, 4.2.

8. Зробити загальний висновок, указавши, яка із заданих пар компонентів є оптимальною для виробництва КМ. Якщо показники міцності є однаковими, то висновок зробити на основі економічних показників.

Результати розрахунків

Таблиця 4.1

Результати розрахунку характеристик односпрямованого КМ для першої пари матеріалів

Матеріали й параметри		Значення
Армувальний матеріал – скловолокно марки Е (див. рис. 4.5, крива 1)	Границя міцності $\sigma_{\text{в}}$, МПа	2200
	Відносна деформація $\varepsilon_{\text{в}}$, %	1,5
	Модуль пружності $E_{\text{в}}$, ГПа	147
Матричний матеріал – ЕД-20 + 10% БГЕ + ТЕТА (див. рис. 4.3, крива 1)	Границя міцності $\sigma_{\text{м}}$, МПа	85
	Границя міцності $\sigma'_{\text{м}}$, МПа	60
	Відносна деформація $\varepsilon_{\text{м}}$, %	5
	Модуль пружності $E_{\text{м}}$, ГПа	1,7
Критична об'ємна частка волокон $V_{\text{кр}}$, % (4.11)		1,2
Композит ($V_{\text{в}} = 75\%$)	Границя міцності $\sigma_{\text{хк}}$, МПа (4.5)	1671
	Відносна деформація $\varepsilon_{\text{хк}}$, %	1,5
	Модуль пружності $E_{\text{хк}}$, ГПа (4.13)	110,7
	Границя міцності $\sigma_{\text{ук}}$, МПа (4.18)	85
	Відносна деформація $\varepsilon_{\text{ук}}$, %	5
	Модуль пружності $E_{\text{ук}}$, ГПа (4.21)	6,6
Висновки		
Границі армування, %		1,2...75,0
Можливі границі міцності КМ від $\sigma_{\text{вм}}$ до $\sigma_{\text{хк.мах}}$, МПа (рис. 4.7)		85...1671
Максимальна границя міцності КМ, %		76

Згідно з вихідними даними й результатами обчислення характеристик односпрямованого склопластику (скловолокно марки Е та сполучне ЕД-20 + 10 % БГЕ + ТЕТА), наведеними в табл. 4.1, графік залежності границі міцності $\sigma_{\text{хк}}$ від ступеня армування $V_{\text{в}}$ буде мати вигляд, як показано на рис. 4.7.

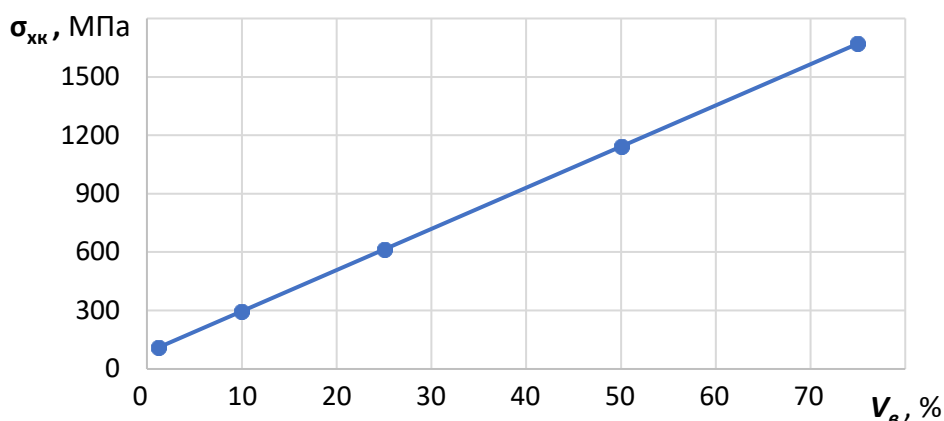


Рис. 4.7. Графік залежності $\sigma_{хк} = f(V_\epsilon)$ для першої пари матеріалів

Таблиця 4.2

Результати розрахунку характеристик односпрямованого КМ
для другої пари матеріалів

Матеріали й параметри		Значення
Армувальний матеріал – _____	Границя міцності σ_ϵ , МПа	
	Відносна деформація ϵ_ϵ , %	
	Модуль пружності E_ϵ , ГПа	
Матричний матеріал – _____	Границя міцності σ_M , МПа	
	Границя міцності σ'_M , МПа	
	Відносна деформація ϵ_M , %	
	Модуль пружності E_M , ГПа	
Критична об'ємна частка волокон $V_{кр}$, % (4.11)		
Композит ($V_\epsilon = \underline{\hspace{1cm}}$ %)	Границя міцності $\sigma_{хк}$, МПа (4.5)	
	Відносна деформація $\epsilon_{хк}$, %	
	Модуль пружності $E_{хк}$, ГПа (4.13)	
	Границя міцності $\sigma_{ук}$, МПа (4.18)	
	Відносна деформація $\epsilon_{ук}$, %	
	Модуль пружності $E_{ук}$, ГПа (4.21)	
Висновки		
Границі армування, %		
Можливі границі міцності КМ від $\sigma_{\epsilon M}$ до $\sigma_{хк.мах}$, МПа		
Максимальна границя міцності КМ, %		

Контрольні запитання

1. Які вимоги ставляться до матричного й армувального матеріалів?
2. Як визначається границя міцності односпрямованих КМ у напрямку армування й поперечному напрямку?
3. Як визначається модуль пружності КМ у напрямку армування й поперечному напрямку?
4. Що являють собою ступінь армування, критичний і максимальний ступені армування?

Практична робота № 5

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНИХ КОНСТАНТ ШАРУВАТОГО КОМПОЗИТА

Мета роботи:

1. Набуття практичного досвіду визначення пружних констант шаруватого ортотропного композита.
2. Дослідження залежності пружних властивостей шаруватого композита від кутів армування моношарів.

Теоретичні відомості

Композити є об'ємним поєднанням різних матеріалів із чіткою межею поділу фаз. Різноманітність матеріалів арматури й матриці, форм поперечного перерізу та розмірів армувальних елементів, способів об'ємного поєднання компонентів зумовлює той факт, що практично неможливо і навіть недоцільно створити довідники щодо властивостей КМ, аналогічні наявним для металів і пластмас. Наявні нормативні документи на фізико-механічні характеристики багатьох КМ характеризуються тим, що описують дуже конкретний матеріал, армований в одному напрямку й отриманий певним технологічним процесом. У такому вигляді КМ у конструкціях застосовуються вкрай рідко. Вибираючи КМ для деталей, необхідно визначити типи армувальних волокон (один або кілька) і сполучного, а також схему армування (односпрямований, ортогонально-армований, перехресно-армований або складноармований КМ) (рис. 5.1).

Проаналізувавши рис. 5.1, бачимо, що, з одного боку, створення довідника властивостей КМ є практично неможливим, а з іншого – існує необхідність у наявності будь-яких способів прогнозування можливих характеристик матеріалів, які б давали змогу враховувати вплив кожного фактора на конструкційні властивості КМ.

Теорія прогнозування фізико-механічних властивостей складається з двох етапів:

– визначення пружних і міцнісних властивостей односпрямованого КМ за відомими характеристиками армувального матеріалу й матриці та типу їх об'ємного поєднання. Під односпрямованим КМ розуміють матеріал, у якому один або кілька типів волокон розміщені впорядковано паралельно один до одного в матеріалі матриці (див. рис. 5.1, а, б);

– визначення фізико-механічних характеристик шаруватих КМ за відомими пружними й міцнісними властивостями кожного шару.

Під шаруватим КМ розуміють матеріал, що складається з довільної кількості шарів, кожен з яких характеризується своїм місцем у пакеті, кутом армування (напрямком волокон), товщиною й матеріалом (див. рис. 5.1, в–д).

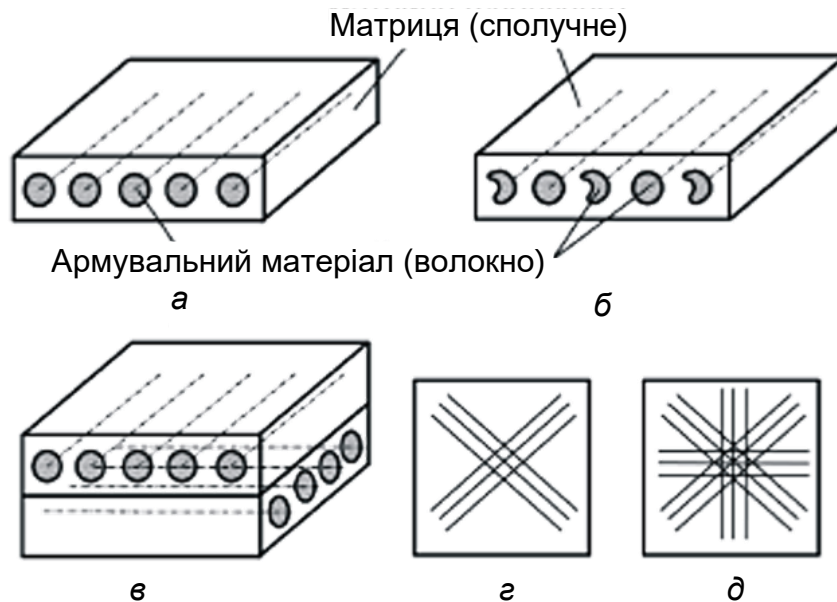


Рис. 5.1. Основні типи структур КМ:

а – односпрямований, армований одним типом волокон; б – односпрямований, армований різними типами волокон; в – ортогонально-армований; г – перехрестно-армований; д – складно-армований

Деформативні властивості односпрямованих КМ (елементарні відомості з механіки анізотропних середовищ)

Проектування або розрахунок на міцність будь-якої конструкції базується на визначенні напружень і деформацій, що виникають під впливом експлуатаційних факторів. Розв'язання цієї задачі базується на трьох групах рівнянь (законів) механіки деформованого твердого тіла:

- рівняння рівноваги;
- умови спільності деформацій або суцільності тіла;
- рівняння зв'язку між деформаціями й напруженнями (узагальнений закон Гука, або фізичний закон).

Перші дві групи рівнянь інваріантні до застосовуваних матеріалів, оскільки є основними законами механіки взагалі, тому у випадку використання композитів у конструкції їх суть і форма не змінюються.

Докорінно змінюється фізичний закон, який відображає функціональний зв'язок між деформаціями й напруженнями в точці твердого тіла.

Найпростіший запис фізичного закону (закону Гука) для одновісного навантаження ізотропного тіла має вигляд

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (5.1)$$

де ε – деформація тіла; σ – напруження, що призводить до появи цієї деформації; E – модуль пружності матеріалу тіла (модуль Юнга).

Об'єктами дослідження механіки деформівного твердого тіла є в загальному випадку ізотропні й анізотропні середовища з однорідною (гомогенною) і неоднорідною (гетерогенною) структурою.

Ізотропне тіло має однакові фізико-механічні властивості у всіх напрямках. Ізотропними з великим ступенем наближення є метали, пластмаси, скло та інші матеріали. *Анізотропне* тіло характеризується різними властивостями у різних напрямках. Прикладами таких середовищ є шпон, односпрямовані та складноармовані КМ, пружні й міцнісні властивості яких залежать від напрямку вирізування зразка з листа відносно напрямку волокон шпону або КМ.

Багато анізотропних тіл мають деяку симетрію властивостей відносно певної осі (рис. 5.2, а). Загалом, якщо через тіло можна провести три ортогональні площини, відносно яких фізико-механічні властивості матеріалу мають симетрію, то таке тіло називають *ортотропним*.

Ортотропія як властивість матеріалу без прив'язування до конкретної системи координат немає сенсу. Наприклад, односпрямований КМ (див. рис. 5.2, а) в осях x, y є ортотропним, а в осях x', y' – анізотропним.

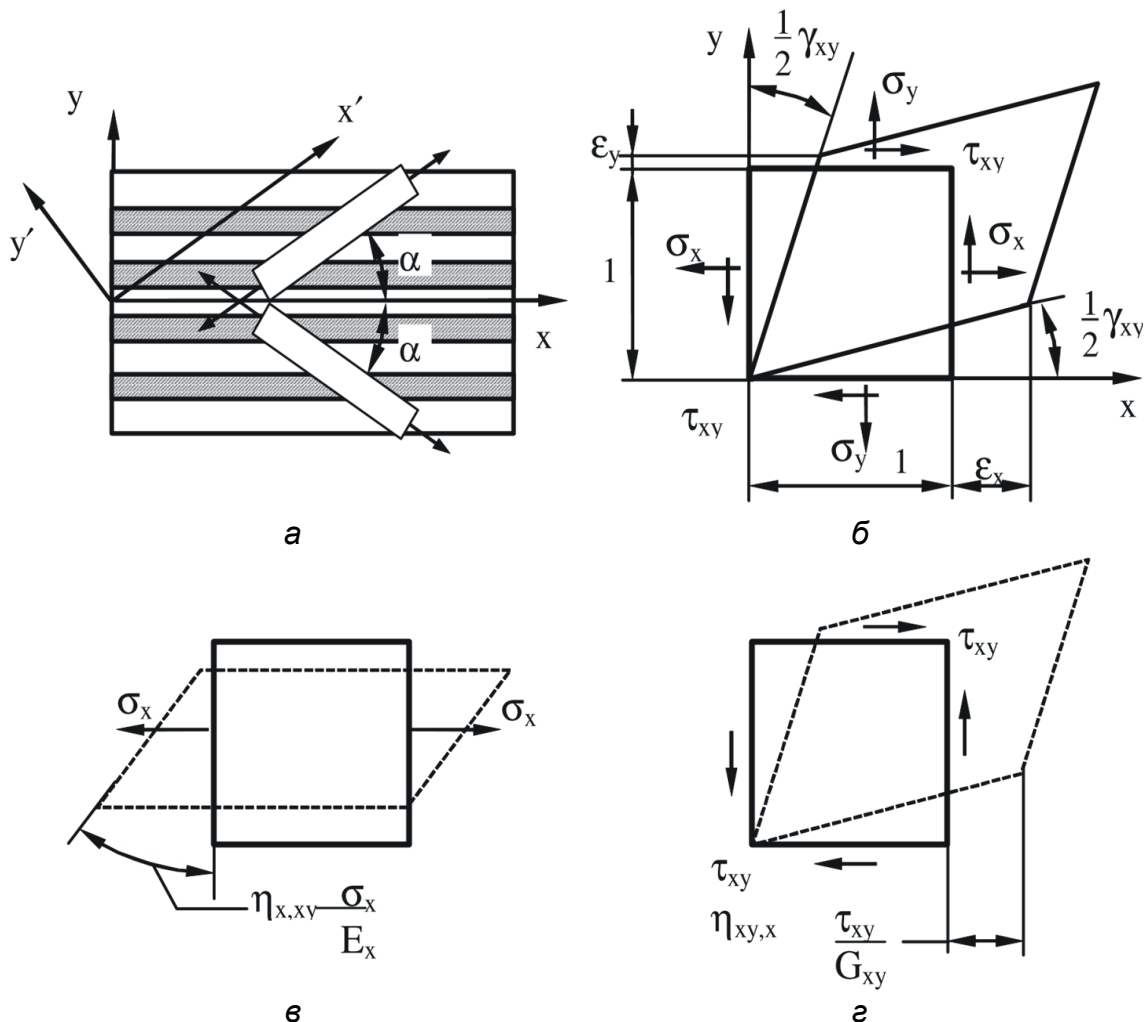


Рис. 5.2. Напруження, лінійні й кутові деформації в шаруватому КМ

Ураховуючи, що КМ використовуються в основному для виготовлення пластин, панелей, обшивок тощо, для забезпечення більшої доступності теоретичних викладок надалі розглядатимемо плоскі тіла, для яких

найважливішими є фізико-механічні властивості в площині xu .

На рис. 5.2, б показано загальноприйняті позначення напружень і деформацій і навіть їх додатні напрямки.

Рівняння фізичного закону для такого анізотропного тіла мають вигляд

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} + \eta_{xy,x} \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}; \\ \varepsilon_y &= -\mu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} + \eta_{xy,y} \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}; \\ \gamma_{xy} &= \eta_{x,xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \eta_{y,xy} \frac{\sigma_y}{E_y} + \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}},\end{aligned}\quad (5.2)$$

де E_x , E_y , G_{xy} – модулі зсуву матеріалу на розтягування (стискання) уздовж осей x та y , а також на зсув у площині xu ; μ_{xy} , μ_{yx} – коефіцієнти Пуассона (перший індекс означає напрямок дії нормальних напружень, другий – напрямок поперечної деформації); $\eta_{x,xy}$, $\eta_{y,xy}$ – коефіцієнти взаємного впливу першого роду, які характеризують ступінь деформування тіла на зсув від дії нормальних напружень (рис. 5.2, в); $\eta_{xy,x}$, $\eta_{xy,y}$ – коефіцієнти взаємного впливу першого роду, які характеризують ступінь деформування тіла по осях x та y від дії дотичних напружень (рис. 5.2, г).

У механіці деформованого твердого тіла є доказ положення про те, що коефіцієнти взаємного впливу першого роду для ортотропного в осях x , y тіла дорівнюють нулю. Тоді рівняння (5.2) набувають простішої форми:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y}; \quad \varepsilon_y = -\mu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}. \quad (5.3)$$

З рівнянь (5.2) і (5.3) випливає, що для того, щоб визначити деформації тіла за відомими напруженнями, необхідно знати величини E_x , E_y , G_{xy} , μ_{xy} , μ_{yx} , $\eta_{x,xy}$, $\eta_{y,xy}$, $\eta_{xy,x}$, $\eta_{xy,y}$, тобто модулі пружності, коефіцієнти Пуассона та коефіцієнти взаємного впливу першого роду, які для лінійно деформованих тіл вважаються такими, що не залежать від напружень. Тому їх називають пружними константами матеріалу.

З постулату про наявність пружного потенціалу твердого деформованого тіла випливають рівності

$$\frac{\mu_{xy}}{E_x} = \frac{\mu_{yx}}{E_y}; \quad \frac{\eta_{xy,x}}{G_{xy}} = \frac{\eta_{x,xy}}{E_x}; \quad \frac{\eta_{xy,y}}{G_{xy}} = \frac{\eta_{y,xy}}{E_y}. \quad (5.4)$$

З урахуванням цих рівнянь анізотропне плоске тіло можна охарактеризувати шістьма незалежними пружними константами, які необхідно вміти прогнозувати для відомих компонентів і структури КМ.

У загальному випадку методика прогнозування фізико-механічних

властивостей КМ зводиться до двох взаємозалежних завдань:

- визначення властивостей односпрямованого КМ в осях 1, 2 (рис. 5.3, а);
- визначення фізико-механічних властивостей пакета односпрямованих шарів із довільними кутами орієнтації відносно осей x , y (рис. 5.3, б).

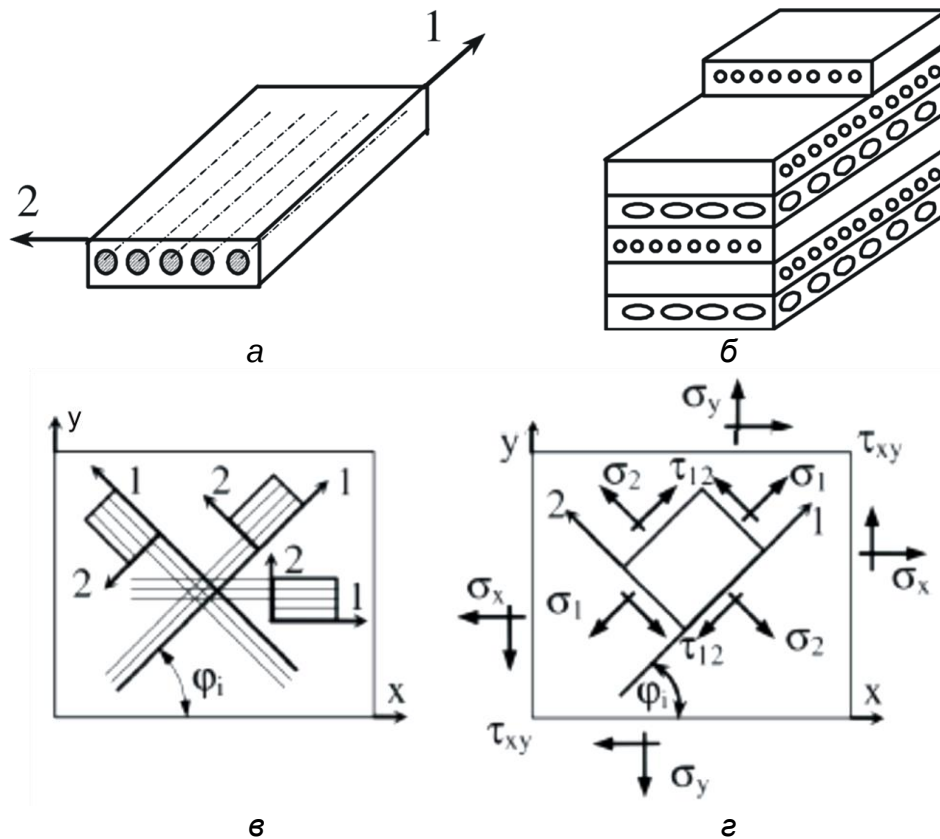


Рис. 5.3. До прогнозування властивостей шаруватих КМ

Для шаруватого КМ, що складається з довільної кількості односпрямованих шарів із кутами армування φ_i (додатні напрямки кутів φ_i відповідають повороту від осі x до осі 1 проти ходу годинникової стрілки) (рис. 5.3, в), уведемо глобальну систему координат x , y та місцеву (локальну) 1, 2 (рис. 5.3, в).

Модулі пружності та коефіцієнти Пуассона КМ не залежать від абсолютних значень товщини, а лише від їх співвідношення.

Розрахункові формули для визначення комплексу пружних констант шаруватого КМ довільної структури нині є класичними, і на їх основі проводяться всі розрахунки й проектування конструкцій з КМ. Їх виведення ґрунтується на тому, що в локальній системі координат кожен шар є ортотропним, тобто це не обов'язково односпрямований шар. Такими можуть бути: шари на основі тканих арматур; групи шарів, для яких осі 1, 2 є осями ортотропії, і в цих осях їх пружні властивості є відомими; плетені тканини, що мають найчастіше армування $[\pm\varphi]$, а також ізотропні матеріали, наприклад металеві листи.

Порядок виконання роботи

Для визначення інтегральних пружних властивостей композита з ортотропним розташуванням моношарів (див. рис. 5.3, в) використовується модель шаруватого композита.

Відповідно до вибраної моделі пружні константи кожного i -го моношару (у власній локальній системі координат) із заздалегідь заданим кутом армування φ_i вважаються відомими (наприклад, їх було визначено експериментально): E_{1i} , E_{2i} , G_{12i} , μ_{12i} , α_{1i} , α_{2i} . Крім того, відомими також є товщини окремих груп шарів δ_i і кількість груп шарів n у пакеті КМ (для цього завдання $n = 4$). Для визначення потрібних характеристик необхідно виконати такі операції:

1. Знайти вторинний коефіцієнт Пуассона μ_{21i} ($i = 1 \dots n$) за формулою

$$\mu_{21i} = \frac{E_{2i}}{E_{1i}} \mu_{12i}.$$

2. Визначити зведені модулі пружності для кожної групи шарів:

$$\bar{E}_{1i} = \frac{E_{1i}}{1 - \mu_{12i}\mu_{21i}}, \quad \bar{E}_{2i} = \frac{E_{2i}}{1 - \mu_{12i}\mu_{21i}}.$$

3. Розрахувати загальну товщину КМ, який складається з чотирьох типових груп шарів (з кутами армування 0° , 90° , $+\varphi^\circ$, $-\varphi^\circ$):

$$\delta_\Sigma = \sum_{i=1}^n \delta_i.$$

4. Знайти мембранні жорсткості пакета шарів ($A_{12} = A_{21}$):

$$A_{11} = \sum_{i=1}^n \delta_i \left[\bar{E}_{1i} \cos^4 \varphi_i + 2\bar{E}_{1i}\mu_{21i} \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + \bar{E}_{2i} \sin^4 \varphi_i + G_{12i} \sin^2(2\varphi_i) \right];$$

$$A_{12} = \sum_{i=1}^n \delta_i \left[\bar{E}_{1i}\mu_{21i} (\sin^4 \varphi_i + \cos^4 \varphi_i) + [0.25(\bar{E}_{1i} + \bar{E}_{2i}) - G_{12i}] \sin^2(2\varphi_i) \right];$$

$$A_{22} = \sum_{i=1}^n \delta_i \left[\bar{E}_{1i} \sin^4 \varphi_i + 2\bar{E}_{1i}\mu_{21i} \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + \bar{E}_{2i} \cos^4 \varphi_i + G_{12i} \sin^2(2\varphi_i) \right];$$

$$A_{33} = \sum_{i=1}^n \delta_i \left[(\bar{E}_{1i} + \bar{E}_{2i} - 2\bar{E}_{1i}\mu_{21i}) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + G_{12i} \cos^2(2\varphi_i) \right];$$

$$Q_{T1} = \sum_{i=1}^n \delta_i \left[\alpha_{1i} \bar{E}_{1i} (\cos^2 \varphi_i + \mu_{21i} \sin^2 \varphi_i) + \alpha_{2i} \bar{E}_{2i} (\sin^2 \varphi_i + \mu_{12i} \cos^2 \varphi_i) \right];$$

$$Q_{T2} = \sum_{i=1}^n \delta_i \left[\alpha_{1i} \bar{E}_{1i} (\sin^2 \varphi_i + \mu_{21i} \cos^2 \varphi_i) + \alpha_{2i} \bar{E}_{2i} (\cos^2 \varphi_i + \mu_{12i} \sin^2 \varphi_i) \right].$$

5. Визначити ефективні пружні характеристики композита (як пакета шарів КМ):

– модулі пружності: $E_x = \frac{1}{\delta_\Sigma} \left(A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} \right); E_y = \frac{1}{\delta_\Sigma} \left(A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right);$

– модуль зсуву: $G_{xy} = \frac{A_{33}}{\delta_\Sigma};$

– коефіцієнти Пуассона: $\mu_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{22}}; \mu_{yx} = \frac{A_{12}}{A_{11}};$

– коефіцієнти лінійного температурного розширення (КЛТР):

$$\alpha_x = \frac{Q_{T1}A_{22} - Q_{T2}A_{12}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}; \alpha_y = \frac{Q_{T2}A_{11} - Q_{T1}A_{12}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}.$$

Отримані результати необхідно занести до табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Пружні властивості шаруватого ортотропного композита

Властивості	E_x , ГПа	E_y , ГПа	G_{xy} , ГПа	μ_{xy}	μ_{yx}	α_x , 1/К	α_y , 1/К
Значення							

6. Дослідити залежність пружних властивостей шаруватого ортотропного КМ від кута армування φ . Для цього можна послідовно змінити значення кута φ в діапазоні від 0 до 90° з певним кроком (наприклад, 5°) і обчислити значення ефективних пружних характеристик композита, використовуючи наведену вище математичну модель (пункти 1–5). Результати аналізу занести до табл. 5.2, а також відобразити графічно на рис. 5.4.

7. Вихідні дані наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.2

Залежність пружних властивостей шаруватого ортотропного КМ від кута армування

Кут армування φ , град.	Пружні характеристики						
	E_x , ГПа	E_y , ГПа	G_{xy} , ГПа	μ_{xy}	μ_{yx}	α_x , 1/К	α_y , 1/К
0							
5							
10							
...							
80							
85							
90							

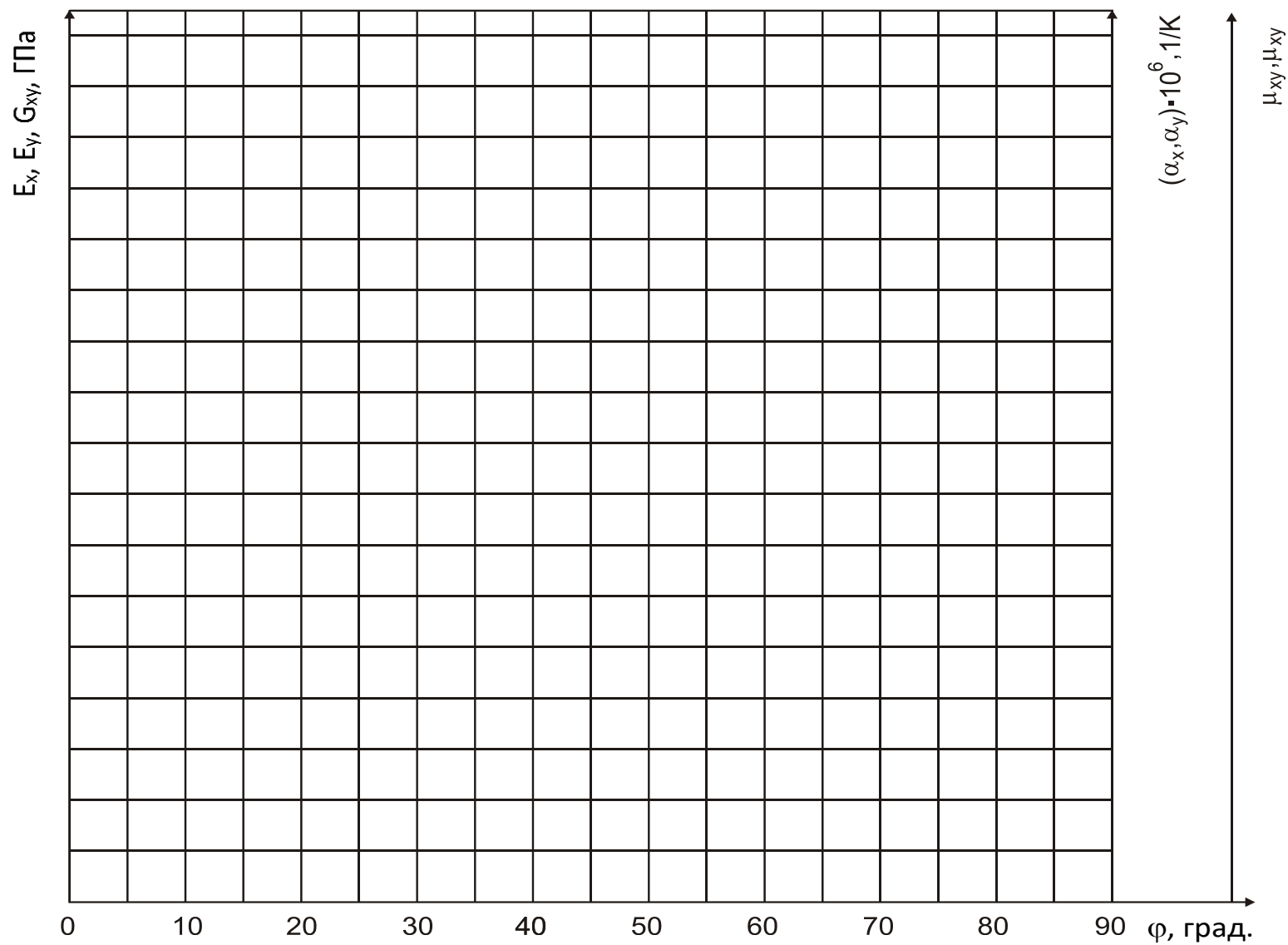


Рис. 5.4. Залежність пружних сталих шаруватого композита від кута армування:

1 – E_x ; 2 – E_y ; 3 – G_{xy} ; 4 – μ_{xy} ; 5 – μ_{yx} ; 6 – α_x ; 7 – α_y

Таблиця 5.3

Варіанти для аналізу

Номер варіанта	Схема армування пакета КМ	Номер матеріалу (табл. Д.1.1)	Номер варіанта	Схема армування пакета КМ	Номер матеріалу (табл. Д.1.1)
1	$[0_{10} / 90_{10} / +45_{17} / -45_{17}]$	1	14	$[0_{10} / 90_{10} / +18_{12} / -18_{12}]$	4
2	$[0_{15} / 90_{15} / +25_8 / -25_8]$	2	15	$[0_8 / 90_8 / +27_{14} / -27_{14}]$	3
3	$[0_{12} / 90_{12} / +15_{34} / -15_{34}]$	3	16	$[0_{13} / 90_{13} / +38_{23} / -38_{23}]$	2
4	$[0_{22} / 90_{22} / +45_{14} / -45_{14}]$	4	17	$[0_5 / 90_5 / +27_6 / -27_6]$	1
5	$[0_5 / 90_5 / +35_3 / -35_3]$	3	18	$[0_9 / 90_9 / +42_{15} / -42_{15}]$	1
6	$[0_8 / 90_8 / +10_7 / -10_7]$	2	19	$[0_{16} / 90_{16} / +15_{17} / -15_{17}]$	3
7	$[0_9 / 90_9 / +23_{32} / -23_{32}]$	1	20	$[0_7 / 90_7 / +26_{14} / -26_{14}]$	4
8	$[0_{24} / 90_{24} / +17_{11} / -17_{17}]$	4	21	$[0_{12} / 90_{12} / +24_{18} / -24_{18}]$	2
9	$[0_{15} / 90_{15} / +15_{13} / -15_{13}]$	2	22	$[0_{18} / 90_{18} / +36_{24} / -36_{24}]$	2
10	$[0_7 / 90_7 / +25_{12} / -25_{12}]$	3	23	$[0_{11} / 90_{11} / +12_9 / -12_9]$	3
11	$[0_{14} / 90_{14} / +35_9 / -35_9]$	4	24	$[0_{17} / 90_{17} / +35_{12} / -35_{12}]$	3
12	$[0_6 / 90_6 / +10_8 / -10_8]$	1	25	$[0_5 / 90_5 / +22_8 / -22_8]$	4
13	$[0_{12} / 90_{12} / +37_{11} / -37_{11}]$	2	26	$[0_{16} / 90_{16} / +38_{14} / -38_{14}]$	1

Примітка. Загалом схема армування пакета КМ (або інакше – структура КМ) позначається так: $[0_m / 90_n / +\varphi_k / -\varphi_j]$, де m, n, k, j – кількість моношарів у групах з армуванням $0^\circ, 90^\circ, +\varphi$ та $-\varphi$ відповідно, причому для забезпечення ортотропії КМ в осях x - y необхідно, щоб $k = j$.

Контрольні запитання

1. З яких етапів складається процедура прогнозування фізико-механічних властивостей КМ?
2. Які композити називають шаруватими і в чому полягає їх особливість?
3. У чому полягає відмінність ізотропного й ортотропного матеріалів з огляду на розрахунки пружних характеристик?
4. Як залежать ефективні пружні характеристики шаруватого КМ від значення сумарної товщини пакета шарів?

Практична робота № 6

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШАРУВАТОГО ОРТОТРОПНОГО КОМПОЗИТА

Мета роботи:

1. Набуття практичних навичок щодо визначення міцності шаруватого ортотропного композита.
2. Дослідження залежності міцнісних властивостей шаруватого ортотропного композита від кутів армування моношарів.

Теоретичні відомості

Проектуючи будь-яку конструкцію, інженер має не тільки оцінити її роботоздатність з функціональної точки зору, але й визначити її міцність (або запас міцності) при розрахунковому рівні експлуатаційних навантажень. Найбільш достовірним способом оцінювання міцності конструкції є експеримент, у процесі якого намагаються відтворити реальні умови експлуатації. Але провести випробування конструкції не завжди можливо як через великі габарити (наприклад, корабель, літак, міст та ін.), так і через невідомість або невизначеність умов і характеру її навантаження. На основі розрахункових схем (моделей), що найбільш точно описують напружено-деформований стан конструкції (стержень, балка, пластина та ін.), аналітичними методами визначають діючі напруження і після їх порівняння з механічними властивостями матеріалу роблять висновок про роботоздатність виробу.

Міцність конструкцій з однорідних матеріалів при простих схемах навантаження (розтягування, стиснення, кручення) можна оцінити шляхом порівняння обчислених напружень з границею плинності або міцності, яка визначається експериментально. При складних видах навантаження (наприклад, розтяг зі стиском або зсувом) використовуються теорії міцності, які базуються на великих обсягах теоретичних та експериментальних досліджень. У загальному випадку теорії міцності дають змогу прогнозувати несну здатність конструкції та її елементів під спільною дією декількох видів навантажень при відомих характеристиках міцності матеріалу для простих випадків навантаження (границі міцності на розтяг, стиск, зсув).

Поняття міцності безпосередньо пов'язане з поняттям руйнування, оскільки міцність – це здатність конструкції витримувати заданий рівень механічного (термомеханічного) навантаження без руйнування. Конструкція є міцною до появи першої ознаки руйнування, а руйнування – це верхня межа несної здатності конструкції, що містить безліч аспектів, пов'язаних з руйнуванням матеріалу від розтріскування, втрати стійкості, втоми тощо.

Опис процесу руйнування КМ ускладнюється через безліч окремих і сумісних форм руйнування, таких як злам волокон, розшарування, порушення адгезії волокна й матриці, розтріскування сполучного через усадку і

(або) температурні напруження, неякісне просочення тощо. Перелічені явища, що супроводжують руйнування, настільки ускладнюють розгляд проблеми на мікрорівні (на рівні взаємодії волокна з матрицею), що інженерний критерій руйнування або критерій міцності, що є аналогом відомих теорій міцності, не може бути побудований на основі аналізу механізму виявлення і взаємодії всіх цих явищ.

Інженерні критерії міцності будують на основі даних про поведінку й міцність макрооб'ємів матеріалу, тобто такі критерії мають феноменологічний характер. Критерії міцності (руйнування) розробляють для того, щоб оцінити несну здатність матеріалу при складному напруженому стані. Найбільш важливими вимогами до критеріїв міцності є досить точний опис експериментальних результатів і простота використання. Усі інженерні критерії нині є феноменологічними (явища, що мають місце на мікрорівні, впливають на властивості макрооб'єму матеріалу).

Єдиного підходу до побудови критеріїв руйнування КМ немає. Це зумовлено, по-перше, складністю механізмів руйнування КМ, по-друге, залежністю властивостей КМ від технології підготовки компонентів і виготовлення деталей і, по-третє, недостатнім обсягом статистичних експериментальних даних.

Сьогодні найбільшого поширення набули два підходи до дослідження міцності шаруватих КМ. Згідно з першим підходом, коли матеріал складається з однорідних, ортотропних, зв'язаних між собою шарів, *критерій міцності записується послідовно для кожного шару*. Гранична несна здатність КМ (пакета шарів) визначається як початок руйнування будь-якого окремого шару. Для математичного опису критерію міцності моношару необхідно знати чотири пружні константи КМ (модулі пружності на розтяг-стиск у двох напрямках, модуль зсуву й один з коефіцієнтів Пуассона), п'ять характеристик міцності (границі міцності на розтяг і стиск у двох напрямках і міцність на зсув). Усі ці дані можна визначити аналітично, узяти з паспортних даних на матеріал або провести відповідні механічні випробування. Недолік цього підходу полягає в тому, що неможливо визначити властивості міцності пакета в цілому, які є визначальними при виборі класу конструкційних матеріалів.

Згідно з другим підходом пакет шарів розглядається як однорідний та ізотропний матеріал, а *критерій міцності записується для всього пакета*. У цьому випадку необхідно знати шість ефективних пружних констант КМ як пакета шарів (модулі пружності на розтяг-стиск у двох напрямках і на зсув, коефіцієнти Пуассона та взаємного впливу), п'ять міцнісних характеристик (границі міцності на розтяг-стиск у двох напрямках і на зсув) і деяку функціональну залежність між міцнісними й пружними властивостями. Зі сказаного випливає, що використання такого підходу на етапі проектування структури КМ є можливим лише в тому випадку, коли є методика прогнозування характеристик міцності пакета КМ.

У процесі проектування композитних конструкцій необхідно розглядати декілька структур КМ (схем армування) і матеріалів компонентів для того, щоб мати змогу вибрати оптимальний варіант, тому необхідними є методи прогнозування властивостей КМ на різних рівнях – окремого шару й пакета в цілому.

Поняття несної здатності конструкції містить багато аспектів – власне міцність, стійкість, жорсткість, довговічність, надійність, живучість та інші, але забезпечення несної здатності починається із забезпечення умов міцності, суть яких полягає в тому, що в жодній точці конструкції матеріал не має руйнуватися. У зв'язку з цим розрахунок на міцність конструкції з КМ полягає в тому, що при заданому напруженому стані (рис. 6.1) необхідно визначити, відбувається чи ні руйнування матеріалу. При цьому відомими вважаються структура пакета КМ (схема армування), фізико-механічні властивості окремих шарів і зусилля, що діють на пакет у цілому.

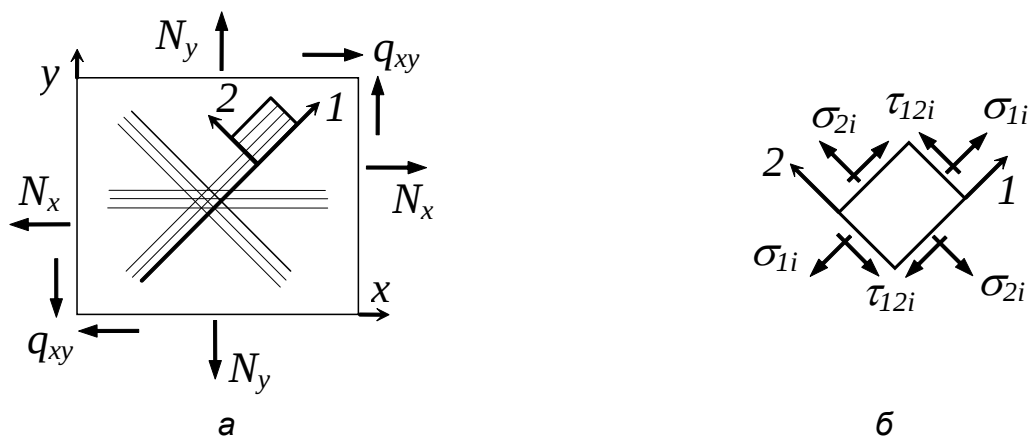


Рис. 6.1. Напружений стан пакета КМ (а) та окремого шару (б)

У загальному випадку кожен шар перебуває в умовах складного напруженого стану (рис. 6.1, б), і для оцінювання його міцності використовуються критерії, яких до теперішнього часу розроблено досить багато, але найбільшого поширення набули три критерії.

1. *Критерій максимальних напружень*, який полягає в тому, що жоден шар у жодному з напрямків не має руйнуватися, тобто необхідно, щоб виконувались умови

$$|\sigma_{1i}| \leq F_{1i}; \quad |\sigma_{2i}| \leq F_{2i}; \quad |\tau_{12i}| \leq F_{12i}, \quad (6.1)$$

де F_{1i} , F_{2i} , F_{12i} – границі міцності по осях ортотропії 1, 2 (див. рис. 6.1, б) і на зсув, причому

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip}, & \text{якщо } \sigma_{1i} \geq 0; \\ F_{1ic}, & \text{якщо } \sigma_{1i} < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip}, & \text{якщо } \sigma_{2i} > 0; \\ F_{2ic}, & \text{якщо } \sigma_{2i} < 0. \end{cases} \quad (6.2)$$

Тут індекси «р» і «с» означають розтягування та стиснення.

2. *Критерій максимальних деформацій*, який полягає в тому, що деформації жодного шару в жодному з напрямків не мають перевищувати граничних значень, тобто якщо поведження КМ до руйнування вважати лінійним:

$$|\varepsilon_{1i}| \leq \frac{F_{1i}}{E_{1i}}; \quad |\varepsilon_{2i}| \leq \frac{F_{2i}}{E_{2i}}; \quad |\gamma_{12i}| \leq \frac{F_{12i}}{G_{12i}}, \quad (6.3)$$

або з урахуванням фізичного закону для окремого шару в осях ортотропії 1, 2:

$$\begin{aligned} |\sigma_{1i} - \mu_{12i}\sigma_{2i}| &\leq F_{1i}; \\ |\sigma_{2i} - \mu_{21i}\sigma_{1i}| &\leq F_{2i}; \\ |\tau_{12i}| &\leq F_{12i}, \end{aligned} \quad (6.4)$$

де F_{1i}, F_{2i} – величини, які визначають за правилом (6.2).

3. *Енергетичний критерій Мізеса – Хілла*, який ґрунтується на тому, що питома енергія деформації не має перевищувати свого граничного значення. Математичний запис цього критерію має вигляд

$$\frac{\sigma_{1i}^2}{F_{1i}^2} - \frac{\sigma_{1i}\sigma_{2i}}{F_{1i}F_{2i}} + \frac{\sigma_{2i}^2}{F_{2i}^2} + \frac{\tau_{12i}^2}{F_{12i}^2} \leq 1. \quad (6.5)$$

Для деяких КМ застосовуються інші критерії міцності, але їх реалізація принципово не відрізняється від наведених вище.

Для прогнозування характеристик міцності шаруватих КМ довільної структури за наведеними вище критеріями необхідно виразити напруження σ_{1i}, σ_{2i} і τ_{12i} через σ_x, σ_y і τ_{xy} . Для цього через статичну невизначеність більшості шаруватих КМ (у яких кількість окремих груп шарів – більше одиниці) слід застосувати умови сумісності деформацій.

У випадку, коли структура пакета та фізико-механічні властивості всіх моношарів є відомими, спочатку обчислюють ефективні пружні константи КМ $E_x, E_y, G_{xy}, \mu_{xy}, \mu_{yx}, \eta_{x,xy}, \eta_{y,xy}, \eta_{xy,x}, \eta_{xy,y}$, а потім – деформації пакета $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ (див. формули (5.2)):

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} + \eta_{xy,x} \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}; \\ \varepsilon_y &= -\mu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} + \eta_{xy,y} \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}; \\ \gamma_{xy} &= \eta_{x,xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \eta_{y,xy} \frac{\sigma_y}{E_y} + \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Визначимо деформації кожного шару в місцевій (зв'язаній) системі координат 1–2 за такими формулами:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1i} &= \varepsilon_{xi} \cos^2 \varphi_i + \varepsilon_{yi} \sin^2 \varphi_i + \gamma_{xyi} \sin \varphi_i \cos \varphi_i; \\ \varepsilon_{2i} &= \varepsilon_{xi} \sin^2 \varphi_i + \varepsilon_{yi} \cos^2 \varphi_i - \gamma_{xyi} \sin \varphi_i \cos \varphi_i; \\ \gamma_{12i} &= (\varepsilon_{yi} - \varepsilon_{xi}) \sin 2\varphi_i + \gamma_{xyi} \cos 2\varphi_i.\end{aligned}\quad (6.7)$$

Ураховуючи, що всі шари в пакеті деформуються суцільно ($\varepsilon_{xi} = \varepsilon_x$; $\varepsilon_{yi} = \varepsilon_y$; $\gamma_{xyi} = \gamma_{xy}$), рівняння (6.7) після підстановки виразів для деформацій пакета (6.6) набувають такого вигляду:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1i} &= \frac{\sigma_x}{E_x} (\cos^2 \varphi_i - \mu_{xy} \sin^2 \varphi_i + \eta_{x,xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i) + \\ &+ \frac{\sigma_y}{E_y} (\sin^2 \varphi_i - \mu_{yx} \cos^2 \varphi_i + \eta_{y,xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i) + \\ &+ \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} (\eta_{xy,x} \cos^2 \varphi_i + \eta_{xy,y} \sin^2 \varphi_i + \sin \varphi_i \cos \varphi_i); \\ \varepsilon_{2i} &= \frac{\sigma_x}{E_x} (\sin^2 \varphi_i - \mu_{xy} \cos^2 \varphi_i - \eta_{x,xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i) + \\ &+ \frac{\sigma_y}{E_y} (\cos^2 \varphi_i - \mu_{yx} \sin^2 \varphi_i - \eta_{y,xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i) + \\ &+ \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} (\eta_{xy,x} \sin^2 \varphi_i + \eta_{xy,y} \cos^2 \varphi_i - \sin \varphi_i \cos \varphi_i); \\ \gamma_{12i} &= \frac{\sigma_x}{E_x} [-\sin 2\varphi_i (1 + \mu_{xy}) + \eta_{x,xy} \cos 2\varphi_i] + \\ &+ \frac{\sigma_y}{E_y} [(1 + \mu_{yx}) \sin 2\varphi_i + \eta_{y,xy} \cos 2\varphi_i] + \\ &+ \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} [(\eta_{xy,y} - \eta_{xy,x}) \sin 2\varphi_i + \cos 2\varphi_i],\end{aligned}\quad (6.8)$$

або після введення додаткових коефіцієнтів перетворення a_{kj} :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1i} &= \sigma_x a_{11i} + \sigma_y a_{12i} + \tau_{xy} a_{13i}; \\ \varepsilon_{2i} &= \sigma_x a_{21i} + \sigma_y a_{22i} + \tau_{xy} a_{23i}; \\ \gamma_{12i} &= \sigma_x a_{31i} + \sigma_y a_{32i} + \tau_{xy} a_{33i}.\end{aligned}\quad (6.9)$$

З рівнянь фізичного закону для окремого шару в осях ортотропії 1, 2

$$\begin{aligned}\sigma_{1i} &= \bar{E}_{1i}(\varepsilon_{1i} + \mu_{21i}\varepsilon_{2i}); \\ \sigma_{2i} &= \bar{E}_{2i}(\varepsilon_{2i} + \mu_{12i}\varepsilon_{1i}); \\ \tau_{12i} &= G_{12i}\gamma_{12i}\end{aligned}\quad (6.10)$$

знайдемо вирази для напружень σ_{1i} , σ_{2i} і τ_{12i} :

$$\begin{aligned}\sigma_{1i} &= \bar{E}_{1i}[\sigma_x(a_{11i} + \mu_{21i}a_{21i}) + \sigma_y(a_{12i} + \mu_{21i}a_{22i}) + \tau_{xy}(a_{13i} + \mu_{21i}a_{23i})]; \\ \sigma_{2i} &= \bar{E}_{2i}[\sigma_x(\mu_{12i}a_{11i} + a_{21i}) + \sigma_y(\mu_{12i}a_{12i} + a_{22i}) + \tau_{xy}(\mu_{12i}a_{13i} + a_{23i})]; \\ \tau_{12i} &= G_{12i}(\sigma_x a_{31i} + \sigma_y a_{32i} + \tau_{xy} a_{33i}).\end{aligned}\quad (6.11)$$

Формули для обчислення коефіцієнтів перетворення a_{kj} для шарів в ортотропному пакеті КМ наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Коефіцієнти перетворення a_{kj} для ортотропного пакета КМ

a_{11i}	a_{12i}	a_{13i}
$\frac{1}{E_x}(\cos^2 \varphi_i - \mu_{xy} \sin^2 \varphi_i)$	$\frac{1}{E_y}(\sin^2 \varphi_i - \mu_{yx} \cos^2 \varphi_i)$	$\frac{\sin 2\varphi_i}{2G_{xy}}$
a_{21i}	a_{22i}	a_{23i}
$\frac{1}{E_x}(\sin^2 \varphi_i - \mu_{xy} \cos^2 \varphi_i)$	$\frac{1}{E_y}(\cos^2 \varphi_i - \mu_{yx} \sin^2 \varphi_i)$	$-\frac{\sin 2\varphi_i}{2G_{xy}}$
a_{31i}	a_{32i}	a_{33i}
$-\frac{1}{E_x}(1 + \mu_{xy})\sin 2\varphi_i$	$\frac{1}{E_y}(1 + \mu_{yx})\sin 2\varphi_i$	$\frac{\cos 2\varphi_i}{G_{xy}}$

Загальна процедура визначення будь-якої границі міцності пакета КМ у цілому (F_{xp} , F_{xc} , F_{yp} , F_{yc} , F_{xy}) полягає в тому, що після відкидання відповідних компонент зовнішніх напружень $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ вирази (6.9) або (6.11) підставляють у критерії (6.1), (6.3), (6.5), з яких впливають системи нерівностей для визначення границь міцності.

Порядок виконання роботи

1. Використовуючи характеристики й послідовність укладання шарів ортотропного шаруватого композита, який аналізувався в попередній практичній роботі «Методика визначення пружних констант шаруватого

композита», визначити міцнісні властивості ($F_{xp}, F_{xc}, F_{yp}, F_{yc}, F_{xy}$) шаруватого композита. Уважається, що пружні характеристики моношарів і пружні характеристики всього пакета композита в глобальних осях ($E_x, E_y, G_{xy}, \mu_{xy}, \mu_{yx}$) є відомими за результатами виконання попередньої роботи.

Варіанти для аналізу наведено в табл. 6.2. У варіантах для визначення критеріїв міцності використано такі позначення: М- σ – критерій максимальних напружень; М- ε – критерій максимальних деформацій; М-Н – критерій Мізеса – Хілла.

2. Визначити міцнісні властивості ортотропного шаруватого композита $F_{xp}, F_{xc}, F_{yp}, F_{yc}, F_{xy}$ за критерієм максимальних напружень.

Міцність при розтягуванні/стисканні вздовж осі x:

$$F_{x(p.c)} = \min_{(i)} \left[\frac{F_{1i}}{\bar{E}_{1i} |a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}|}; \frac{F_{2i}}{\bar{E}_{2i} |\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i}|}; \frac{F_{12i}}{G_{12i} |a_{31i}|} \right].$$

Для визначення міцності F_{xp} за правилом знаків (6.2) вибирають такі числові значення границь міцності окремих шарів в осях 1–2:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} & \text{при } (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}) \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i}) \geq 0; \\ F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i}) < 0, \end{cases}$$

а для визначення міцності F_{xc} використовують такі умови:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ic} & \text{при } (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}) \geq 0; \\ F_{1ip} & \text{при } (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i}) \geq 0; \\ F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i}) < 0. \end{cases}$$

Міцність при розтягуванні/стисканні вздовж осі y:

$$F_{y(p.c)} = \min_{(i)} \left[\frac{F_{1i}}{\bar{E}_{1i} |a_{12i} + \mu_{21i} a_{22i}|}; \frac{F_{2i}}{\bar{E}_{2i} |\mu_{12i} a_{12i} + a_{22i}|}; \frac{F_{12i}}{G_{12i} |a_{32i}|} \right].$$

Для визначення міцності F_{yp} за правилом знаків вибирають такі числові значення границь міцності окремих шарів в осях 1–2:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} & \text{при } (a_{12i} + \mu_{21i} a_{22i}) \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } (a_{12i} + \mu_{21i} a_{22i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i} a_{12i} + a_{22i}) \geq 0; \\ F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i} a_{12i} + a_{22i}) < 0, \end{cases}$$

а для визначення міцності F_{yc} використовують такі умови:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ic} & \text{при } (a_{12i} + \mu_{21i} a_{22i}) \geq 0; \\ F_{1ip} & \text{при } (a_{12i} + \mu_{21i} a_{22i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i} a_{12i} + a_{22i}) \geq 0; \\ F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i} a_{12i} + a_{22i}) < 0. \end{cases}$$

Таблиця 6.2

Варіанти для аналізу

Номер варіанта	Схема армування пакета КМ	Номер матеріалу (табл. Д.1.1)	Критерій міцності	Номер варіанта	Схема армування пакета КМ	Номер матеріалу (табл. Д.1.1)	Критерій міцності
1	[0 ₁₀ / 90 ₁₀ / +45 ₁₇ / -45 ₁₇]	1	М-σ	14	[0 ₁₀ / 90 ₁₀ / +18 ₁₂ / -18 ₁₂]	4	М-Н
2	[0 ₁₅ / 90 ₁₅ / +25 ₈ / -25 ₈]	2	М-ε	15	[0 ₈ / 90 ₈ / +27 ₁₄ / -27 ₁₄]	3	М-ε
3	[0 ₁₂ / 90 ₁₂ / +15 ₃₄ / -15 ₃₄]	3	М-Н	16	[0 ₁₃ / 90 ₁₃ / +38 ₂₃ / -38 ₂₃]	2	М-σ
4	[0 ₂₂ / 90 ₂₂ / +45 ₁₄ / -45 ₁₄]	4	М-Н	17	[0 ₅ / 90 ₅ / +27 ₆ / -27 ₆]	1	М-Н
5	[0 ₅ / 90 ₅ / +35 ₃ / -35 ₃]	3	М-σ	18	[0 ₉ / 90 ₉ / +42 ₁₅ / -42 ₁₅]	1	М-ε
6	[0 ₈ / 90 ₈ / +10 ₇ / -10 ₇]	2	М-σ	19	[0 ₁₆ / 90 ₁₆ / +15 ₁₇ / -15 ₁₇]	3	М-σ
7	[0 ₉ / 90 ₉ / +23 ₃₂ / -23 ₃₂]	1	М-σ	20	[0 ₇ / 90 ₇ / +26 ₁₄ / -26 ₁₄]	4	М-ε
8	[0 ₂₄ / 90 ₂₄ / +17 ₁₁ / -17 ₁₇]	4	М-ε	21	[0 ₁₂ / 90 ₁₂ / +24 ₁₈ / -24 ₁₈]	2	М-σ
9	[0 ₁₅ / 90 ₁₅ / +15 ₁₃ / -15 ₁₃]	2	М-ε	22	[0 ₁₈ / 90 ₁₈ / +36 ₂₄ / -36 ₂₄]	2	М-Н
10	[0 ₇ / 90 ₇ / +25 ₁₂ / -25 ₁₂]	3	М-σ	23	[0 ₁₁ / 90 ₁₁ / +12 ₉ / -12 ₉]	3	М-ε
11	[0 ₁₄ / 90 ₁₄ / +35 ₉ / -35 ₉]	4	М-Н	24	[0 ₁₇ / 90 ₁₇ / +35 ₁₂ / -35 ₁₂]	3	М-σ
12	[0 ₆ / 90 ₆ / +10 ₈ / -10 ₈]	1	М-ε	25	[0 ₅ / 90 ₅ / +22 ₈ / -22 ₈]	4	М-σ
13	[0 ₁₂ / 90 ₁₂ / +37 ₁₁ / -37 ₁₁]	2	М-σ	26	[0 ₁₆ / 90 ₁₆ / +38 ₁₄ / -38 ₁₄]	1	М-ε

Міцність при зсуві в площині xy :

$$F_{xy}^{(+,-)} = \min_{(i)} \left[\frac{F_{1i}}{\bar{E}_{1i} |a_{13i} + \mu_{21i} a_{23i}|}; \frac{F_{2i}}{\bar{E}_{2i} |\mu_{12i} a_{13i} + a_{23i}|}; \frac{F_{12i}}{G_{12i} |a_{33i}|} \right].$$

Для визначення міцності $F_{xy}^{(+)}$ використовують правило

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} & \text{при } (a_{13i} + \mu_{21i} a_{23i}) \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } (a_{13i} + \mu_{21i} a_{23i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i} a_{13i} + a_{23i}) \geq 0; \\ F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i} a_{13i} + a_{23i}) < 0, \end{cases}$$

а для визначення міцності $F_{xy}^{(-)}$ – такі умови:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ic} & \text{при } (a_{13i} + \mu_{21i} a_{23i}) > 0; \\ F_{1ip} & \text{при } (a_{13i} + \mu_{21i} a_{23i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i} a_{13i} + a_{23i}) \geq 0; \\ F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i} a_{13i} + a_{23i}) < 0. \end{cases}$$

Тоді
$$F_{xy} = \min[F_{xy}^{(+)}, F_{xy}^{(-)}].$$

Визначити характер руйнування пакета шарів КМ і зробити висновок, у якому зазначити групу шарів (з армуванням 0° , 90° , $+\varphi$ та $-\varphi$ відповідно), у якій є потенційно можливим початок руйнування і від яких напружень (поздовжніх, поперечних чи зсувних).

3. Визначити міцнісні властивості ортотропного шаруватого композита $F_{xp}, F_{xc}, F_{yp}, F_{yc}, F_{xy}$ за критерієм максимальних деформацій.

Міцність при розтягуванні/стисканні вздовж осі x :

$$F_{x(p,c)} = \min_{(i)} \left[\frac{F_{1i}}{\bar{E}_{1i}|a_{11i}|}; \frac{F_{2i}}{\bar{E}_{2i}|a_{21i}|}; \frac{F_{12i}}{G_{12i}|a_{31i}|} \right].$$

Для прогнозування міцності F_{xp} за правилом знаків вибирають такі числові значення границь міцності окремих шарів в осях 1–2:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} & \text{при } a_{11i} \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } a_{11i} < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} & \text{при } a_{21i} \geq 0; \\ F_{2ic} & \text{при } a_{21i} < 0, \end{cases}$$

а для визначення міцності F_{xc} – такі умови:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ic} & \text{при } a_{11i} \geq 0; \\ F_{1ip} & \text{при } a_{11i} < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ic} & \text{при } a_{21i} \geq 0; \\ F_{2ip} & \text{при } a_{21i} < 0. \end{cases}$$

Міцність при розтягуванні/стисканні вздовж осі y :

$$F_{y(p,c)} = \min_{(i)} \left[\frac{F_{1i}}{\bar{E}_{1i}|a_{12i}|}; \frac{F_{2i}}{\bar{E}_{2i}|a_{22i}|}; \frac{F_{12i}}{G_{12i}|a_{32i}|} \right].$$

Для визначення міцності F_{yp} за правилом знаків вибирають такі числові значення границь міцності окремих шарів в осях 1–2:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} & \text{при } a_{12i} \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } a_{12i} < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} & \text{при } a_{22i} \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } a_{22i} < 0, \end{cases}$$

а для визначення міцності F_{yc} – такі умови:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ic} & \text{при } a_{12i} \geq 0; \\ F_{1ip} & \text{при } a_{12i} < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ic} & \text{при } a_{22i} \geq 0; \\ F_{1ip} & \text{при } a_{22i} < 0. \end{cases}$$

Міцність при зсуві в площині xy :

$$F_{xy}^{(+,-)} = \min_{(i)} \left[\frac{F_{1i}}{\bar{E}_{1i}|a_{13i}|}; \frac{F_{2i}}{\bar{E}_{2i}|a_{23i}|}; \frac{F_{12i}}{G_{12i}|a_{33i}|} \right].$$

Для визначення міцності $F_{xy}^{(+)}$ використовують правило знаків

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} & \text{при } a_{13i} \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } a_{13i} < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} & \text{при } a_{23i} \geq 0; \\ F_{2ic} & \text{при } a_{23i} < 0, \end{cases}$$

а для визначення міцності $F_{xy}^{(-)}$ – такі умови:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ic} & \text{при } a_{13i} \geq 0; \\ F_{1ip} & \text{при } a_{13i} < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ic} & \text{при } a_{23i} \geq 0; \\ F_{2ip} & \text{при } a_{23i} < 0. \end{cases}$$

Тоді
$$F_{xy} = \min[F_{xy}^{(+)}, F_{xy}^{(-)}].$$

Визначити характер руйнування пакета шарів КМ і зробити висновок, у якому зазначити групу шарів (з армуванням 0° , 90° , $+\varphi$ та $-\varphi$ відповідно), у якій є потенційно можливим початок руйнування і від яких напружень (поздовжніх, поперечних чи зсувних).

4. Визначити міцнісні властивості ортотропного шаруватого композита F_{xp} , F_{xc} , F_{yp} , F_{yc} , F_{xy} за критерієм Мізеса – Хілла:

Міцність при розтягуванні/стисканні вздовж осі x:

$$F_{x(p,c)} = \min_{(i)} \left[\frac{\bar{E}_{1i}^2 (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i})^2}{F_{1i}^2} + \frac{\bar{E}_{2i}^2 (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i})^2}{F_{2i}^2} - \frac{\bar{E}_{1i} \bar{E}_{2i} (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}) (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i})}{F_{1i} F_{2i}} + \frac{G_{12i}^2 a_{31i}^2}{F_{12i}^2} \right]^{-0.5}.$$

Для визначення F_{xp} використовують правило знаків:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} & \text{при } (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}) \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i}) \geq 0; \\ F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i}) < 0, \end{cases}$$

а для визначення F_{xc} – такі умови:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ic} & \text{при } (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}) \geq 0; \\ F_{1ip} & \text{при } (a_{11i} + \mu_{21i} a_{21i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i}) \geq 0; \\ F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i} a_{11i} + a_{21i}) < 0. \end{cases}$$

Міцність при розтягуванні/стисканні вздовж осі y:

$$F_{y(p,c)} = \min_{(i)} \left[\frac{\bar{E}_{1i}^2 (a_{12i} + \mu_{21i} a_{22i})^2}{F_{1i}^2} + \frac{\bar{E}_{2i}^2 (\mu_{12i} a_{12i} + a_{22i})^2}{F_{2i}^2} - \frac{\bar{E}_{1i} \bar{E}_{2i} (a_{12i} + \mu_{21i} a_{22i}) (\mu_{12i} a_{12i} + a_{22i})}{F_{1i} F_{2i}} + \frac{G_{12i}^2 a_{32i}^2}{F_{12i}^2} \right]^{-0.5}.$$

Для визначення міцності F_{yp} за правилом знаків вибирають такі числові значення границь міцності окремих шарів в осях 1–2:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} & \text{при } (a_{12i} + \mu_{21i}a_{22i}) \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } (a_{12i} + \mu_{21i}a_{22i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i}a_{12i} + a_{22i}) \geq 0; \\ F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i}a_{12i} + a_{22i}) < 0, \end{cases}$$

а для визначення міцності F_{yc} – такі умови:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ic} & \text{при } (a_{12i} + \mu_{21i}a_{22i}) \geq 0; \\ F_{1ip} & \text{при } (a_{12i} + \mu_{21i}a_{22i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i}a_{12} + a_{22i}) \geq 0; \\ F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i}a_{12} + a_{22i}) < 0. \end{cases}$$

Міцність при зсуві в площині xy :

$$F_{xy}^{(+,-)} = \min_{(i)} \left[\frac{\bar{E}_{1i}^2 (a_{13i} + \mu_{21i}a_{23i})^2}{F_{1i}^2} + \frac{\bar{E}_{2i}^2 (\mu_{12i}a_{13i} + a_{23i})^2}{F_{2i}^2} - \frac{\bar{E}_{1i}\bar{E}_{2i}(a_{13i} + \mu_{21i}a_{22i})(\mu_{12i}a_{13i} + a_{23i})}{F_{1i}F_{2i}} + \frac{G_{12i}^2 a_{323}^2}{F_{12i}^2} \right]^{-0.5}.$$

Для визначення міцності $F_{xy}^{(+)}$ використовують правило знаків:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} & \text{при } (a_{13i} + \mu_{21i}a_{23i}) \geq 0; \\ F_{1ic} & \text{при } (a_{13i} + \mu_{21i}a_{23i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i}a_{13i} + a_{23i}) \geq 0; \\ F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i}a_{13i} + a_{23i}) < 0, \end{cases}$$

а для визначення міцності $F_{xy}^{(-)}$ – такі умови:

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ic} & \text{при } (a_{13i} + \mu_{21i}a_{23i}) > 0; \\ F_{1ip} & \text{при } (a_{13i} + \mu_{21i}a_{23i}) < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ic} & \text{при } (\mu_{12i}a_{13} + a_{23i}) \geq 0; \\ F_{2ip} & \text{при } (\mu_{12i}a_{13} + a_{23i}) < 0. \end{cases}$$

Тоді
$$F_{xy} = \min[F_{xy}^{(+)}, F_{xy}^{(-)}].$$

Слід зазначити, що критерій Мізеса – Хілла не дає змоги зробити висновки про характер руйнування пакета композита.

5. Деякі проміжні результати розрахунку слід занести до табл. 6.3 та 6.4.

6. Дослідити залежність міцнісних властивостей шаруватого ортотропного композита від кута армування φ (перші дві групи шарів з кутами армування 0° та 90° не змінюються). Результати досліджень занести до табл. 6.5.

7. Зробити висновок про характер руйнування композита:

- група шарів (з яким кутом армування), яка руйнується першою (0° , 90° чи $\pm\varphi$);

- характер руйнування шарів з найменшою міцністю: уздовж волокон, поперек волокон чи за зсувною модою руйнування.

Для повноцінної характеристики структури пакета КМ необхідно оцінити відносні значення товщини кожної з трьох груп шарів (0° , 90° , $\pm\varphi$):

$$\psi_1 = \frac{n_1}{\sum_1 n_i}; \quad \psi_2 = \frac{n_2}{\sum_1 n_i}; \quad \psi_{3-4} = \frac{n_3 + n_4}{\sum_1 n_i}.$$

Таблиця 6.3

Коефіцієнти перетворення a_{kj} , мм²/Н,
відповідно до індивідуального варіанта розрахунку

0°					
a_{11}		a_{12}		a_{13}	
a_{21}		a_{22}		a_{23}	
a_{31}		a_{32}		a_{33}	
90°					
a_{11}		a_{12}		a_{13}	
a_{21}		a_{22}		a_{23}	
a_{31}		a_{32}		a_{33}	
+φ					
a_{11}		a_{12}		a_{13}	
a_{21}		a_{22}		a_{23}	
a_{31}		a_{32}		a_{33}	
-φ					
a_{11}		a_{12}		a_{13}	
a_{21}		a_{22}		a_{23}	
a_{31}		a_{32}		a_{33}	

Таблиця 6.4

Міцнісні властивості, МПа, шаруватого ортотропного композита

Критерій міцності	F_{xp}	F_{xc}	F_{yp}	F_{yc}	F_{xy}

Таблиця 6.5

Міцнісні властивості, МПа, шаруватого ортотропного композита
з армуванням $[0_m / 90_n / +\varphi_k / -\varphi_j]$ як функція від кута φ

Кут армування φ , град.	F_{xp}	F_{xc}	F_{yp}	F_{yc}	F_{xy}
0					
15					
30					
45					
60					
75					
90					

Якщо відносні товщини визначено правильно, то їх сума дорівнює одиниці.

Оцінити реальні товщини пакета за заданими частками груп шарів при відомій товщині моношару можна за певним алгоритмом. Для визначеності введемо такі припущення:

1. Уводимо таке поняття: *елементарний пакет композита* – це мінімальна кількість шарів з кутами 0° , 90° , $\pm\varphi$, які приблизно (з вибраною точністю та з урахуванням дискретної товщини моношару) відповідають заданим відносним товщинам (часткам) груп шарів (табл. 6.6).

2. Для забезпечення симетрії елементарного пакета відносно серединної поверхні кількість шарів з кутом укладання $\pm\varphi$ має бути кратною чотирьом (два шари $+\varphi$ і два шари $-\varphi$).

3. Кількість шарів з кутами 0° та 90° має бути кратною двом хоча б для однієї з цих груп шарів, а для іншої може бути непарним числом.

4. Шари з різними кутами укладання мають бути розташовані симетрично відносно серединної поверхні елементарного пакета.

Таблиця 6.6

Варіанти для аналізу (при заданій частці шарів)

Номер варіанта	Частка шарів з укладанням 0° (ψ_1), %	Частка шарів з укладанням 90° (ψ_2), %	Номер матеріалу	Критерій міцності
1	25	20	1	М- σ
2	15	25	2	М-Н
3	66	12	3	М- σ
4	34	18	4	М- σ
5	20	28	3	М-Н
6	25	25	2	М- σ
7	35	25	1	М-Н
8	26	14	4	М- σ
9	24	18	2	М-Н
10	32	28	3	М- σ
11	22	12	4	М-Н
12	24	16	1	М-Н
13	40	30	3	М- σ
16	60	20	1	М- σ
17	15	15	2	М-Н
18	20	20	3	М-Н
19	25	35	1	М- σ
20	64	16	2	М- σ
21	12	36	1	М-Н
22	50	12	4	М- σ
23	42	26	3	М-Н
24	38	16	1	М- σ
25	40	22	3	М- σ
26	34	12	2	М-Н

Наприклад, відомо, що в елементарному пакеті кількість шарів з кутом укладання 0° дорівнює 25 %, кількість шарів з кутом укладання 90° – 20%, товщина моношару дорівнює 0,08 мм (дискретне значення).

Тоді частка групи шарів з кутами укладання $\pm\varphi$ є такою:
 $\psi_{3-4} = 100 - (25 + 20) = 55 \%$.

Згідно з другим припущенням мінімальна кількість шарів у групі 3–4 дорівнює чотирьом, тобто товщина цієї групи шарів є такою: $0,08 \cdot 4 = 0,32$ мм. Оцінимо в першому наближенні можливу кількість шарів у групах 1 та 2. Складаємо пропорції:

55 % – 4 шари	55 % – 4 шари
25 % – X шарів	20 % – Y шарів
$X = (25 \cdot 4) / 55 =$	$Y = (20 \cdot 4) / 55 =$
$= 1,82 \text{ шару} \approx 2 \text{ шари} = 0,16 \text{ мм}$	$= 1,45 \text{ шару} \approx 2 \text{ шари} = 0,16 \text{ мм}$

Тобто товщини груп шарів та елементарного пакета в цілому дорівнюють:

Шари 0°	Шари 90°	Шари $\pm\varphi$
2 шари	2 шари	4 шари
0,16 мм	0,16 мм	0,32 мм
Загальна товщина пакета: $0,16 + 0,16 + 0,32 = 0,64$ мм		
Реальна відсоткова частка товщин груп шарів у пакеті:		
$(0,16 / 0,64) \cdot 100 \% =$ $= 25 \%$	$(0,16 / 0,64) \cdot 100 \% =$ $= 25 \%$	$(0,32 / 0,64) \cdot 100 \% =$ $= 50 \%$

Бачимо, що відсоткові частки товщин значно відрізняються від заданих, тому робимо другу ітерацію.

Варіант А. Помножимо на 2 кількість шарів у групах 1 (0°) та 3–4 ($\pm\varphi$), а в групі 2 (90°) – виберемо три шари:

Шари 0°	Шари 90°	Шари $\pm\varphi$
4 шари	3 шари	8 шарів
0,32 мм	0,24 мм	0,64 мм
Загальна товщина пакета: $0,32 + 0,24 + 0,64 = 1,20$ мм		
Реальна відсоткова частка товщин груп шарів у пакеті:		
$(0,32 / 1,20) \cdot 100 \% =$ $= 26 \%$	$(0,24 / 1,20) \cdot 100 \% =$ $= 20 \%$	$(0,64 / 1,20) \cdot 100 \% =$ $= 53 \%$
Сума відсоткових часток: $26 + 20 + 53 = 99 \%$		

З певною мірою наближення можна зупинитися на цьому варіанті елементарного пакета. Але для повноти дослідження й порівняння варіантів проведемо ще дві ітерації.

Варіант Б. Помножимо на 2 ще раз кількість шарів у групах 1 та 3–4, а в групі 2 виберемо п'ять шарів. Вочевидь, такий елементарний пакет матиме більшу масу порівняно з попереднім:

Шари 0°	Шари 90°	Шари $\pm\varphi$
8 шарів	5 шарів	16 шарів
0,64 мм	0,40 мм	1,28 мм
Загальна товщина пакета: $0,64 + 0,40 + 1,28 = 2,32$ мм		
Реальна відсоткова частка товщин груп шарів у пакеті:		
$(0,64 / 2,32) \cdot 100 \% =$ $= 27,5 \%$	$(0,40 / 2,32) \cdot 100 \% =$ $= 17,2 \%$	$(1,28 / 2,32) \cdot 100 \% =$ $= 55,2 \%$
Сума відсоткових часток: $27,5 + 17,2 + 55,2 = 99,9 \%$		

Бачимо, що в такому варіанті пакета відсоткові частки в групах 1 та 2 більше відрізняються від заданих у завданні. Тому розглянемо ще один варіант.

Варіант В. Виберемо шість шарів у групі 2, а кількість шарів у групах 1 та 3–4 не змінюємо:

Шари 0°	Шари 90°	Шари $\pm\varphi$
8 шарів	6 шарів	16 шарів
0,64 мм	0,48 мм	1,28 мм
Загальна товщина пакета: $0,64 + 0,48 + 1,28 = 2,40$ мм		
Реальна відсоткова частка товщин груп шарів у пакеті:		
$(0,64 / 2,40) \cdot 100 \% =$ $= 26,6\%$	$(0,48 / 2,40) \cdot 100 \% =$ $= 20,0\%$	$(1,28 / 2,40) \cdot 100 \% =$ $= 53,3\%$
Сума відсоткових часток: $26,6 + 20,0 + 53,3 = 99,9 \%$		

Проаналізувавши отримані частки товщин груп шарів, можна зробити висновок, що з огляду на зменшення маси конструкції варіант А є більш раціональним.

Під час розрахунку на міцність і проєктування конструкцій необхідно скомбінувати певну кількість k елементарних пакетів, оскільки один елементарний пакет має обмежену несну здатність з умов міцності та жорсткості.

Реальна товщина проєктованої конструкції δ_x дорівнює $\delta_{ep} k$, де δ_{ep} – товщина елементарного пакета композита.

Контрольні запитання

1. Які існують підходи для оцінювання міцності шаруватого композита?
2. Які вихідні дані необхідно мати для оцінювання міцності шаруватого композита?
3. Які критерії міцності застосовуються для пошарового оцінювання міцності композита?
4. Чи можна спрогнозувати характер руйнування шаруватого КМ за допомогою критеріїв міцності?
5. Які припущення використовуються під час вибору кількості шарів в елементарному пакеті композита?

Практична робота № 7

ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ СТЕРЖНІВ І ТЯГ

Мета роботи:

1. Вивчення будови композитних стержнів і тяг, конструктивних рішень їх з'єднань із закінцівками.
2. Визначення несної здатності стержня.

Теоретичні відомості

Стержень як конструктивний елемент характеризується тим, що розміри його поперечного перерізу набагато менші від довжини, а за характером зусиль, що передаються і сприймаються, стержень знаходиться в умовах одновісного розтягування або стиснення, тобто лінія дії зусиль збігається з віссю стержня. За типом поперечного перерізу стержні класифікують так:

- суцільні (рис. 7.1, а) і порожнисті (рис. 7.1, б);
- із закритим (рис. 7.2, а) і відкритим (рис. 7.2, б) контурами поперечного перерізу;
- кругові та призматичні.



Рис. 7.1. Типи поперечного перерізу стержнів



Рис. 7.2. Типи поперечного перерізу тонкостінних стержнів

Стержні дуже широко застосовуються в техніці як окремі елементи, а також у складі фермових конструкцій.

Виготовлення стержнів із металів доведено до стандартів – серійно випускаються труби, профілі тощо. Достатньо відрізати потрібну довжину, і найчастіше конструктивний елемент готовий. Іноді до відрізка прокату необхідно приєднати закінцівку, наприклад, для забезпечення шарнірного спирання.

Як було зазначено, стержні навантажені розтяжними й стискальними зусиллями. Отже, якщо орієнтувати волокна КМ уздовж стержня, то їх

масова ефективність буде дуже високою, адже таке навантаження є найбільш сприятливим для волокнистих композитів. Цим пояснюється поява й широке застосування пултрузії – технологічного процесу отримання профілів будь-якої форми поперечного перерізу з односпрямованого композита. Для виготовлення стержнів використовують також намотування. Як відомо, ці два технологічні процеси характеризуються найбільшим коефіцієнтом реалізації властивостей КМ. З цих причин (особливість навантаження та способи виготовлення) стержні з КМ щодо ефективності (масової, економічної тощо) у багато разів перевершують металеві. Крім того, композитні стержні мають високу корозійну стійкість, утомні характеристики тощо. Однак не слід забувати про те, що поки немає екологічно прийнятних способів утилізації конструкцій з КМ, у тому числі й стержнів.

Як відомо, будь-яка задача проектування містить три обов'язкові складові: критерій проектування, систему обмежень на проєктні (шукані) параметри і метод пошуку екстремуму цільової функції. Для стержнів найчастіше цільовою функцією є маса, а критерієм проектування – мінімум маси:

$$G = \rho \ell A \rightarrow \min, \quad (7.1)$$

де ℓ – довжина стержня; ρ – густина матеріалу; A – площа поперечного перерізу.

Площа поперечного перерізу трубчастого стержня визначається формулою

$$A = \pi(R_1^2 - R_2^2) = 2\pi\delta R, \quad (7.2)$$

де R_1 , R_2 – зовнішній і внутрішній радіуси; $\delta = R_1 - R_2$ – товщина стінки стержня; $R = 0,5(R_1 + R_2)$ – середній радіус перерізу.

Тоді критерій проектування набирає такого вигляду:

$$G = 2\pi\rho\ell\delta R \rightarrow \min. \quad (7.3)$$

Проєктні параметри стержня, до яких належать товщина стінки δ , середній радіус R і структура КМ стінки, мають задовольняти певним обмеженням:

- за міцністю;
- на загальну стійкість;
- на локальну стійкість;
- конструктивно-технологічним.

Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані для розрахунку наведено в табл. 7.1.
2. Визначити основні конструктивні параметри стержня: довжину ℓ , радіус R (середнє значення між зовнішнім і внутрішнім радіусами) і товщину стінки.

3. Вибрати фізико-механічні характеристики матеріалу стержня, припускаючи, що стержень був виготовлений методом пултрузії: E_x , E_y , G_{xy} , μ_{xy} , F_{xp} , F_{xc} .

4. Розрахувати вторинний коефіцієнт Пуассона КМ:

$$\mu_{yx} = \mu_{xy} \frac{E_y}{E_x}.$$

5. Обчислити граничне навантаження, яке може витримати матеріал стержня на розтяг:

$$N_t = 2\pi R \delta F_{xp}.$$

6. Визначити граничне навантаження, яке може витримати матеріал стержня на стиск:

$$N_c = 2\pi R \delta F_{xc}.$$

7. Знайти граничне навантаження, при якому виникає загальна втрата стійкості стержня, припускаючи, що забезпечується шарнірне спирання його кінців:

$$N_{c1} = \frac{\pi^3 R^3 \delta E_x}{L^2 \left(1 + \frac{R^2 \pi^2 E_x}{L^2 G_{xy}} \right)}.$$

8. Розрахувати граничне навантаження, при якому виникає локальна вісесиметрична втрата стійкості стінки стержня:

$$N_{c2} = 2\pi \delta^2 \sqrt{\frac{E_x E_y}{3(1 - \mu_{xy} \mu_{yx})}}.$$

9. Визначити граничне навантаження, при якому виникає локальна невісесиметрична втрата стійкості стінки стержня:

$$N_{c3} = \min_{(m,n)} \{ \Phi \},$$

$$\Phi_{m,n} = \frac{\pi R \delta^3}{6 \lambda_m^2} \left[\bar{E}_x \lambda_m^4 + 2(\bar{E}_x \mu_{yx} + 2G_{xy}) \lambda_m^2 \lambda_n^2 + \bar{E}_y \lambda_n^4 \right] +$$

$$+ \frac{2\pi \delta \lambda_m^2}{R \left[\frac{\lambda_m^4}{E_y} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\mu_{xy}}{E_x} \right) \lambda_m^2 \lambda_n^2 + \frac{\lambda_n^4}{E_x} \right]},$$

де

$$\bar{E}_x = \frac{E_x}{1 - \mu_{xy} \mu_{yx}}; \quad \bar{E}_y = \frac{E_y}{1 - \mu_{xy} \mu_{yx}};$$

$$\lambda_m = \frac{\pi}{L} m; \quad \lambda_n = \frac{n}{R}, \quad m = \{1 \dots 100\}; \quad n = \{1 \dots 10\}.$$

10. Для визначення несної здатності стержня при стисканні вибрати мінімальне значення

$$N_{cmin} = \min\{N_c, N_{c1}, N_{c2}, N_{c3}\}.$$

11. Зробити висновок про те, які з навантажень на розтяг N_t і стиск N_{cmin} є критичними для стержня.

12. Вивчити будову закінцівок стержнів і виконати креслення закінцівки (рис. 7.3, дод. 2).

13. Основними конструктивними параметрами закінцівки є діаметри втулки D і d (або товщина δ), довжина втулки L (L_1), діаметр метричної різі MX (d_1 і висота різі h). Параметри метричних різей наведено в дод. 3.

14. Зазвичай параметри D і d визначають площу поперечного перерізу A втулки і можуть бути вибрані з такої умови:

$$A_{min} = \frac{\max\{N_t, N_c\}}{[\sigma]_{em}},$$

де $[\sigma]_{em}$ – границя міцності матеріалу втулки (сталі, алюміній тощо) (див. дод. 4).

15. Мінімальну довжину закінцівки L розрахувати з умови

$$L_{min} = \frac{\max\{N_t, N_c\}}{\pi D [\tau]_{кл}}, \quad K = 1,2 \dots 2,0,$$

де $[\tau]_{кл}$ – міцність клею на зсув (див. дод. 5).

16. Мінімальна довжина різі L_1 становить 8–10 витків і вибирається згідно з вимогами до регулювання довжини стержня.

17. Мінімальна довжина підмотування (стрічкою або ровингом) має бути не менше довжини втулки.

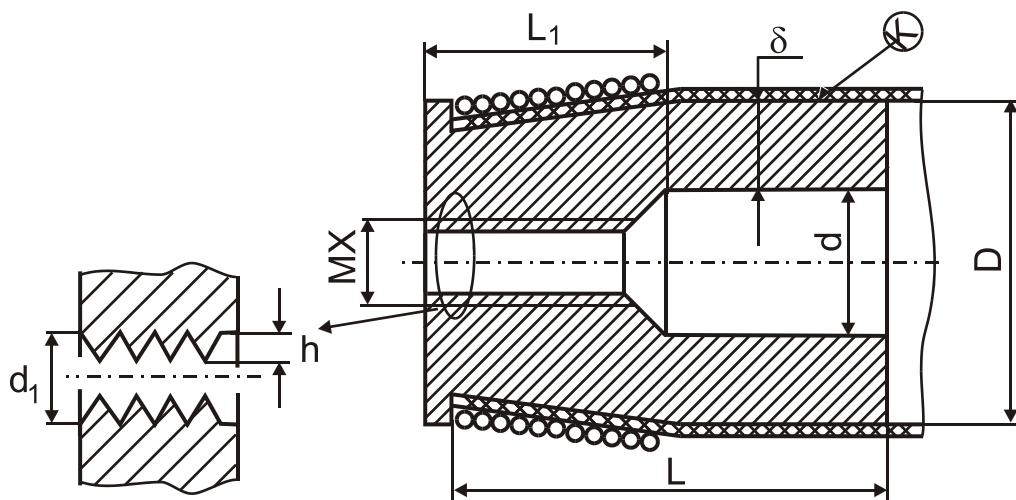


Рис. 7.3. Параметри типової втулки

Таблиця 7.1

Варіанти для розрахунку

Номер варіанта	Довжина стержня, м	Середній радіус, мм	Товщина стінки, мм	Матеріал (див. табл. Д.1.1)
1	1,5	18	1,0	1
2	1,0	20	1,5	2
3	1,4	22	1,2	3
4	1,3	15	1,4	4
5	1,6	12	1,6	4
6	1,5	10	1,0	3
7	1,8	20	2,5	2
8	1,9	14	1,0	1
9	1,3	14	1,2	1
10	1,5	12	1,4	2
11	0,9	14	1,0	1
12	1,0	12	1,2	3
13	1,2	19	1,8	4
14	1,5	17	2,0	3
15	1,4	14	2,4	4
16	0,6	12	1,0	4
17	1,8	15	1,2	3
18	1,4	10	1,6	2
19	1,3	14	1,4	1
20	1,0	16	2,0	3
21	1,2	20	1,8	4
22	1,6	18	1,2	4
23	1,0	16	1,4	3
24	0,9	14	1,0	2
25	1,5	12	1,6	1
26	0,8	15	1,2	2

Контрольні запитання

1. Якими є основне призначення й область застосування стержнів?
2. Якими є основні особливості сприйняття навантаження стержнів?
3. Порівняйте експлуатаційну ефективність стержнів, виготовлених різними виробничими процесами (намотуванням, пултрузією, викладанням).
4. У чому полягає особливість загальної та локальної втрати стійкості стержнів?
5. Які існують типові способи підвищення загальної стійкості стержнів?
6. Які існують типові способи підвищення локальної стійкості стержнів?

Практична робота № 8

РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ КОМПОЗИТНИХ БАЛОК І ЛОНЖЕРОНІВ КРИЛА

Мета роботи:

1. Вивчення типового КТР балок та елементів кріплення лонжеронів.
2. Визначення несної здатності балки, навантаженої поперечною силою.

Теоретичні відомості

У техніці, будівництві та інших галузях народного господарства часто виникає необхідність у передаванні поперечної сили на опори: навантаження від транспортних засобів на опори моста, маси пасажирів або вантажу на підлогу пасажирського салону або вантажного відсіку літака, маси людей, меблів, обладнання на стіни будівлі, піднимальної сили крила на фюзеляж тощо. Найбільш пристосовані для цього такі конструктивні елементи, як балки, лонжерони, шпангоути тощо. Іноді (якщо дозволяє геометрія) функції балок виконують ферми, які за своєю суттю є конструкціями, призначеними для передавання поперечних сил на опори.

Згідно з розрахунковою схемою балки в кожному перерізі діють узагальнені силові фактори – поперечна сила, згинальний момент і досить часто осьова (поздовжня) сила (рис. 8.1).

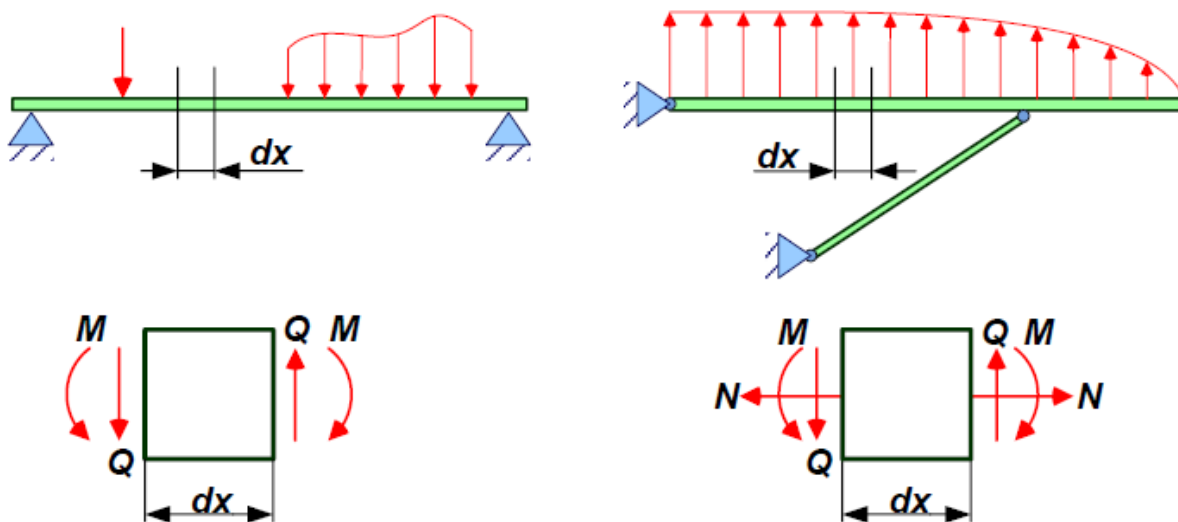


Рис. 8.1. Розрахункова схема балки

Для балок з однорідним поперечним перерізом (з постійними фізико-механічними властивостями), наприклад, з металу, нормальні напруження розподіляються по висоті згідно з лінійним законом (рис. 8.2). Слід уточнити, що за лінійним законом розподіляються деформації (саме цей факт було

встановлено експериментально). Оскільки напруження від деформацій залежать лінійно до границі пропорційності (рис. 8.2), то лінійно будуть розподілятися й напруження.

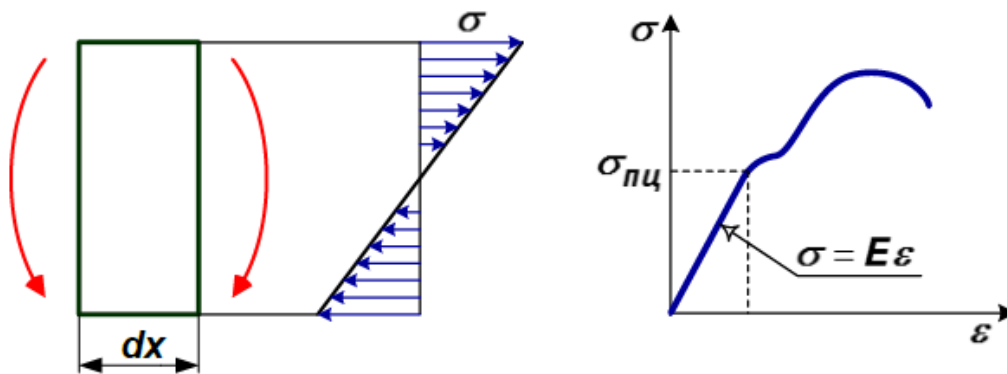


Рис. 8.2. Розподіл напружень по висоті балки з однорідним поперечним перерізом

Якщо поперечний переріз балки є неоднорідним, наприклад, складається з груп шарів КМ, укладених під різними кутами (рис. 8.3, а), або з різних матеріалів (рис. 8.3, б), то лінійний характер розподілу деформацій зберігається, що також підтверджено експериментально, а розподіл напружень, залишаючись лінійним, має точки розриву (стрибки), що пов'язано зі стрибкоподібною зміною модуля пружності.

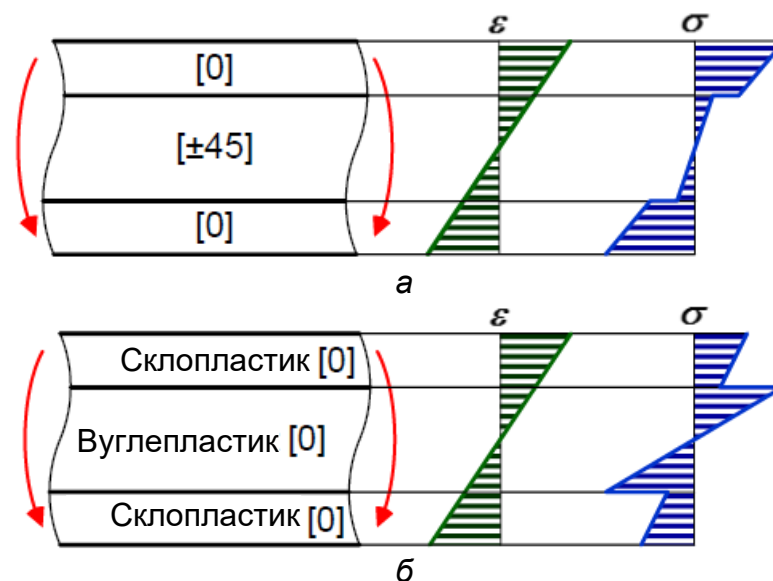


Рис. 8.3. Розподіл напружень по висоті балки з неоднорідним поперечним перерізом

З курсу «Механіка матеріалів та конструкцій» відомо, що при лінійному розподілі для частини перерізу напруження є набагато меншими за ті, які здатний сприймати матеріал. Тому доцільно видалити частину матеріалу, що прилягає до нейтральної осі перерізу, і тим самим збільшити частку матеріалу, що працює при підвищених напруженнях. Очевидно, що це

приведе до зменшення маси балки. Доцільність такого рішення підтверджується таким прикладом. Нехай є дві балки однакової висоти з однаковими площами поперечного перерізу (рис. 8.4).

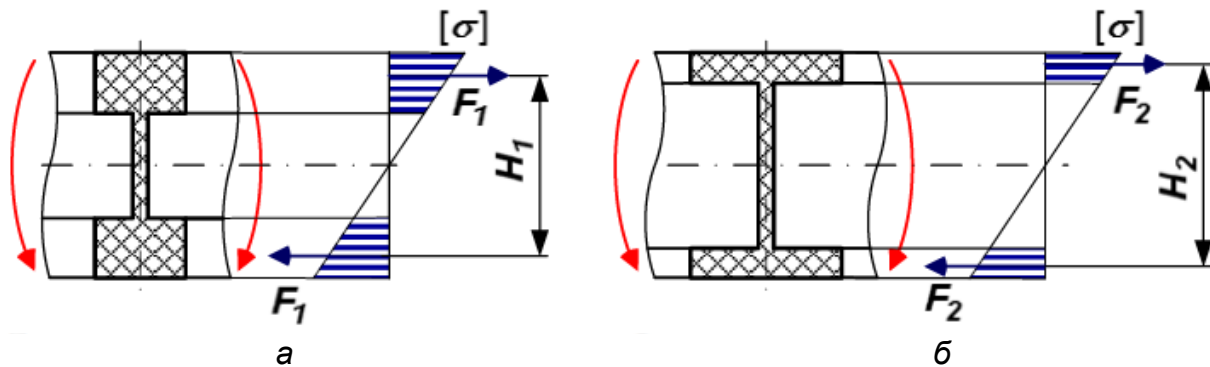


Рис. 8.4. Розподіл напружень по висоті балки з неоднорідним поперечним перерізом

При однакових максимальних напруженнях (див. рис. 8.4) результувна сила $F_2 > F_1$, а умовне плече першої балки $H_1 < H_2$. Таким чином, друга балка сприймає більший згинальний момент, оскільки $F_2 H_2 > F_1 H_1$. Звідси випливає правильність протилежного твердження про те, що для сприйняття однакового згинального моменту друга балка (див. рис. 8.4, б) буде легшою, тобто матеріал необхідно рознести на максимально можливу відстань. Критерієм ефективності балки вважається відношення її ефективної висоти до будівельної (рис. 8.5).

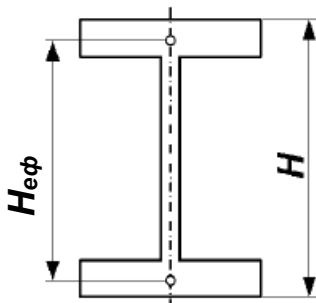


Рис. 8.5. До поняття про ефективну висоту балки

Однак це не означає, що потрібно прагнути до дуже тонких і дуже широких полиць, оскільки одна з них завжди є стисненою, що може призвести до локальної втрати стійкості.

Отже, раціональний поперечний переріз балки складається з двох полиць, що працюють переважно на розтяг-стиск, і стінки, що сприймає поперечну силу і забезпечує спільну роботу полиць при згинанні (рис. 8.6). Таким чином, полиці (пояси) балки з КМ слід армувати під кутом 0° (уздовж балки), а стінку – під кутом $\pm 45^\circ$. При такій схемі армування максимально реалізуються високі міцнісні властивості КМ полиць і стінки.

Як критерій проектування беруть критерій мінімізації погонної маси балки (очевидно, що для статично визначених балок маса балки в цілому буде мінімальною тоді, коли мінімальною буде погонна маса всіх перерізів). Своєю чергою, система обмежень на проектні параметри містить:

- 1) забезпечення міцності полиць на розтяг-стиск у найбільш навантажених точках;
- 2) забезпечення міцності стінки на зсув;
- 3) забезпечення міцності з'єднання верхньої та нижньої полиць з заплечиками стінки;

- 4) забезпечення міцності полиць КМ на міжшаровий зсув;
- 5) забезпечення стійкості стисненої полиці балки;
- 6) забезпечення стійкості стінки при зсуві;
- 7) конструктивно-технологічні обмеження:
 - формування товщини полиць і стінки з цілої кількості моношарів;
 - обмеження зверху та/або знизу на ширину полиць.

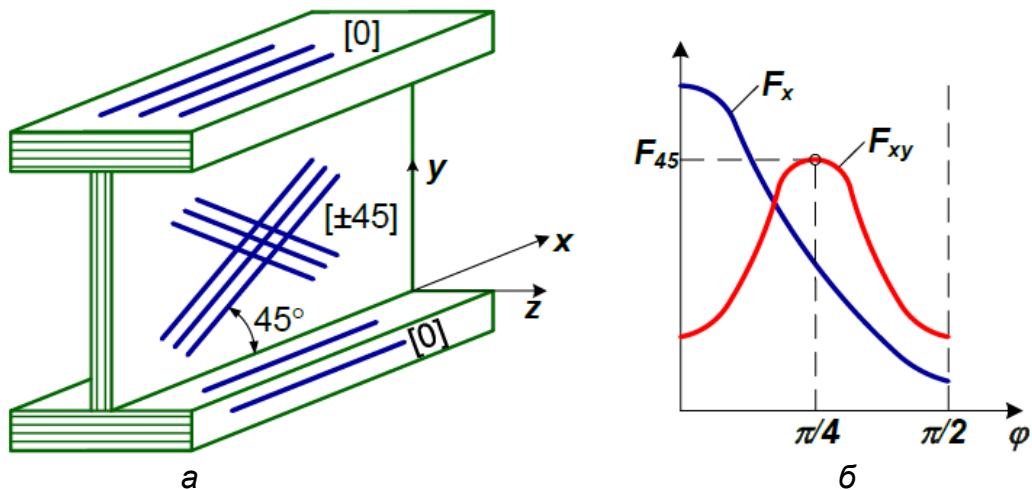


Рис. 8.6. Оптимальні схеми армування елементів балки

Порядок виконання роботи

1. Розглянути типову композитну балку, проаналізувати будову й визначити її геометрію (L , H , b_{up} , b_{low} , δ_{up} , δ_{low} , δ_{web}). Завдання для індивідуального варіанта взяти з рис. 8.7 і табл. 8.1. Довжину балки вибрати в діапазоні 2...3 м.

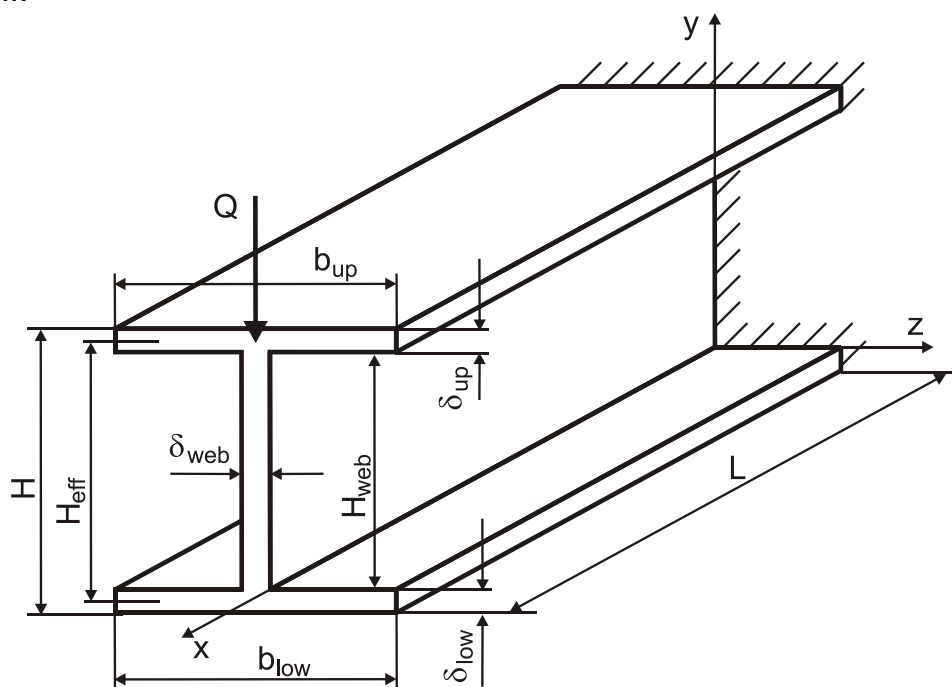


Рис. 8.7. Аналітична схема балки, навантаженої поперечною силою

Таблиця 8.1

Варіанти для розрахунку

Номер варіанта	Матеріал		Міцність з'єднання (адгезія), МПа		Товщини, мм		Ширина верхньої (нижньої) полиці, мм	Ефективна висота балки, мм
	верхня (нижня) полиця	стінка	верхня полиця/ стінка	нижня полиця/ стінка	верхня (нижня) полиця	стінка		
1	1	5	28	50	4,5	70	8,0	250
2	1	6	30	40	6,8	86	5,6	300
3	1	7	45	35	4,8	68	4,0	350
4	2	8	50	30	3,8	50	6,5	420
5	3	9	25	47	4,6	62	4,8	270
6	4	10	38	51	3,5	78	8,5	340
7	2	8	45	38	5,0	54	7,5	480
8	4	1	40	25	4,8	64	6,3	360
9	3	2	38	30	3,8	80	8,3	320
10	3	3	60	38	4,6	50	4,6	280
11	3	4	55	50	3,5	58	7,2	350
12	2	5	50	43	4,6	72	6,4	290
13	1	6	28	40	5,0	56	6,8	330
14	4	7	30	35	3,4	68	7,6	400
15	3	9	50	28	4,2	54	5,8	420
16	1	9	38	42	5,8	82	8,8	320
17	2	4	40	45	4,6	60	7,2	350
18	4	3	36	58	6,0	80	6,5	280
19	1	7	47	60	3,8	76	4,8	240
20	2	8	40	35	4,8	64	7,2	300
21	1	7	50	40	5,2	80	5,0	360
22	2	5	55	38	4,2	50	4,4	440
23	3	9	60	47	5,8	58	6,0	420
24	4	10	38	53	5,6	72	4,2	360
25	1	5	40	55	3,8	76	5,8	370

Примітка. Номери матеріалів полиць і стінки вибирати, використовуючи табл. Д.1.1.

2. Беручи до уваги припущення про розподіл зовнішніх навантажень між полицями балки та стінкою, а також рекомендації щодо ефективного кута армування полиць і стінки, визначити пружні властивості КМ полиць і стінки (E , G , μ).

3. Знайти граничну поперечну силу Q , яку може витримати балка за умови міцності з'єднання верхньої полиці та заплечика стінки:

$$Q_1 = b_{up} H_{eff} F_{up}, \quad (8.1)$$

де H_{eff} – ефективна висота балки, $H_{eff} = H - (\delta_{up} + \delta_{low})/2$; F_{up} – міцність з'єднання (сполучного або клею) між верхньою полицею і заплечиком.

4. Визначити граничну поперечну силу Q , яку може витримати балка при умові міцності з'єднання нижньої полиці і заплечика стінки:

$$Q_2 = b_{low} H_{eff} F_{low}, \quad (8.2)$$

де F_{low} – міцність з'єднання (сполучного або клею) між нижньою полицею та заплечиком.

5. Розрахувати граничну поперечну силу Q , яку може витримати балка при умові міцності КМ стінки, навантаженої зсувом від поперечної сили:

$$Q_3 = \delta_{web} H_{eff} F_{web}, \quad (8.3)$$

де F_{web} – міцність пакета КМ $[\pm 45]$ на зсув.

6. Знайти граничну поперечну силу Q , яку може витримати верхня полиця балки при навантаженні на розтяг:

$$Q_4 = \frac{M_{bend}}{L} = \frac{\delta_{up} b_{up} H_{eff} F_{up}}{L}, \quad (8.4)$$

де F_{up} – міцність матеріалу верхньої полиці на розтяг.

7. Визначити граничну поперечну силу Q , яку може витримати нижня полиця балки при навантаженні на стиск:

$$Q_5 = \frac{M_{bend}}{L} = \frac{\delta_{low} b_{low} H_{eff} F_{low}}{L}, \quad (8.5)$$

де F_{low} – міцність матеріалу нижньої полиці на стиск.

8. Розрахувати граничну поперечну силу Q , яку може витримати нижня полиця балки при навантаженні на стиск, при умові локальної втрати стійкості:

$$Q_6 = \frac{H_{eff} b \delta_{low}}{2L} \frac{K_{x cap} \pi^2 \sqrt{E_x E_z}}{12(1 - \mu_{xz} \mu_{zx})} \left(\frac{b}{\delta_{low}} \right)^2, \quad (8.6)$$

де $b = b_{low} / 2$ для двотаврового профілю балки, $b = b_{low}$ для швелерного профілю балки; E_x , E_z , μ_{xz} , μ_{zx} – пружні характеристики матеріалу нижньої полиці; $K_{x cap}$ – коефіцієнт спирання полиці:

$$K_{x cap} = 0,2 + \frac{0,3 E_x \mu_{zx}}{\sqrt{E_x E_z}} + \frac{G_{xz} (1 - \mu_{xz} \mu_{zx})}{\sqrt{E_x E_z}}. \quad (8.7)$$

9. Знайти граничну поперечну силу Q , яку може витримати стінка балки при умові локальної втрати стійкості від зсуву:

$$Q_7 = H_{web} \frac{\pi^2}{L^2} K_{x web} \sqrt{D_x D_y}, \quad (8.8)$$

де H_{web} – висота стінки; $K_{x web}$ – коефіцієнт спирання стінки (визначається за спеціальними таблицями); D_x, D_y – згинальні жорсткості стінки як пластини.

Коефіцієнт спирання стінки $K_{x web}$ залежить від співвідношення згинальних жорсткостей, а також подовження стінки:

$$K_{x web} = f\left(\frac{D_x}{D_y}, \frac{D_x}{D_{xy}}, \frac{H_{web}}{L}\right). \quad (8.9)$$

Для обчислення згинальних жорсткостей стінки можна скористатися такими спрощеними формулами:

$$\begin{aligned} D_x &= E_{x web} \frac{\delta_{web}^3}{12}; & D_y &= E_{y web} \frac{\delta_{web}^3}{12}; \\ D_{xy} &= G_{xy web} \frac{\delta_{web}^3}{12} + \mu_{yx web} D_x. \end{aligned} \quad (8.10)$$

10. Визначити несну здатність балки – вибрати мінімальне значення сили Q серед обчислених:

$$Q = \min\{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7\}.$$

11. Накреслити ескіз балки в масштабі, обчислити масу балки, зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Наведіть приклади балок у техніці. Чому ці конструкції є саме балками?
2. У чому полягають відмінності розподілів нормальних напружень в однорідному й неоднорідному поперечних перерізах?
3. Обґрунтуйте раціональну структуру КМ для елементів балки.
4. Чому для забезпечення роботоздатності балки із КМ необхідно встановлювати заплечики?
5. Які існують КТР підвищення міцності зв'язку між полицями та стінкою балки?
6. На які обмеження слід зважати під час проектування балок?

Практична робота № 9

ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ БАЛОК І ЛОНЖЕРОНІВ КРИЛА

Мета роботи:

1. Вивчення типових КТР балок та елементів кріплення лонжеронів.
2. Проектування перерізу балки, навантаженої згинальним моментом, поздовжньою й поперечною силами.

Порядок виконання роботи

На основі аналізу особливостей роботи балки з КМ, проведеного в попередній практичній роботі, і зроблених висновків про раціональне армування полиць і стінки сформулюємо проєктувальну розрахункову схему балки (рис. 9.1):

- розподіл напружень по товщині полиць є рівномірним, що обґрунтовується незначною товщиною полиць порівняно з висотою балки;
- стінка та її заплечики на згин не працюють;
- у кожному перерізі балки відомими є згинальний момент M_z , поперечна сила Q_y , осьова сила N , а також координата y_N прикладання сили N .

Через різну міцність КМ на розтяг-стиск матеріали полиць можуть бути різними.

На основі зроблених вище припущень можна записати такі залежності:

- $H_{eff} = H - (\delta_{up} + \delta_{low}) / 2$;
- $\delta_{sh} = \delta_{web} / 2$ – для двотаврового перерізу;
- $\delta_{sh} = \delta_{web}$ – для швелерного перерізу.

Осьова сила не призводить до поздовжнього згину балки в тому випадку, якщо ця сила прикладена в центрі жорсткості y_0 .

Як умову оптимальності балки вибирають мінімальну масу одиниці довжини балки $\bar{G}$. У загальному випадку ця умова має такий вигляд:

$$\bar{G} = \rho_{up} \delta_{up} b_{up} + \rho_{low} \delta_{low} b_{low} + \rho_{web} \left[\delta_{web} (H - \delta_{up} - \delta_{low}) + \delta_{shup} (b_{up} - \delta_{web}) + \delta_{shlow} (b_{low} - \delta_{web}) \right] \rightarrow \min.$$

Як уже зазначалося раніше, при наявності всіх трьох зовнішніх силових факторів проектування є досить складним завданням, тому за допомогою методу наближень проектування можна провести за таким алгоритмом:

1. Вибрати значення $H_{eff} = (0,8 \dots 0,95) H$.
2. Визначити мінімальну ширину полиць з умови міцності з'єднання полиць і стінки (через заплечики):

$$b_{up.min} = \frac{Q_y}{H_{eff} F_{jup}}; \quad b_{low.min} = \frac{Q_y}{H_{eff} F_{jlow}},$$

де F_{jup} , F_{jlow} – міцність з'єднання верхньої та нижньої полиць із заплечиком (тобто міцність сполучного або клею).

Слід зазначити, що в більшості випадків ця умова дає дуже малі значення ширини, які потім необхідно збільшувати з інших умов, зазвичай конструктивних.

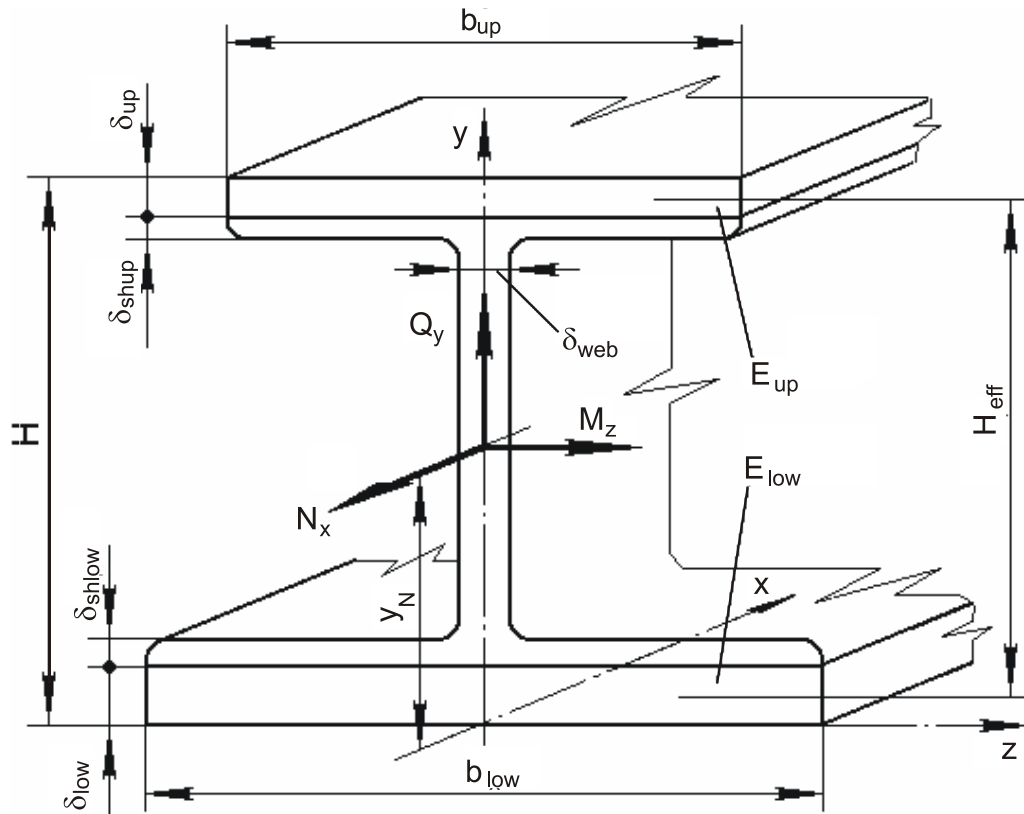


Рис. 9.1. Розрахункова схема перерізу балки, параметри якої необхідно визначити

3. Мінімальну товщину стінки δ_{web} визначити з умови міцності стінки на зсув. Для цього необхідно попередньо розрахувати (або обґрунтовано задати) границю міцності на зсув матеріалу стінки F_{web} . Розраховану товщину слід округлити до кількості шарів, вираженої цілим числом, кратним 4:

$$\delta_{web} = 4\delta_0 \left[\text{int} \left(\frac{Q_y}{4H_{eff} F_{web}} \right) + 1 \right],$$

де символом «int» позначено цілу частину числа в дужках.

4. Товщини верхньої та нижньої полиць необхідно знаходити шляхом сумісного розв'язання умов міцності верхньої та нижньої полиць. У разі одночасної дії згинального моменту й поздовжньої сили виникає необхідність

розв'язання системи нелінійних рівнянь. Тому рекомендується використовувати відповідне програмне забезпечення для знаходження наближених розв'язків:

$$\frac{N_x E_{up}}{\delta_{up} b_{up} E_{up} + \delta_{low} b_{low} E_{low}} + \frac{M}{H_{eff} \delta_{up} b_{up}} \leq F_{up};$$

$$\frac{N_x E_{low}}{\delta_{up} b_{up} E_{up} + \delta_{low} b_{low} E_{low}} - \frac{M}{H_{eff} \delta_{low} b_{low}} \leq F_{low},$$

де $E_{up}, E_{low}, F_{up}, F_{low}$ – модулі пружності і міцність матеріалу верхньої та нижньої полиць.

Визначені товщини також необхідно округлити відповідно до кількості шарів, вираженої цілим числом.

5. Оцінити значення ефективної висоти балки й порівняти його з вибраним у п. 1. Якщо різниця становить більше 10 %, то слід узяти нове наближення й повторити розрахунки.

Отримана конструкція є наближеною до рівномірної та не є оптимальною, тому що максимальна реалізація властивостей матеріалу полиць може відбутися внаслідок одночасного збільшення ширини полиць і рознесення по висоті балки товщин полиць.

Отже, можна спробувати реалізувати варіант геометрії полиць при $b > b_{min}$. Ширину полиці рекомендується вибирати таким чином, щоб забезпечити виконання першого припущення про тонкостінність конструкції, тобто ширина полиці має бути приблизно в 10 разів більшою від її товщини.

Далі необхідно оцінити виконання умов стійкості елементів перерізу балки та балки в цілому. Так, можна видокремити найбільш часто спостережувані види втрати стійкості балки (рис. 9.2): місцева втрата стійкості полиці (як тонкостінної пластини), навантаженої стискальним зусиллям (рис. 9.2, а); втрата стійкості стінки балки при зсуві (рис. 9.2, б); загальна втрата стійкості у формі перекидання всієї балки (рис. 9.2, в).

Слід розуміти таке: якщо йдеться про проектування балки крила або якоїсь складаної конструкції, то необхідно брати до уваги наявність інших підкріплювальних елементів (нервюр, перегородок тощо). Але слід все ж перевірити окремо стійкість балки, щоб розуміти, про який запас стійкості йдеться.

Критичні напруження місцевої втрати стійкості полиці σ_{cr} можна оцінити за формулою

$$\sigma_{cr} = \frac{K \pi^2 \sqrt{E_x E_z}}{12(1 - \mu_{xz} \mu_{zx})} \left(\frac{b}{\delta} \right)^2,$$

де E_x, E_z – модулі пружності матеріалу стисненої полиці по осях x та z (див. рис. 9.1); b, δ – ширина й товщина елемента, що втрачає стійкість

(рис. 9.3); K – коефіцієнт спирання полиці, що характеризує фізичні умови спирання та жорсткість пластини.

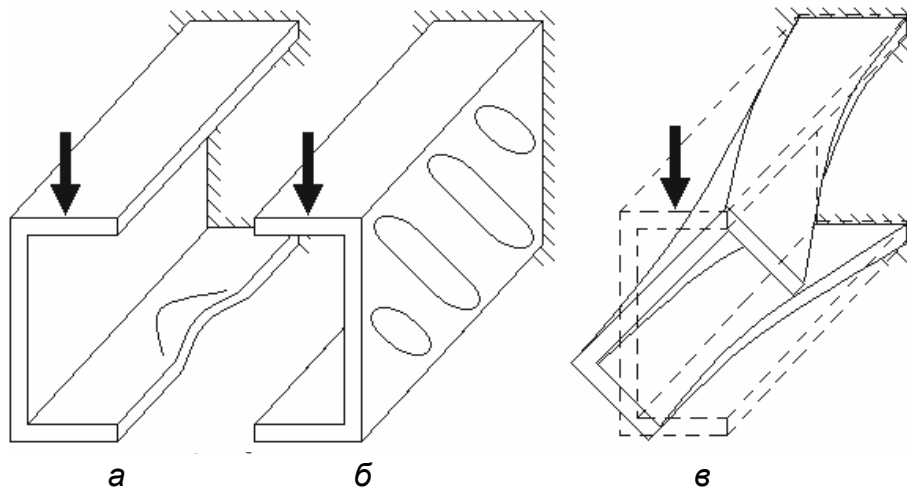


Рис. 9.2. Види втрати стійкості балки:

а – втрата стійкості полиці, навантаженої стискальним зусиллям;
б – втрата стійкості стінки балки при зсуві; в – перекидання всієї балки

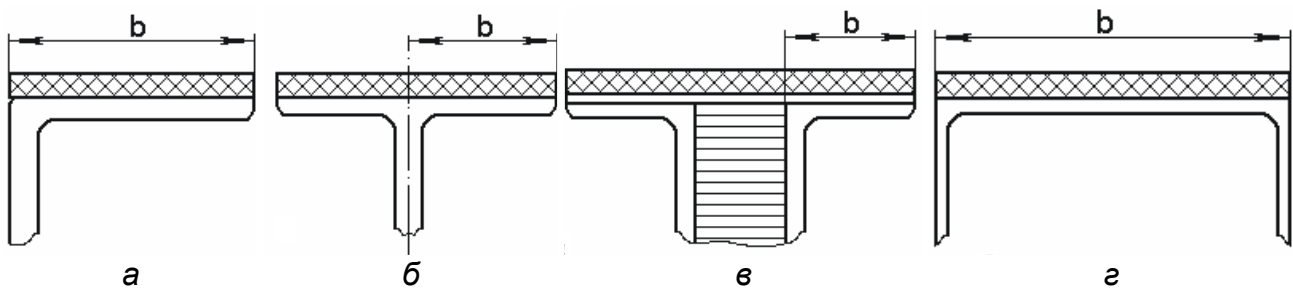


Рис. 9.3. Геометрія полиці, що втрачає стійкість

Для визначення коефіцієнта K використовують залежності:

– для варіанта, зображеного на рис. 9.3, а, б:

$$K = 0,2 + 0,3 \frac{E_x \mu_{zx}}{\sqrt{E_x E_z}} + \frac{G_{xz}(1 - \mu_{xz} \mu_{zx})}{\sqrt{E_x E_z}};$$

– для варіанта, зображеного на рис. 9.3, в:

$$K = 1,15 + \frac{2 E_x \mu_{zx}}{3 \sqrt{E_x E_z}} + \frac{G_{xz}(1 - \mu_{xz} \mu_{zx})}{\sqrt{E_x E_z}};$$

– для варіанта, зображеного на рис. 9.3, г:

$$K = 2 \left(1 + \frac{E_x \mu_{zx} + 2 G_{xz}(1 - \mu_{xz} \mu_{zx})}{\sqrt{E_x E_z}} \right),$$

де G_{xz} та μ_{xz} – модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона матеріалу полиці.

Якщо розраховані критичні напруження втрати стійкості σ_{cr} є більшими за діючі напруження, то місцева втрата стійкості полиці є малоймовірною.

Критичне дотичне зусилля q_{cr} , при якому може втратити стійкість стінка (рис. 9.4), можна оцінити за залежністю:

$$q_{cr} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_x D_y}}{a^2} K,$$

де a – довжина стінки; K – коефіцієнт спирання при зсуві; D_x, D_y – згинальні жорсткості стінки по осях x та y :

$$D_x = \frac{E_x \delta_{web}^3}{12(1 - \mu_{xy} \mu_{yx})}; \quad D_y = \frac{E_y \delta_{web}^3}{12(1 - \mu_{xy} \mu_{yx})}.$$

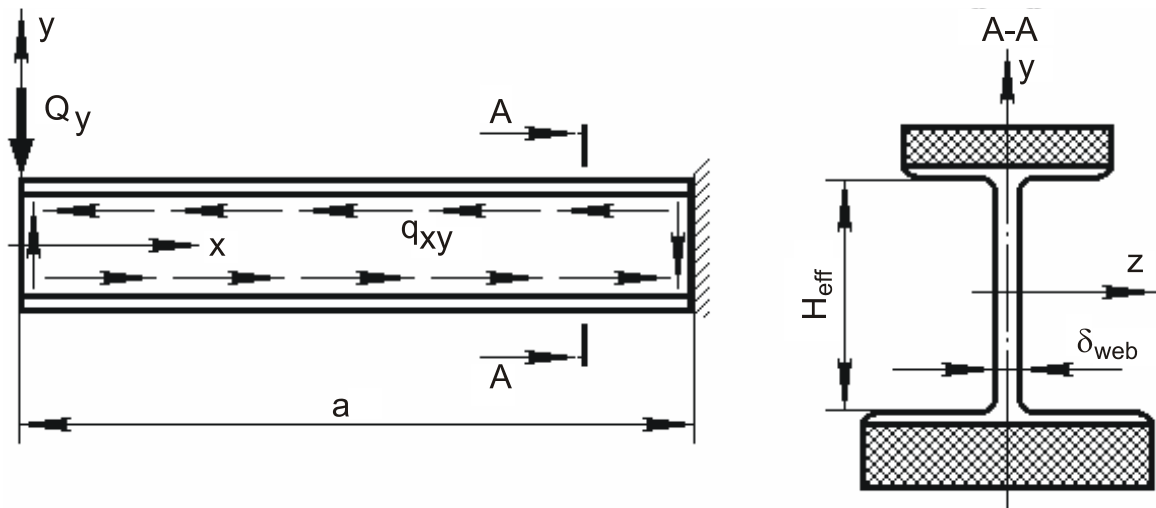


Рис. 9.4. Втрата стійкості стінки балки при зсуві

Коефіцієнт спирання при зсуві K залежить від пружних властивостей матеріалу стінки і відношення H_{web} / a та змінюється в доволі широких межах. Коефіцієнт K можна вибирати за спеціальними таблицями.

Якщо критичні зусилля q_{cr} є більшими за діючі зусилля q_{xy} , то втрата стійкості стінки є малоймовірною.

Якщо розглянуті умови втрати стійкості не виконуються, то слід вжити заходів для забезпечення стійкості: обґрунтоване збільшення товщини, заміна структури КМ стінки на ту, яка забезпечує більшу жорсткість, використання інших КТР (стінка типу «сендвіч», підкріплена ребрами стінка, гофрована стінка та ін.).

Варіанти для розрахунку наведено в табл. 9.1. Номери матеріалів полиць і стінки слід вибирати, використовуючи табл. Д.1.1.

Таблиця 9.1

Варіанти для розрахунку

Номер варіанта	Матеріал		Міцність з'єднання (адгезія), МПа		Навантаження			Ефективна висота балки, мм
	верхня (нижня) полиця	стінка	верхня полиця/ стінка	нижня полиця/ стінка	Згинальний момент M_z , кНм	Поздовжня сила N_x , кН	Поперечна сила Q_y , кН	
1	1	5	28	50	3,0	25	5,0	250
2	1	6	30	40	6,2	30	4,0	300
3	1	7	45	35	5,4	45	8,3	350
4	2	8	50	30	3,8	18	6,2	420
5	3	9	25	47	4,5	20	5,3	270
6	4	10	38	51	3,3	34	3,3	340
7	2	8	45	38	4,8	28	4,8	480
8	4	1	40	25	3,4	38	5,7	360
9	3	2	38	30	6,0	40	6,2	320
10	3	3	60	38	5,3	34	3,9	280
11	3	4	55	50	4,1	45	4,6	350
12	2	5	50	43	3,6	35	3,8	290
13	1	6	28	40	2,8	28	2,9	330
14	4	7	30	35	4,6	42	4,0	400
15	3	9	50	28	5,2	38	3,9	420
16	1	9	38	42	4,3	40	4,7	320
17	2	4	40	45	2,9	36	3,3	350
18	4	3	36	58	3,8	38	2,9	280
19	1	7	47	60	4,7	42	4,3	240
20	2	8	40	35	5,0	26	3,6	300
21	1	7	50	40	4,2	37	2,8	360
22	2	5	55	38	3,8	40	3,5	440
23	3	9	60	47	2,9	36	4,0	420
24	4	10	38	53	5,0	28	4,6	360
25	1	5	40	55	4,3	42	3,2	370

Контрольні запитання

1. Які припущення використовують під час проєктування балок із композитів?
3. Які умови міцності використовують під час проєктування перерізу балки з композитів?
4. Чому мінімальна ширина полиці, визначена з умови міцності, не є раціональною?
5. Як можна визначити границю міцності матеріалу стінки на зсув?
6. Чому необхідно перевіряти на стійкість полиці та стінку балки?
7. Яких заходів можна вжити для забезпечення стійкості елементів композитної балки?

Практична робота № 10

ПРОЄКТУВАННЯ НАМОТАНИХ ОБОЛОНОК ОБЕРТАННЯ ПРИ ДОВІЛЬНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Мета роботи:

1. Ознайомлення з методами оцінювання напруженого стану й підходами до проєктування композитних оболонок обертання при довільному навантаженні.
2. Визначення конструктивних параметрів композитної оболонки під дією невісесиметричного навантаження

Теоретичні відомості

Намотування – це настільки перспективний, надійний і продуктивний технологічний процес, що є сенс застосовувати його набагато ширше. Особливо це важливо у зв'язку з необхідністю зниження частки ручної праці і тим самим прямих витрат, а також завдяки високій технологічній надійності цього техпроцесу. Зрозуміло, що й для намотування існують технологічні проблеми, які потрібно вирішувати. Основна з них – деякий надлишок маси через сталість структури та товщини КМ по всьому контуру оболонкових конструкцій, що знаходяться в умовах довільного навантаження. До таких конструкцій належать хвостові балки гелікоптерів, корпуси ракет, відсіки фюзеляжів деяких типів літаків, а також цистерни, нафто- і водопроводи тощо. Просте перелічення зазначених оболонкових конструкцій уже є переконливим доказом доцільності застосування технології намотування.

Розглянемо циліндричну конструктивно вісесиметричну оболонку, у кожному перерізі якої відомими є осьова N_x і поперечні сили Q_y і Q_z , згинальні M_y і M_z і крутний M_x моменти, а також зовнішній або внутрішній тиск p (рис. 10.1).

Зазначимо, що таке подання зовнішніх сил пов'язане з розрахунковою схемою тонкостінного стержня, яку передбачається застосувати. Очевидно, що відсік фюзеляжу або трубопровід рідко зазнають дії якихось зосереджених моментів, сил тощо. Реальні навантаження – це аеродинамічний тиск, масові та інерційні сили тощо, які внаслідок певних перетворень зведено до силових факторів, показаних на рис. 10.1.

Як відомо, зусилля в стінці оболонки N_α , N_β і $q_{\alpha\beta}$ є функціями кутової координати θ , і визначають їх з використанням залежностей будівельної механіки тонкостінного стержня.

Розглянемо, наприклад, визначення зусиль від згинального моменту M_y , поперечної сили Q_z і крутного моменту M_x . Розрахункова схема тонкостінного стержня базується на одноплощинному законі розподілу деформацій від згинального моменту, який унаслідок симетрії оболонки відносно осі z можна взяти у вигляді

$$\varepsilon_{\alpha} = az + by + c, \quad (10.1)$$

де a, b, c – шукані коефіцієнти пропорційності.

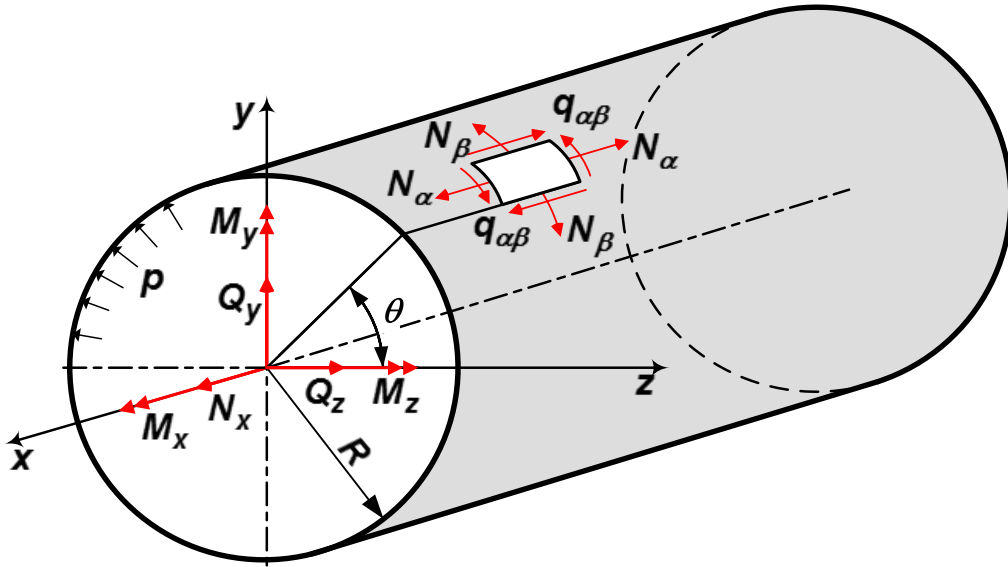


Рис. 10.1. Розрахункова схема оболонки при довільному навантаженні

Оскільки внаслідок намотування модуль пружності є постійним по контуру, то

$$\sigma_{\alpha} = E_{\alpha} \varepsilon_{\alpha} = E_{\alpha} (az + by + c) \text{ або } N_{\alpha} = \sigma_{\alpha} \delta_{\Sigma} = E_{\alpha} \delta_{\Sigma} (az + by + c). \quad (10.2)$$

Для визначення коефіцієнта a запишемо рівняння рівноваги згинальних моментів відносно осі y (рис. 10.2). Елементарна сила, що діє в елементі оболонки вздовж осі x ,

$$dF = N_{\alpha} R d\theta, \quad (10.3)$$

а елементарний згинальний момент

$$\begin{aligned} dM &= dFz = dFR \cos \theta = N_{\alpha} R^2 \cos \theta d\theta = \\ &= a E_{\alpha} \delta_{\Sigma} R^2 z \cos \theta d\theta = a E_{\alpha} \delta_{\Sigma} R^3 \cos^2 \theta d\theta. \end{aligned} \quad (10.4)$$

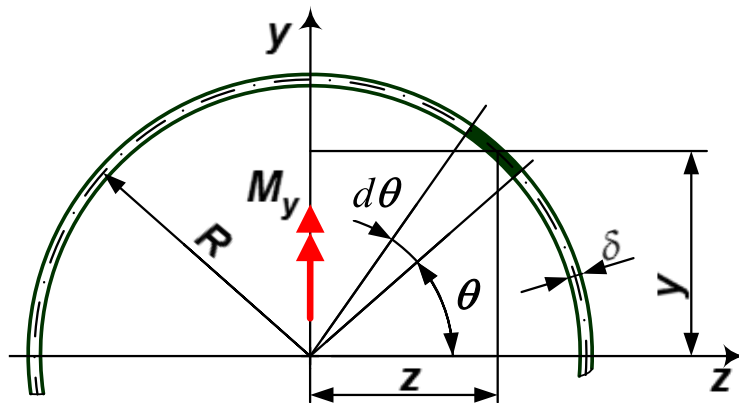


Рис. 10.2. Переріз оболонки

Рівняння рівноваги згинальних моментів відносно осі **y** має вигляд

$$\int_0^{2\pi} dM + M_y = 0.$$

Після відповідних підстановок та інтегрування отримаємо

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} a E_\alpha \delta_\Sigma R^3 \cos^2 \theta d\theta &= -M_y; & a E_\alpha \delta_\Sigma R^3 \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta &= -M_y; \\ a E_\alpha \delta_\Sigma R^3 \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4} \right) \Big|_0^{2\pi} &= -M_y; & a \pi E_\alpha \delta_\Sigma R^3 &= -M_y; \\ a &= \frac{-M_y}{E_\alpha \pi \delta_\Sigma R^3}. \end{aligned} \quad (10.5)$$

Зазначимо, що моменти інерції поперечного перерізу оболонки

$$I_z = I_y = \pi \delta_\Sigma R^3, \quad (10.6)$$

тоді

$$N_\alpha = E_\alpha \delta_\Sigma a z = E_\alpha \delta_\Sigma \frac{-M_y}{E_\alpha \pi \delta_\Sigma R^3} R \cos \theta = -\frac{M_y \cos \theta}{\pi R^2}. \quad (10.7)$$

Аналогічно виводять формулу для розрахунку коефіцієнта **b** у рівнянні (10.2). Як бачимо, зусилля залежать від структури КМ на відміну від напружень. У цьому полягає одна з переваг оперування погонними зусиллями **N_α**, **N_β** і **q_{αβ}** під час проектування оболонок.

Потік дотичних зусиль від поперечної сили в загальному випадку можна подати у вигляді суми:

$$q_{\alpha\beta} = q_p + q_0, \quad (10.8)$$

але при певному виборі місця умовного розрізу симетричного контуру **q₀ = 0** (рис. 10.3).

З будівельної механіки відомо, що

$$q_{\alpha\beta} = -\frac{Q_z S_y}{I_y}, \quad (10.9)$$

де $I_y = \pi \delta_\Sigma R^3$; **S_y** – статичний момент частини контуру, відсіченої від місця розрізу до розглядуваної точки на контурі:

$$S_y = \int_0^\theta \delta_\Sigma R d\theta R \cos \theta = \delta_\Sigma R^2 \sin \theta \Big|_0^\theta = \delta_\Sigma R^2 \sin \theta. \quad (10.10)$$

Тоді

$$q_{\alpha\beta} = -Q_z \frac{\delta_\Sigma R^2 \sin\theta}{\pi \delta_\Sigma R^3} = -\frac{Q_z \sin\theta}{\pi R}. \quad (10.11)$$

Знаки (або напрямки) потоку від сили показано на рис. 10.3 стрілками.

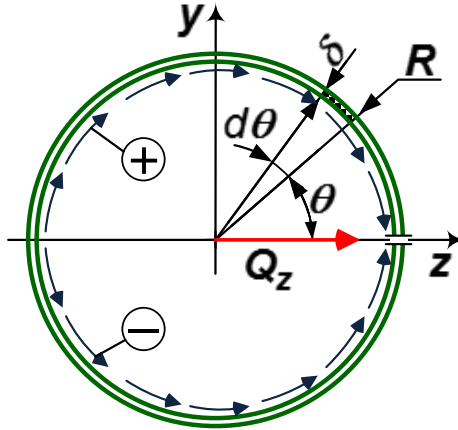


Рис. 10.3. Напрямок дії потоку дотичних зусиль від сили Q_z

При дії крутного моменту потік дотичних зусиль визначають за формулою Бредта

$$q_{\alpha\beta} = \frac{M_x}{2\pi R^2}. \quad (10.12)$$

Аналогічним чином можна знайти й інші компоненти погонних зусиль.

У табл. 10.1 наведено компоненти зусиль N_α , N_β і $q_{\alpha\beta}$ від узагальнених силових факторів, що діють у перерізі оболонки при довільному навантаженні.

Таблица 10.1

Компоненти зусиль, що діють у стінці оболонки
від узагальнених силових факторів

Погонне зусилля	Узагальнені силові фактори						
	Q_y	Q_z	M_y	M_z	M_x	N_x	p
N_α	0	0	$-\frac{M_y \cos\theta}{\pi R^2}$	$\frac{M_z \sin\theta}{\pi R^2}$	0	$\frac{N_x}{2\pi R}$	0
N_β	0	0	0	0	0	0	pR
$q_{\alpha\beta}$	$\frac{Q_y \cos\theta}{\pi R}$	$-\frac{Q_z \sin\theta}{\pi R}$	0	0	$\frac{M_x}{2\pi R^2}$	0	0

Примітка. Частка погонного зусилля N_α від внутрішнього тиску враховується через осьову силу N_x .

Таким чином, маємо сумарні зусилля:

$$N_{\alpha} = \frac{1}{2\pi R^2} (N_x R - 2M_y \cos\theta + 2M_z \sin\theta); N_{\beta} = pR; \quad (10.13)$$

$$q_{\alpha\beta} = \frac{1}{2\pi R^2} (M_x + 2Q_y R \cos\theta - 2Q_z R \sin\theta).$$

Як цільову функцію візьмемо погонну масу оболонки

$$G = 2\pi R \sum_{i=1}^n \delta_i \rho_i, \quad (10.14)$$

а як критерій проектування – мінімум маси

$$2\pi R \sum_{i=1}^n \delta_i \rho_i \rightarrow \min \quad \text{або} \quad \sum_{i=1}^n \delta_i \rho_i \rightarrow \min. \quad (10.15)$$

На першому етапі на проектні параметри накладають обмеження за міцністю у формі будь-якого критерію міцності. Як відомо, критерій міцності може бути застосований до кожного шару (тоді забезпечення міцності кожного з усіх шарів означає забезпечення міцності всього пакета КМ) або до всього пакета як до однорідного матеріалу (тоді міцність окремих шарів не перевіряють). Цим двом способам запису критерію міцності відповідають такі нерівності:

- критерій максимальних напружень:

$$\sigma_{1i}(\theta) \leq F_{1i}; \sigma_{2i}(\theta) \leq F_{2i}; \tau_{12i}(\theta) \leq F_{12i}, i = 1, \dots, n; \quad (10.16)$$

$$\sigma_{\alpha}(\theta) \leq F_{\alpha}; \sigma_{\beta}(\theta) \leq F_{\beta}; \tau_{\alpha\beta}(\theta) \leq F_{\alpha\beta}; \quad (10.17)$$

- критерій Мізеса – Хілла:

$$\frac{\sigma_{1i}^2(\theta)}{F_{1i}^2} - \frac{\sigma_{1i}(\theta)\sigma_{2i}(\theta)}{F_{1i}F_{2i}} + \frac{\sigma_{2i}^2(\theta)}{F_{2i}^2} + \frac{\tau_{12i}^2(\theta)}{F_{12i}^2} \leq 1, i = 1, \dots, n; \quad (10.18)$$

$$\frac{\sigma_{\alpha}^2(\theta)}{F_{\alpha}^2} - \frac{\sigma_{\alpha}(\theta)\sigma_{\beta}(\theta)}{F_{\alpha}F_{\beta}} + \frac{\sigma_{\beta}^2(\theta)}{F_{\beta}^2} + \frac{\tau_{\alpha\beta}^2(\theta)}{F_{\alpha\beta}^2} \leq 1. \quad (10.19)$$

Принципова особливість цих обмежень полягає в тому, що напруження як у шарах, так і в пакеті в цілому залежать від кутової координати θ (див. рис. 10.1), тобто є функціями від положення розглядуваної точки на контурі. Оскільки оболонку виготовляють намотуванням з постійними товщиною і структурою КМ, то ці параметри мають задовольняти умовам міцності по всьому контуру.

У практичних розрахунках оперувати функціональними залежностями напружень і деформацій від координати θ незручно, тому розрахунки виконують для заздалегідь обумовленої кількості точок уздовж контуру, наприклад, через кожні 15° .

Сформульована задача пошуку параметрів структури КМ стінки оболонки, що забезпечують її міцність у всіх точках контуру, по суті є проєктуванням структури КМ у «точці» при кількох розрахункових випадках, якими є комбінації зусиль N_α , N_β і $q_{\alpha\beta}$ у різних точках контуру. Оптимальну структуру КМ у цьому випадку слід шукати в класах $[\pm\varphi_1/\pm\varphi_2]$ або $[0/90/\pm\varphi]$. Насправді такі складні схеми намотування застосовують рідко. Крім того, спочатку потрібно «відчути числа», а для цього слід починати з більш простих схем намотування. У виробництві найбільш поширеним є спіральне намотування, тобто структура $[\pm\varphi]$, що дає, як показали численні розрахунки та практика, цілком прийнятні результати за узагальненим критерієм (маса – трудомісткість).

Розглянемо спочатку методику проєктування на основі пошарового аналізу міцності для оболонки, що виготовляється спіральним намотуванням. Тоді параметри структури КМ є такими:

$$n = 2, \delta_1 = \delta_2 = \delta, \varphi_1 = -\varphi_2 = \varphi, \delta_\Sigma = 2\delta.$$

Коефіцієнти жорсткості визначають за формулами (відомими з практичної роботи № 5):

$$A_{11} = \delta_\Sigma Q_{11}; A_{22} = \delta_\Sigma Q_{22}; A_{12} = \delta_\Sigma Q_{12}; A_{33} = \delta_\Sigma Q_{33}, \quad (10.20)$$

де

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \bar{E}_1 \cos^4 \varphi + \bar{E}_2 \sin^4 \varphi + 2\bar{E}_1 \mu_{21} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \sin^2 2\varphi; \\ Q_{22} &= \bar{E}_1 \sin^4 \varphi + \bar{E}_2 \cos^4 \varphi + 2\bar{E}_1 \mu_{21} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \sin^2 2\varphi; \\ Q_{12} &= (\bar{E}_1 + \bar{E}_2) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \bar{E}_1 \mu_{21} (\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi) - G_{12} \sin^2 2\varphi; \\ Q_{33} &= (\bar{E}_1 + \bar{E}_2 - 2\bar{E}_1 \mu_{21}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \cos^2 2\varphi. \end{aligned} \quad (10.21)$$

Деформації стінки оболонки ε_α , ε_β і $\gamma_{\alpha\beta}$ з урахуванням цих формул обчислюють так:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= \frac{N_\alpha A_{22} - N_\beta A_{12}}{A_{11} A_{22} - A_{12}^2} = \frac{1}{\delta_\Sigma} \frac{N_\alpha Q_{22} - N_\beta Q_{12}}{Q_{11} Q_{22} - Q_{12}^2} = \frac{1}{\delta_\Sigma} A_\alpha; \\ \varepsilon_\beta &= \frac{N_\beta A_{11} - N_\alpha A_{12}}{A_{11} A_{22} - A_{12}^2} = \frac{1}{\delta_\Sigma} \frac{N_\beta Q_{11} - N_\alpha Q_{12}}{Q_{11} Q_{22} - Q_{12}^2} = \frac{1}{\delta_\Sigma} A_\beta; \\ \gamma_{\alpha\beta} &= \frac{q_{\alpha\beta}}{A_{33}} = \frac{q_{\alpha\beta}}{\delta_\Sigma Q_{33}} = \frac{1}{\delta_\Sigma} A_{\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (10.22)$$

Слід пам'ятати, що коефіцієнти A_α , A_β і $A_{\alpha\beta}$ залежать від кутової координати θ .

Напруження в шарах можна виразити через деформації пакета таким чином:

$$\begin{aligned}\sigma_{1i} &= \frac{\bar{E}_1}{\delta_\Sigma} \left[\cos^2 \varphi_i (\mathbf{A}_\alpha + \mu_{21} \mathbf{A}_\beta) + \sin^2 \varphi_i (\mathbf{A}_\beta + \mu_{21} \mathbf{A}_\alpha) + 0.5 \mathbf{A}_{\alpha\beta} (1 - \mu_{21}) \sin 2\varphi_i \right]; \\ \sigma_{2i} &= \frac{\bar{E}_2}{\delta_\Sigma} \left[\cos^2 \varphi_i (\mathbf{A}_\beta + \mu_{12} \mathbf{A}_\alpha) + \sin^2 \varphi_i (\mathbf{A}_\alpha + \mu_{12} \mathbf{A}_\beta) + 0.5 \mathbf{A}_{\alpha\beta} (\mu_{12} - 1) \sin 2\varphi_i \right]; \\ \tau_{12i} &= \frac{\mathbf{G}_{12}}{\delta_\Sigma} \left[(\mathbf{A}_\beta - \mathbf{A}_\alpha) \sin 2\varphi_i + \mathbf{A}_{\alpha\beta} \cos 2\varphi_i \right].\end{aligned}$$

Для скорочення подальших записів подамо ці формули у вигляді

$$\sigma_{1i} = \frac{1}{\delta_\Sigma} \Omega_{1i}; \quad \sigma_{2i} = \frac{1}{\delta_\Sigma} \Omega_{2i}; \quad \tau_{12i} = \frac{1}{\delta_\Sigma} \Omega_{12i}. \quad (10.23)$$

З урахуванням цих викладок умови міцності (10.16) та (10.18) набудуть такого вигляду:

$$\frac{1}{\delta_\Sigma} \Omega_{1i} \leq F_{1i}; \quad \frac{1}{\delta_\Sigma} \Omega_{2i} \leq F_{2i}; \quad \frac{1}{\delta_\Sigma} \Omega_{12i} \leq F_{12i}; \quad (10.24)$$

$$\frac{1}{\delta_\Sigma^2} \left(\frac{\Omega_{1i}^2}{F_{1i}^2} - \frac{\Omega_{1i} \Omega_{2i}}{F_{1i} F_{2i}} + \frac{\Omega_{2i}^2}{F_{2i}^2} + \frac{\Omega_{12i}^2}{F_{12i}^2} \right) \leq 1, \quad (10.25)$$

де границі міцності F_{1i}, F_{2i} (на розтяг або стиск) вибирають за знаком коефіцієнтів Ω_{1i}, Ω_{2i} .

З цих нерівностей знайдемо мінімальну товщину стінки оболонки:

- за критерієм максимальних напружень

$$\delta_\Sigma = \min_{\varphi} \left[\max_{i, \theta} \left(\frac{\text{abs}(\Omega_{1i})}{F_{1i}}, \frac{\text{abs}(\Omega_{2i})}{F_{2i}}, \frac{\text{abs}(\Omega_{12i})}{F_{12i}} \right) \right]; \quad (10.26)$$

- за критерієм Мізеса – Хілла

$$\delta_\Sigma = \min_{\varphi} \left[\max_{i, \theta} \sqrt{\frac{\Omega_{1i}^2}{F_{1i}^2} - \frac{\Omega_{1i} \Omega_{2i}}{F_{1i} F_{2i}} + \frac{\Omega_{2i}^2}{F_{2i}^2} + \frac{\Omega_{12i}^2}{F_{12i}^2}} \right], \quad (10.27)$$

де мінімізацію за φ і максимізацію за i та θ виконують у числовому вигляді на ЕОМ. При цьому $i = 1, i = 2$, а за θ розрахунки проводять для всього контуру із заданим кроком, найчастіше 15° , і за φ – з певним кроком в інтервалі $[0; 90^\circ]$ – також, наприклад, 15° .

Після розрахунків коригують товщину з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень:

$$\delta_K = 2\delta_0 \left[\text{int} \left(\frac{\delta_\Sigma}{2\delta_0} \right) + 1 \right], \quad (10.28)$$

де δ_K – конструктивне значення товщини стінки оболонки.

Розглянемо проектування оболонки з урахуванням відповідності критерію міцності для пакета шарів, тобто з умов (10.17) і (10.19). Для цього необхідно спочатку знайти границю міцності шаруватого КМ зі структурою $[\pm\varphi]$ за методикою, використаною в практичній роботі № 6.

Аналіз залежностей, наведених у практичній роботі № 6, показує, що серед структурних параметрів КМ на величину границі міцності впливає тільки кут намотування. Це полегшує проектування на основі критерію міцності пакета в цілому.

З урахуванням формул

$$\sigma_{\alpha} = \frac{N_{\alpha}}{\delta_{\Sigma}}; \sigma_{\beta} = \frac{N_{\beta}}{\delta_{\Sigma}}; \tau_{\alpha\beta} = \frac{q_{\alpha\beta}}{\delta_{\Sigma}} \quad (10.29)$$

з розглянутих критеріїв міцності виразимо залежності для визначення мінімально необхідної товщини стінки:

- за критерієм максимальних напружень:

$$\delta_{\Sigma} = \min_{\varphi} \left[\max_{\theta} \left(\frac{N_{\alpha}}{F_{\alpha}}, \frac{N_{\beta}}{F_{\beta}}, \frac{q_{\alpha\beta}}{F_{\alpha\beta}} \right) \right]; \quad (10.30)$$

- за критерієм Мізеса – Хілла:

$$\delta_{\Sigma} = \min_{\varphi} \left[\max_{\theta} \left(\frac{N_{\alpha}^2}{F_{\alpha}^2} - \frac{N_{\alpha}N_{\beta}}{F_{\alpha}F_{\beta}} + \frac{N_{\beta}^2}{F_{\beta}^2} + \frac{q_{\alpha\beta}^2}{F_{\alpha\beta}^2} \right) \right]. \quad (10.31)$$

Порівняння результатів проектування, отриманих на основі різних способів виконання умов міцності, не дає змоги визначити серед них найбільш зручний і простий. Неможливо також зробити висновок про те, який спосіб є більш правильним і достовірним, незважаючи на те, що міцність кожного шару забезпечено: у першому випадку – на етапі проектування, а в другому – під час визначення границі міцності КМ.

Формально кінцеві результати будуть різними, оскільки гранична поверхня при виконанні умов міцності

$$\Phi_i = \frac{\sigma_{1i}^2}{F_{1i}^2} - \frac{\sigma_{1i}\sigma_{2i}}{F_{1i}F_{2i}} + \frac{\sigma_{2i}^2}{F_{2i}^2} + \frac{\tau_{12i}^2}{F_{12i}^2} \leq 1$$

для кожного шару являє собою внутрішню обвідну кривих, що описуються цією нерівністю (рис. 10.4), і в будь-якому випадку є ламаною кривою.

При записі критерію міцності для пакета в цілому гранична поверхня має вигляд гладкої кривої в межах кожної чверті. Оскільки ці криві не збігаються, то існують області, у яких умови міцності виконуються тільки для пакета в цілому, але не при пошаровому оцінюванні (див. рис. 10.4, точка А) і навпаки (див. рис. 10.4, точка В).

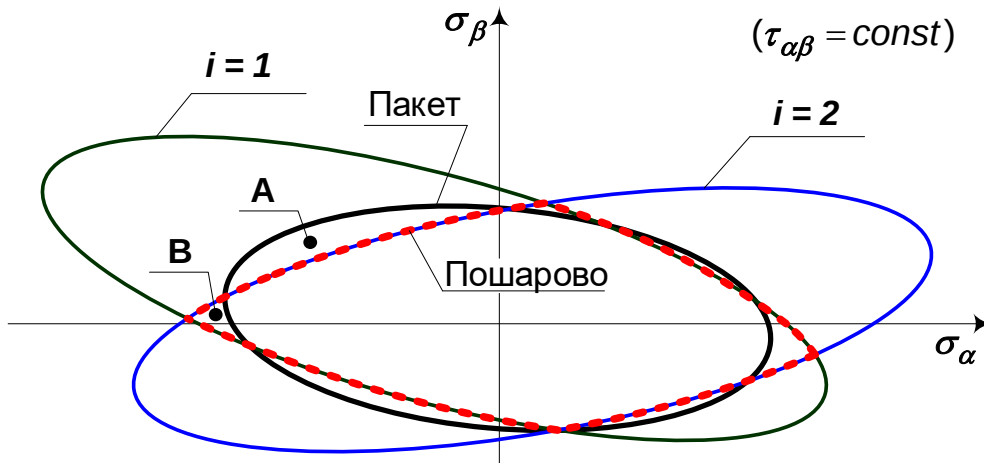


Рис. 10.4. Граничні поверхні для різних форм запису критерію міцності

Наведений аналіз є формальним і впливає з математичних міркувань, хоча насправді тут є деякий парадокс.

На практиці другий підхід до оцінювання міцності шаруватих композитів (для пакета в цілому) застосовують на етапі перевірного розрахунку на міцність, коли в розпорядженні конструктора є достовірні дані про границі міцності $F_{\alpha p}, F_{\alpha c}, F_{\beta p}, F_{\beta c}, F_{\alpha \beta}$, а також експериментально підтверджено правомочність використання того чи іншого критерію міцності.

Порядок виконання роботи

1. Обчислити величини зусиль N_α , N_β і $q_{\alpha\beta}$ для значень $\theta = j \cdot 15^\circ$, де $j = 1, \dots, 24$. Результати подати графічно на умовній розгортці контуру (рис. 10.5), а вхідні дані взяти з табл. 10.2.

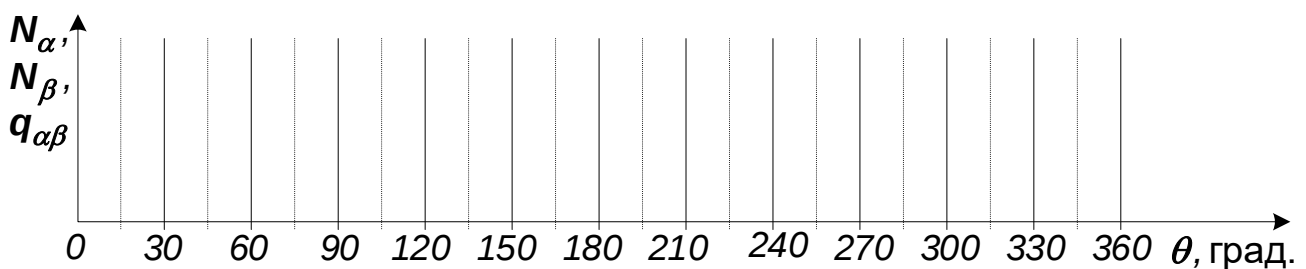


Рис. 10.5. Розподіл зусиль по контуру оболонки

2. На основі методики, викладеної в практичній роботі № 6, визначити границі міцності композита зі структурою $[\pm\varphi]$: $F_{\alpha p}, F_{\alpha c}, F_{\beta p}, F_{\beta c}, F_{\alpha \beta}$. Результати розрахунків занести до табл. 10.3.

3. Для кожного значення кута φ (з кроком 15°) визначити мінімальну товщину стінки оболонки:

- за критерієм максимальних напружень:

$$\delta_t = \max_{i,j} \left(\frac{|N_\alpha|}{F_\alpha}, \frac{|N_\beta|}{F_\beta}, \frac{|q_{\alpha\beta}|}{F_{\alpha\beta}} \right);$$

- за критерієм Мізеса – Хілла:

$$\delta_t = \max_{i,j} \sqrt{\frac{N_\alpha^2}{F_\alpha^2} - \frac{N_\alpha N_\beta}{F_\alpha F_\beta} + \frac{N_\beta^2}{F_\beta^2} + \frac{q_{\alpha\beta}^2}{F_{\alpha\beta}^2}},$$

де $i = 1, 2$ – номер шару ($\varphi_1 = \varphi$, $\varphi_2 = -\varphi$); j – номер точки контуру (див. п. 1);

$$F_\alpha = \begin{cases} F_{\alpha p} & \text{при } N_\alpha \geq 0; \\ F_{\alpha c} & \text{при } N_\alpha < 0; \end{cases} \quad F_\beta = \begin{cases} F_{\beta p} & \text{при } N_\beta \geq 0; \\ F_{\beta c} & \text{при } N_\beta < 0. \end{cases}$$

Результати розрахунків занести до табл. 10.3.

Таблиця 10.2

Вихідні дані для виконання роботи

Цифри варіанта	1-ша цифра	2-га цифра	3-тя цифра	4-та цифра						
	Матеріал	Радіус, мм	Критерій міцності	Зовнішні силові фактори						
				p , МПа	N_x , кН	Q_y , кН	Q_z , кН	M_x , кН·м	M_y , кН·м	M_z , кН·м
1	1	500	Мізеса – Хілла	0,01	1200	300	500	500	1500	600
2	2	600	Мізеса – Хілла	0,015	1100	350	450	600	1400	700
3	3	700	Максимальних напружень	0,02	1000	400	400	700	1300	800
4	4	800	Максимальних напружень	0,025	900	450	350	800	1200	900
5	5	900	Мізеса – Хілла	0,030	800	500	300	900	1100	1000
6	8	1000	Мізеса – Хілла	0,035	700	550	250	850	1000	1100
7	9	950	Максимальних напружень	0,012	1300	600	200	750	900	1200
8	10	850	Максимальних напружень	0,018	1400	650	150	650	800	1300
9	13	750	Мізеса – Хілла	0,022	1500	700	100	550	700	1400

4. Звести товщину стінки до відповідності з товщиною моношару композита, для чого визначити реалізовану кількість моношарів:

$$n = 2 \left[\text{int} \left(\frac{\delta_t}{2\delta_0} \right) + 1 \right]; \quad \delta_k = n\delta_0.$$

Результати записати в табл. 10.3. Визначити оптимальний кут намотування φ_{opt} .

Таблиця 10.3

Результати проектування оболонки

Параметри	Кут армування (намотування) φ , град.						
	0	± 15	± 30	± 45	± 60	± 75	90
E_α , ГПа							
E_β , ГПа							
$G_{\alpha\beta}$, ГПа							
$\mu_{\alpha\beta}$							
$\mu_{\beta\alpha}$							
$F_{\alpha\rho}$, МПа							
$F_{\alpha\sigma}$, МПа							
$F_{\beta\rho}$, МПа							
$F_{\beta\sigma}$, МПа							
$F_{\alpha\beta}$, МПа							
δ_t , мм							
δ_k , мм							
n							

5. Побудувати графіки коефіцієнтів запасу міцності по контуру (рис. 10.6) для оптимальної оболонки (з кутом намотування φ_{opt}) і вказати найбільш небезпечну точку контуру:

- за критерієм максимальних напружень:

$$k_{з.міц} = \frac{1}{\Phi_{міц}}, \text{ де } \Phi_{міц} = \frac{1}{\delta_k} \left[\max \left(\frac{|N_\alpha|}{F_\alpha}, \frac{|N_\beta|}{F_\beta}, \frac{|q_{\alpha\beta}|}{F_{\alpha\beta}} \right) \right].$$

- за критерієм Мізеса – Хілла:

$$k_{з.міц} = \frac{1}{\sqrt{\Phi_{міц}}}, \text{ де } \Phi_{міц} = \frac{1}{\delta_k^2} \left(\frac{N_\alpha^2}{F_\alpha^2} - \frac{N_\alpha N_\beta}{F_\alpha F_\beta} + \frac{N_\beta^2}{F_\beta^2} + \frac{q_{\alpha\beta}^2}{F_{\alpha\beta}^2} \right).$$

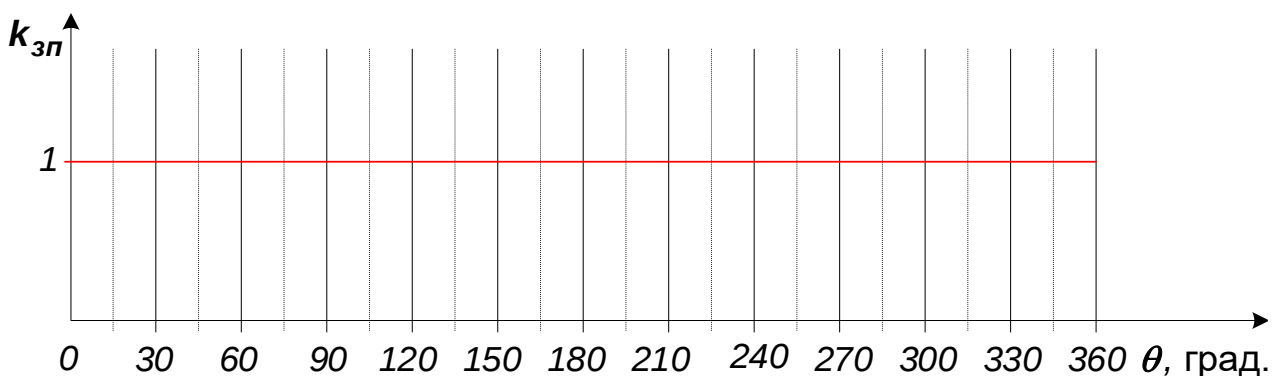


Рис. 10.6. Розподіл коефіцієнта запасу міцності по контуру оболонки

6. Проаналізувати результати. Сформулювати висновки та обґрунтувати рекомендації щодо поліпшення конструкції.

Контрольні запитання

1. Які переваги мають оболонки, що виготовляються намотуванням?
2. Чому при невісесиметричному навантаженні оболонки, що виготовляються намотуванням, матимуть дещо більшу масу, ніж при вісесиметричному навантаженні?
3. Погонні зусилля залежать від положення точки на контурі. Чи залежать від цього напруження в шарах КМ?
4. Яким чином визначають необхідну кількість моношарів у пакеті КМ?
5. Чому в отриманих формулах (10.26) і (10.27) мінімізацію виконують за φ , а максимізацію – за i та θ ?
6. Які умови має задовольняти товщина шарів з кутами укладання (намотування) 0 і 90° ?
7. Чому під час проектування оболонки на основі забезпечення міцності кожного шару може не виконуватися критерій міцності для пакета і навики?
8. Чому як конструктивне значення товщини беруть максимальне значення, знайдене для шарів і точок контуру?
9. Чим пояснюється необхідність проектування оболонок на основі різних способів виконання умов міцності?
10. Чому на етапі проектування найбільш доцільним є пошарове оцінювання міцності, а на етапі перевірного розрахунку розглядають запис критерію міцності для пакета в цілому?

Практична робота № 11

ПРОЄКТУВАННЯ ПІДКРІПЛЕНИХ КОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛЕЙ

Мета роботи:

1. Ознайомлення з типовими КТР підкріплених композитних панелей.
2. Вивчення методу проєктування підкріплених композитних панелей.
3. Визначення конструктивних параметрів підкріпленої композитної панелі.

Теоретичні відомості

У техніці для сприйняття й передавання розподілених по поверхні навантажень застосовуються панелі (пластини, плити). Наприклад, аеродинамічну піднімальну силу сприймає обшивка крила, що складається з панелей, установлених на силовому каркасі (лонжерони й нервюри). Плити перекриття поверхів будівель сприймають навантаження від людей, меблів тощо й передають їх на стіни. Аналогічних прикладів існує чимало, що пояснює широке застосування панелей як конструктивного елемента. Уміння їх проєктувати, розраховувати на міцність і виготовляти – найважливіша складова інженерної діяльності.

Розглянемо характер навантаження панелей на прикладі обшивки крила літального апарата. На обшивку ззовні діють лише аеродинамічні сили – піднімальна сила й сила опору (рис. 11.1). Піднімальна сила забезпечує підтримку фюзеляжу з пасажиром або вантажами в повітрі, а опір повітря долається тягою двигунів. Піднімальна сила, розподілена по розмаху крила, може передаватися на фюзеляж для зрівноваження гравітаційних сил за допомогою конструктивного елемента, що працює на згин (рис. 11.2).

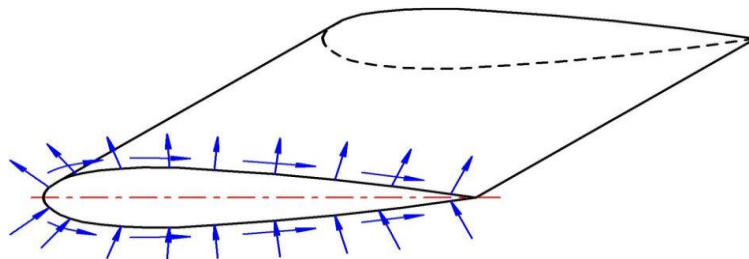


Рис. 11.1. Аеродинамічні сили, що діють на обшивку крила

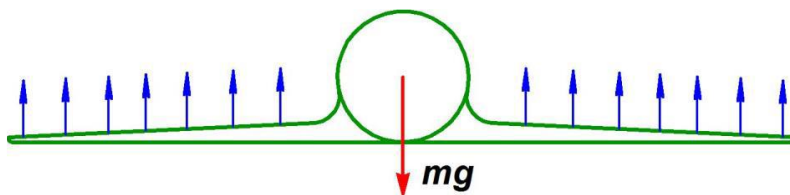


Рис. 11.2. Зрівноваження гравітаційних сил розподіленим навантаженням

До таких елементів належать балки, оболонки, пластини, принципи роботи яких є приблизно однаковими й аналогічними принципу роботи балки або тонкостінного стержня, що вивчається в будівельній механіці.

Розподілене зовнішнє навантаження перетворюється на систему нормальних і дотичних напружень. Звідси випливає, що на панелі обшивки діють зусилля в її площині та розподілений по поверхні тиск (рис. 11.3).

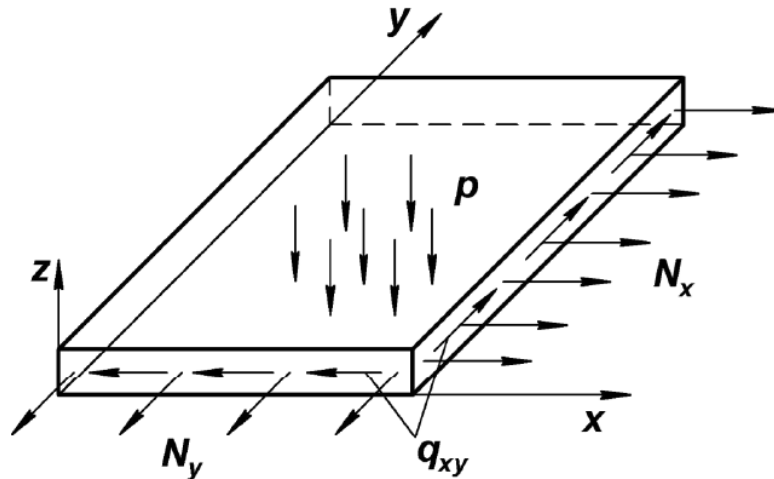


Рис. 11.3. Навантаження, що діють на панель обшивки крила

За малим винятком обшивку виготовляють із симетричною структурою, тобто з ортотропного композиту в осях x - y . Більшість аналітичних формул для визначення напружено-деформованого стану отримано для панелей з ортотропного матеріалу, причому найчастіше для пластин із симетричним розташуванням шарів відносно серединної поверхні (рис. 11.4).

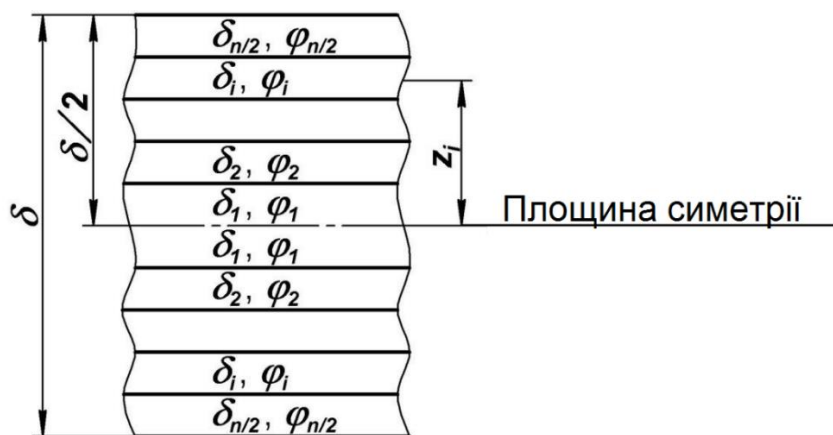


Рис. 11.4. Симетричне укладання шарів КМ

Як ортотропія, так і симетрія укладання шарів по товщині є цілком виправданими, тому що в цьому випадку при силовому й температурному навантаженні в панелі не виникають небажані деформації та напруження, пов'язані, наприклад, з коефіцієнтами взаємного впливу, коли нормальні напруження спричиняють зсувні деформації, а якщо ці зсувні деформації

стиснені каркасом, то виникають додаткові дотичні напруження. Незрівноваженість структури по товщині (несиметричність пакета шарів) при зміні температури призводить до появи температурних моментів (згинального й крутного), що спричиняють короблення панелі.

Нині в конструкціях літальних апаратів застосовуються чотири варіанти конструктивно-технологічних рішень панелей із композиційних матеріалів (рис. 11.5):

- гладкі шаруваті (іноді використовується термін «однорідні»);
- панелі із заповнювачем (типу «сендвіч» або тришарові);
- стрингерні;
- вафельні, або сітчасті.

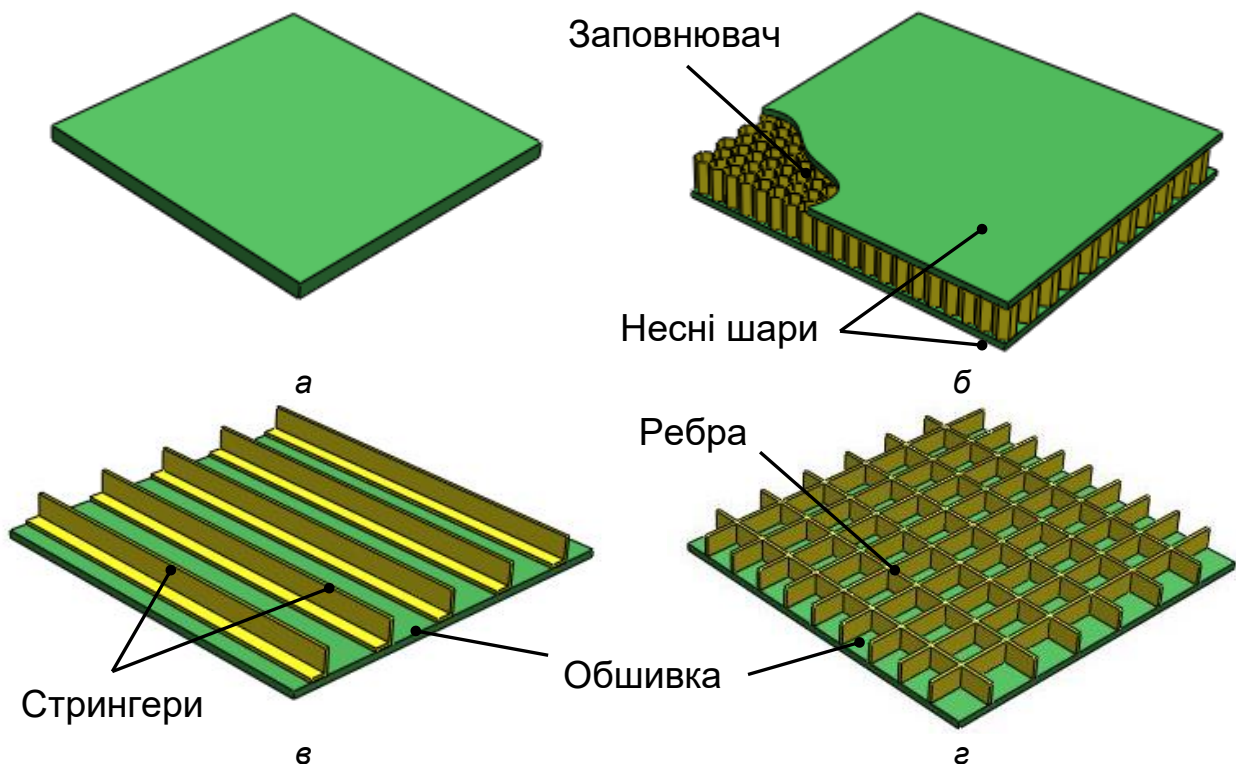


Рис. 11.5. Типи панелей: а – гладка шарувата; б – панель із заповнювачем; в – підкріплена (стрингерна); г – вафельна

Для металевих панелей справджується залежність їх ефективності від інтенсивності навантаження (рис. 11.6). Є всі підстави припускати, що аналогічна залежність справджується й для композитних панелей.

Оскільки не існує єдиної математичної моделі, яка б описувала всі можливі КТР та окремими випадками якої були б зазначені типи панелей, у цій практичній роботі розглянемо окремий випадок – підкріплену панель.

Зазвичай зі збільшенням навантажень маса сендвіч-панелей суттєво збільшується. Відбувається це тому, що починаючи з якогось значення товщини несних шарів заповнювач не може забезпечити їх спільну роботу при згинанні. Кожен несний шар буде працювати самостійно як пластина на пружній основі, якою є заповнювач та інший несний шар. У цьому випадку

альтернативою сендвіч-панелям є панелі, підкріплені поздовжніми ребрами, або стрингерні панелі (рис. 11.6).

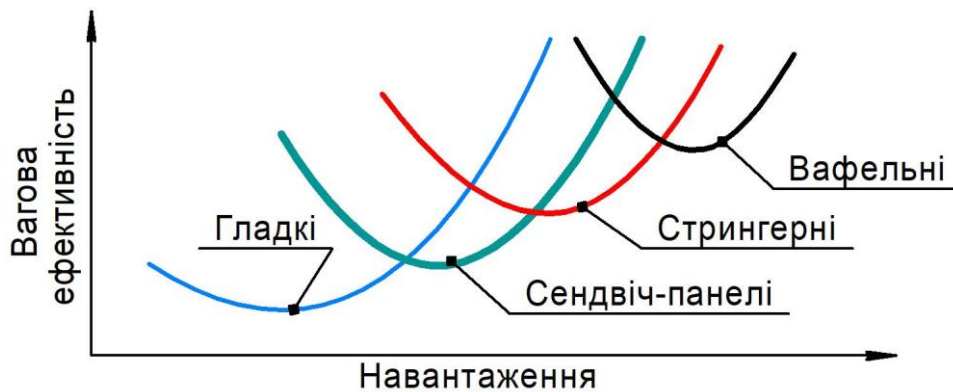


Рис. 11.6. Аналіз ефективності різних типів панелей

Підкріплювальні ребра (або стрингери) (рис. 11.7) виконують кілька функцій, що підвищує несну здатність панелі:

- зменшення розмірів ділянок обшивки, а отже, і підвищення критичних зусиль місцевої втрати стійкості;
- підвищення згинальної жорсткості D_1 панелі внаслідок додаткової згинальної жорсткості ребер, що приводить до підвищення критичних зусиль загальної втрати стійкості;
- сприйняття частини зусиль N_x стрингерами, які мають достатній момент інерції для забезпечення їх стійкості (у площині панелі стрингери не можуть втрачати стійкість через їх надійне з'єднання з обшивкою) і розвантажують обшивку, унаслідок чого вона стає більш стійкою;
- можливість використання пултрузійних профілів;
- можливість об'єктивного неруйнівного контролю якості як окремих елементів (обшивки і стрингерів), так і панелі загалом.

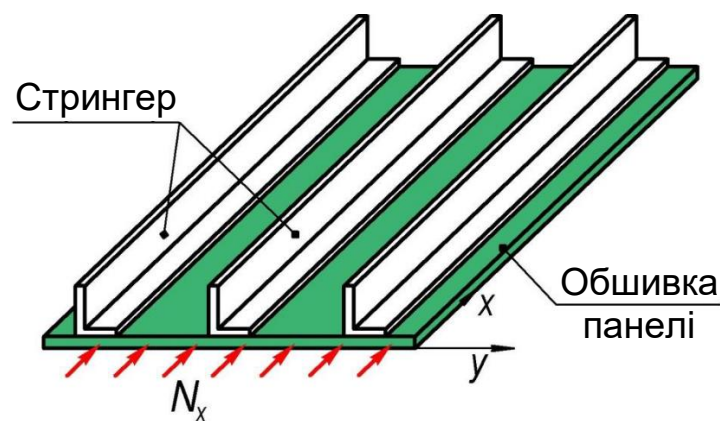


Рис. 11.7. Стрингерна панель

Як і для інших типів панелей, цільовою функцією та критерієм проєктування вибирають мінімум маси панелі розміром $a \times b$ (рис. 11.8), яка по осі x підкріплена рівномірно розташованими ребрами (стрингерами):

$$G = ab\rho_{обш}\delta + anf\rho_{стр} = ab\rho_{обш}\delta + \frac{ab}{t}f\rho_{стр} =$$

$$= ab\left(\delta\rho_{обш} + \frac{f}{t}\rho_{стр}\right) \rightarrow \min,$$

де f – площа поперечного перерізу стрингера; n – кількість стрингерів; $\rho_{обш}$, $\rho_{стр}$ – густина матеріалів обшивки та стрингерів.

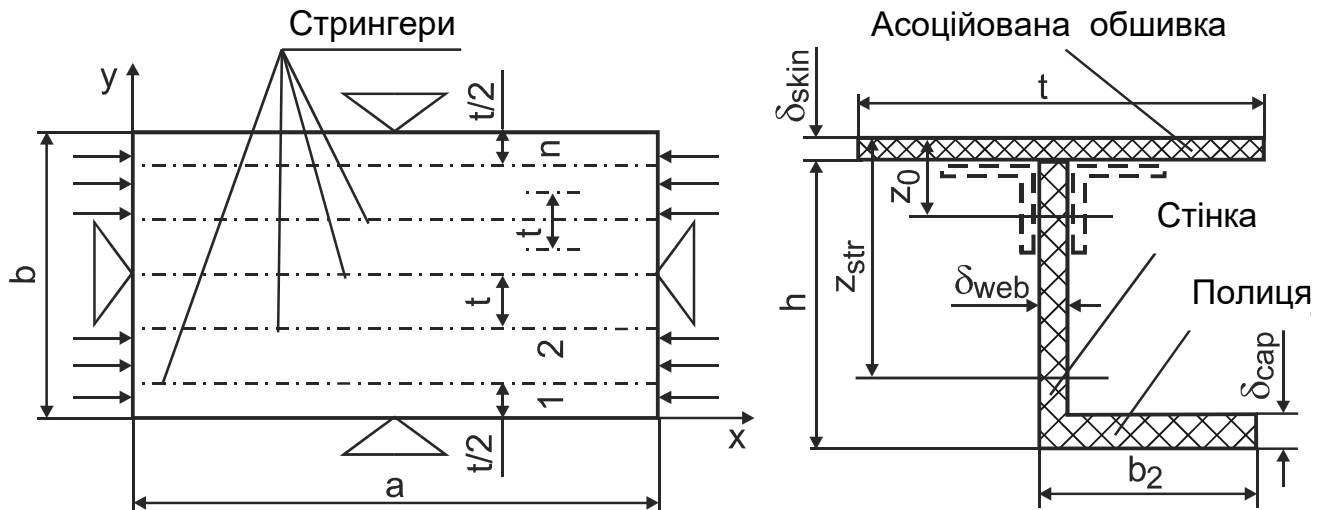


Рис. 11.8. Розрахункова схема стрингерної панелі

Проектні (шукані) параметри:

- товщина та структура КМ обшивки;
- кількість стрингерів, форма та розміри поперечного перерізу, а також структура КМ елементів стрингера (полиць і стінок).

На ці параметри накладається кілька обмежень:

- 1) забезпечення міцності обшивки/стрингерів;
- 2) забезпечення загальної стійкості стрингерної панелі;
- 3) забезпечення локальної стійкості стінки стрингера й полиці;
- 4) структурні обмеження на геометрію стрингерних елементів.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з типовими конструкціями підкріплених композитних панелей. Відповідно до індивідуального варіанта завдання (див. рис. 11.8, табл. 11.1), вибрати механічні властивості матеріалу обшивки та ребер жорсткості (стрингерів) (див. табл. Д.1.1). Схему укладання типової підкріпленої композитної панелі взяти такою: обшивка – 0° , стрингери – 0° .

2. Обчислити коефіцієнти спирання обшивки $K_{x\ skin}$ та елементів стрингера – стінки $K_{x\ web}$ і полиці $K_{x\ cap}$, використовуючи такі формули (для шарнірного типу спирання):

$$K_{x\ skin} = 2 \left(1 + \frac{E_{1\ skin} \mu_{21\ skin} + 2G_{12\ skin} (1 - \mu_{12\ skin} \mu_{21\ skin})}{\sqrt{E_{1\ skin} E_{2\ skin}}} \right);$$

$$K_{x\ web} = 2 \left(1 + \frac{E_{1\ str} \mu_{21\ str} + 2G_{12\ str} (1 - \mu_{12\ str} \mu_{21\ str})}{\sqrt{E_{1\ str} E_{2\ str}}} \right);$$

$$K_{x\ cap} = 0,4 + \frac{0,3E_{1\ str} \mu_{21\ str} + G_{12\ str} (1 - \mu_{12\ str} \mu_{21\ str})}{\sqrt{E_{1\ str} E_{2\ str}}}.$$

3. Визначити мінімальну товщину обшивки з умов міцності, урахувавши сумісні деформації обшивки/стрингерів і конструктивні вимоги (кількість моношарів як в обшивці, так і в стрингерах має бути цілим числом, кратним товщині моношару δ_0):

$$\delta_{skin} = \begin{cases} \frac{kN}{F_{1c\ skin}}, & \text{якщо } \frac{F_{1c\ skin}}{E_{1\ skin}} < \frac{F_{1c\ str}}{E_{1\ str}}; \\ \frac{kNE_{1\ str}}{F_{1c\ str} E_{1\ skin}}, & \text{якщо } \frac{F_{1c\ skin}}{E_{1\ skin}} > \frac{F_{1c\ str}}{E_{1\ str}}, \end{cases}$$

де $F_{1c\ skin}$, $F_{1c\ str}$ – границі міцності на стиск обшивки та стрингерів.

Якщо товщина обшивки є меншою або дорівнює товщині одного моношару, то її необхідно збільшити до $4\delta_0$, тобто по товщині обшивка має містити не менше чотирьох моношарів.

4. Розрахувати необхідну кількість стрингерів n за умовою локальної стійкості обшивки між стрингерами:

$$n = \text{int} \left[\left(\frac{12b^2 kN (1 - \mu_{12\ skin} \mu_{21\ skin})}{K_{x\ skin} \pi^2 \delta_{skin}^3 \sqrt{E_{1\ skin} E_{2\ skin}}} \right)^{0,5} \right].$$

5. Оцінити можливу комбінацію геометричних параметрів стрингера із застосуванням таких обмежень:

а) рівновага сил і сумісність деформації обшивки/стрингерів:

$$\frac{kN}{\delta_{skin}} b \delta_{skin} + \frac{kN}{\delta_{skin}} \frac{E_{1\ str}}{E_{1\ skin}} n \left[(h - \delta_{cap}) \delta_{web} + b_2 \delta_{cap} \right] = Nb;$$

б) локальна стійкість стінки й полиці стрингера:

$$\left(\frac{\delta_{web}}{h - \delta_{cap}} \right)^2 \cdot \frac{\pi^2 \sqrt{E_{1\ str} E_{2\ str}}}{12(1 - \mu_{12\ str} \mu_{21\ str})} K_{x\ web} \geq \frac{kN}{\delta_{skin}} \frac{E_{1\ str}}{E_{1\ skin}};$$

$$\left(\frac{\delta_{cap}}{b_2 - \delta_{web}} \right)^2 \cdot \frac{\pi^2 \sqrt{E_{1str} E_{2str}}}{12(1 - \mu_{12str} \mu_{21str})} K_{x cap} \geq \frac{KN}{\delta_{skin}} \frac{E_{1str}}{E_{1skin}};$$

в) конструктивні обмеження на геометрію стрингерних елементів, наприклад, співвідношення $b_2 \geq (15...25)\delta_{web}$ можна використовувати для аналізу. В іншому випадку для аналізу також можна використовувати умову забезпечення стабільності стінки та полиці при тому самому навантаженні.

6. Перевірити виконання умови глобальної стійкості всієї панелі:

$$\frac{N}{N_{cr}} \leq 1,$$

де N_{cr} – критичне навантаження всієї панелі при втраті глобальної стійкості;

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 K_x}{ab} \sqrt{D_x D_y}.$$

Тут K_x – коефіцієнт спирання всієї панелі (уважатимемо, що K_x дорівнює коефіцієнту спирання обшивки $K_{x skin}$ (див. п. 2)); D_x , D_y – жорсткості панелі в напрямках x та y :

$$D_x = D_{x skin} + D_{x str} = \bar{E}_{x skin} \left[\frac{\delta_{skin}^3}{12} + \delta_{skin} \left(\frac{\delta_{skin}}{2} - z_0 \right)^2 \right] + \frac{\bar{E}_{x str}}{t} \left(I_{x str} + F_{str} (z_i - z_0)^2 \right), \quad D_y \approx D_{y skin} = \bar{E}_{y skin} \frac{\delta_{skin}^3}{12},$$

де $\bar{E}_{x skin}$, $\bar{E}_{y skin}$, $\bar{E}_{x str}$ – зведені модулі пружності обшивки та стрингерів; $I_{x str}$ – момент інерції стрингера відносно власної головної осі y' ; F_{str} – площа перерізу стрингера; t – ширина обшивки, асоційованої зі стрингером $t = b/(n+1)$; z_i – вертикальна координата центра жорсткості стрингера (див. рис. 11.8); z_0 – центр жорсткості системи обшивка – стрингер,

$$z_0 = \frac{t \frac{\delta_{skin}^2}{2} E_{1skin} + E_{1str} S_{1str}}{t E_{1skin} \delta_{skin} + F_{str} E_{1str}},$$

причому статичний момент стрингера S_{1str} відносно зовнішньої поверхні обшивки визначити так:

$$S_{1str} = \delta_{web} h \frac{h + \delta_{skin}}{2} + (b_2 - \delta_{web}) \delta_{cap} \left(h + \frac{\delta_{skin} - \delta_{cap}}{2} \right).$$

Таблиця 11.1

Варіанти для розрахунку

Номер варіанта	Матеріал обшивки	Матеріал стрингера	Розміри панелі, м		Частина навантаження, що передається обшивкою, k	Навантаження N , кН/м
			a	b		
1	1	2	1,00	0,80	0,50	600
2	2	1	1,40	0,70	0,48	540
3	3	1	0,90	0,60	0,46	400
4	4	2	0,75	0,75	0,44	350
5	6	3	1,20	0,60	0,42	320
6	7	4	0,85	0,68	0,40	360
7	8	2	1,35	0,90	0,30	300
8	9	4	0,70	0,56	0,32	340
9	10	3	1,20	0,80	0,34	300
10	1	3	1,00	1,00	0,36	460
11	2	3	0,96	0,64	0,38	330
12	3	2	1,05	0,70	0,40	400
13	4	1	1,15	0,92	0,42	310
14	6	4	1,11	0,74	0,44	280
15	7	3	0,90	0,90	0,46	340
16	8	1	1,08	0,72	0,30	350
17	9	2	1,25	1,00	0,32	330
18	10	4	1,36	0,68	0,34	260
19	1	1	1,20	0,96	0,36	450
20	2	2	1,38	0,92	0,38	560
21	4	1	1,20	0,72	0,40	400
22	6	2	0,85	1,00	0,44	320
23	7	3	1,35	0,68	0,48	340
24	8	4	0,70	0,96	0,50	300
25	9	1	1,20	0,92	0,55	260

7. Накреслити ескіз розрахункової панелі в масштабі, показати поперечний переріз стрингера й визначити масу панелі. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Яка аналітична модель панелі використовується під час її проектування? Для яких елементів літака її можна застосовувати?
2. Як класифікуються панелі літаків за геометрією й типовими конструктивними рішеннями?
3. Опишіть основний розрахунковий стан стрингерних панелей.
4. Назвіть основні способи підвищення стійкості стрингерних панелей.

Практична робота № 12

ЗАПОВНЮВАЧІ ДЛЯ ТРИШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета роботи:

1. Ознайомлення з типами, структурою й матеріалами заповнювачів авіаційних конструкцій.
2. Вивчення методик прогнозування ефективних характеристик заповнювачів залежно від їх конструктивних параметрів.

Теоретичні відомості

Основний вид втрати несної здатності тонкостінних конструкцій – це втрата стійкості або недопустимо великі прогини (переміщення). Як відомо, критичні зусилля є прямо пропорційними геометричній складовій згинальних жорсткостей. Для забезпечення стійкості панелі після оптимізації структури КМ необхідно збільшувати товщину або шукати інші способи збільшення моменту інерції. З курсу механіки матеріалів і конструкцій відомо, що найефективнішим способом збільшення моменту інерції при постійній площі поперечного перерізу є рознесення матеріалу.

Для забезпечення спільної роботи несних шарів між ними розташовується легкий заповнювач, функціями якого є запобігання зближенню несних шарів і забезпечення їх спільної роботи при згинанні панелі.

Як заповнювачі частіше застосовуються пінопласти, а також стільникові, гофровані, складчасті й трубчасті заповнювачі (рис. 12.1, дод. 6).

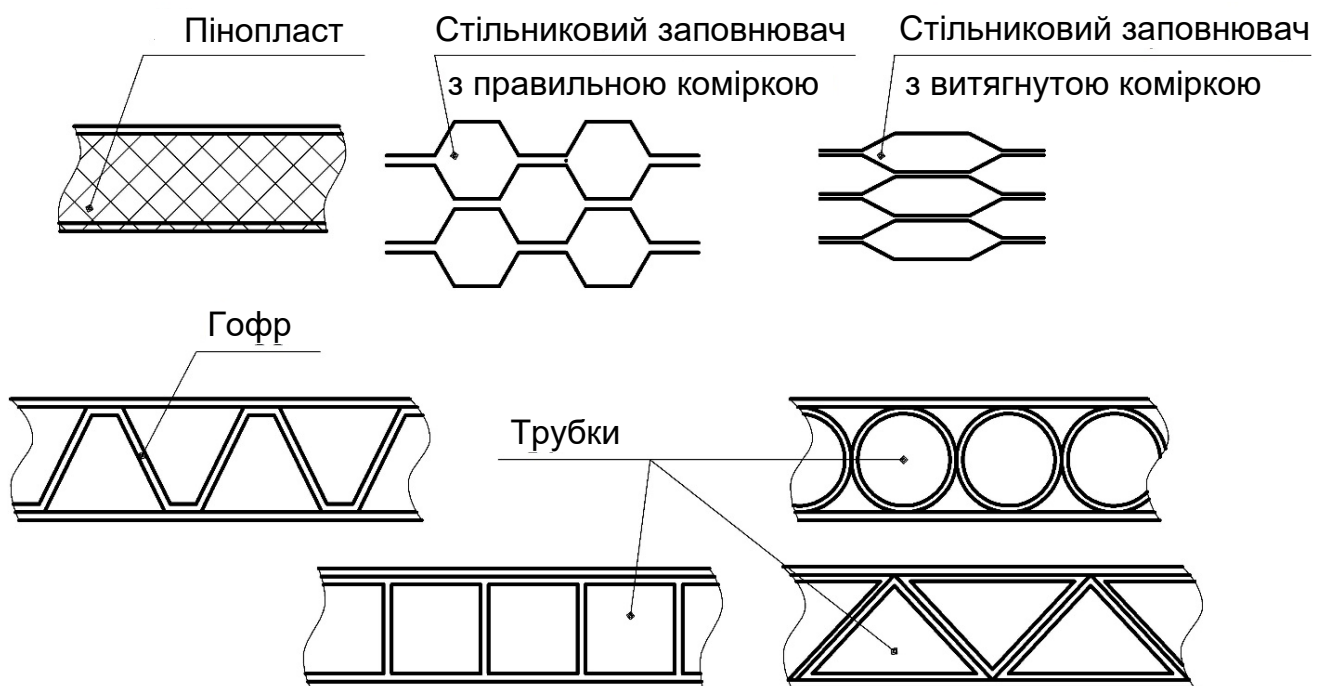


Рис. 12.1. Деякі конструктивні форми заповнювачів

Геометрію стільникового заповнювача показано на рис. 12.2.

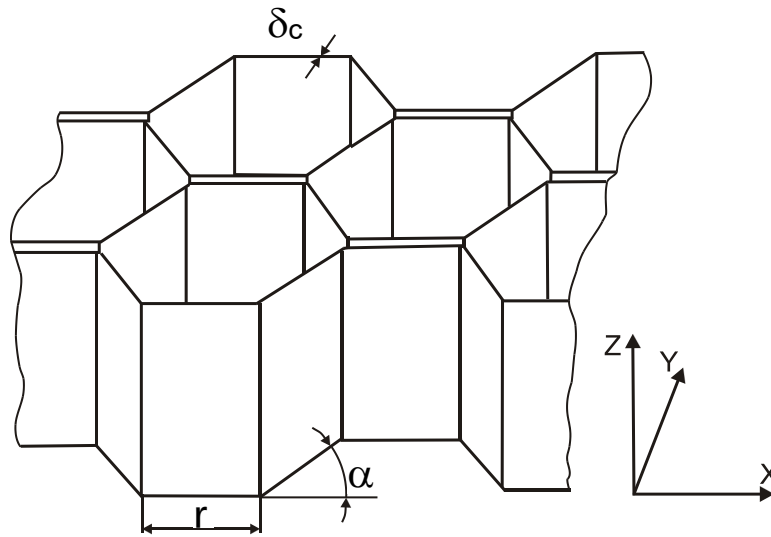


Рис. 12.2. Геометрія стільникового заповнювача

Ефективні характеристики стільникового заповнювача залежать від його конструктивних параметрів. Для визначення модулів зсуву й густини стільникового заповнювача використовують такі формули:

$$G_{xz} = \frac{1 + \cos \alpha}{2 \sin \alpha} \frac{\delta_c}{r} G, \quad (12.1)$$

$$G_{yz} = \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} \frac{\delta_c}{r} G, \quad (12.2)$$

$$\rho_3 = \rho k \frac{2 \delta_c}{r \sin \alpha (1 + \cos \alpha)}, \quad (12.3)$$

де $k = 1,06 \dots 1,08$ – коефіцієнт, що враховує масу клею (для стільникових заповнювачів на основі тканин $k = 1$).

Отже, з формул (12.1) і (12.2) випливає, що стільникові заповнювачі є ортотропними середовищами, тобто їх ефективні характеристики будуть залежати від напрямку укладання, який характеризується кутом φ (рис. 12.3):

$$\frac{1}{G_{x'z}} = \frac{\cos^2 \varphi}{G_{xz}} + \frac{\sin^2 \varphi}{G_{yz}}; \quad (12.4)$$

$$\frac{1}{G_{y'z}} = \frac{\sin^2 \varphi}{G_{xz}} + \frac{\cos^2 \varphi}{G_{yz}}. \quad (12.5)$$

Для ізотропних матеріалів модуль зсуву можна оцінити, використовуючи таку залежність:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (12.6)$$

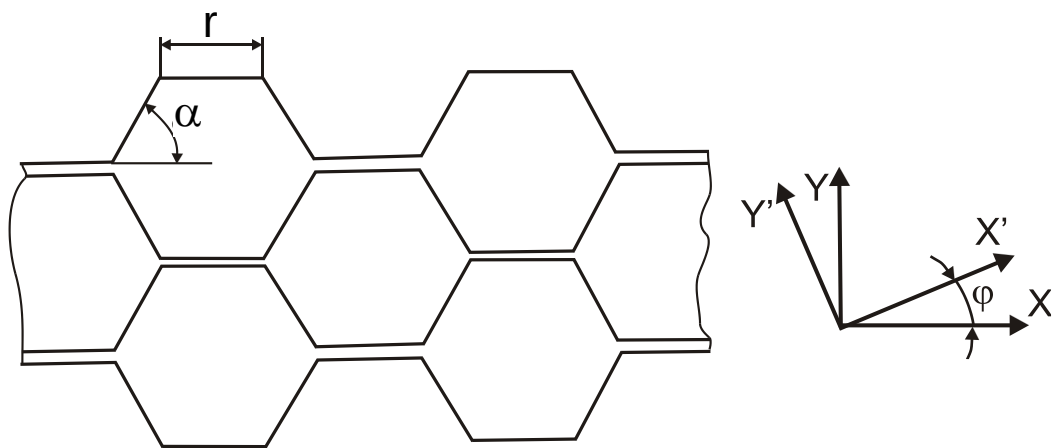


Рис. 12.3. До розрахунку параметрів жорсткості стільникового заповнювача під довільним кутом

Характеристики матеріалів, які використовуються при виробництві стільникових заповнювачів:

- алюмінієва фольга: $E = 72$ ГПа, $\mu = 0,33$, $\rho = 2700$ кг/м³;
- полімерний папір: $E = 7,8$ ГПа, $\mu = 0,3$, $\rho = 1500 \dots 2000$ кг/м³;
- склопластик: $E = 8$ ГПа, $\mu = 0,28$, $\rho = 2500$ кг/м³.

Характеристики поширених пінопластів:

- ПС-4: $E = 40$ МПа, $\mu = 0,3$;
- ФК-20: $E = 400$ МПа, $\mu = 0,3$;
- ПХВ-1: $E = 120$ МПа, $\mu = 0,3$.

Порядок виконання роботи

1. Проаналізувати поширені конструктивні форми заповнювачів і матеріали, які використовуються при виробництві заповнювачів.

2. Описати технологічний процес виготовлення стільникових заповнювачів.

3. Згідно з індивідуальним варіантом завдання (табл. 12.1) виконати таке:

– побудувати графік залежності модулів зсуву G_{xz} , G_{yz} і густини стільникового заповнювача ρ_z від ступеня розтягування ($\alpha = 20^\circ \dots 75^\circ$) у двох площинах, для чого вибрати геометричні параметри стільників заданого зразка;

– визначити напрямки максимальної зсувної жорсткості для шестигранних стільникових заповнювачів;

– визначити модулі зсуву G_{xz} , G_{yz} у двох площинах комбінованого заповнювача (стільники, що заповнені пінопластом):

$$G_{c3\ xz} = G_3\theta + G_{c\ xz}(1 - \theta); \quad (12.7)$$

$$G_{c3\ yz} = G_3\theta + G_{c\ yz}(1 - \theta), \quad (12.8)$$

де G_{c3} – інтегральна жорсткість стільників, заповнених пінопластом;

G_z – жорсткість пінопласту; $G_{c\,xz}$, $G_{c\,yz}$ – жорсткість матеріалу стільникового заповнювача; θ – середній об’ємний уміст стільників в інтегральному заповнювачі.

Об’ємний уміст стільників визначити за формулою

$$\theta = A_c / A_z, \quad (12.9)$$

де A_c та A_z – площі перерізу стільників і пінопласту в репрезентативній комірці.

Значення θ залежно від кута розтягування стільників α можна оцінити так:

α	45°	60°	75°
θ	2,46 δ/r	2,3 δ/r	2,43 δ/r

4. Обґрунтувати доцільність використання різних заповнювачів для оболонок зі стінкою типу «сендвіч», навантажених тиском, осьовою силою, крутним моментом, а також пластин, навантажених зусиллями в площині та поперечним тиском.

5. Оформити звіт про виконання практичної роботи.

Таблиця 12.1

Варіанти індивідуальних завдань

Номер варіанта	Матеріал стільників, розміри δ_c/r , мм	Матеріал пінопласту	Кут α , град. (ступінь розтягування)
1	Алюмінієва фольга, 0,30/6,0	ПС-4	45
2	Полімерний папір, 0,15/8,0	ФК-20	60
3	Склопластик, 0,35/5,0	ПХВ-1	75
4	Склопластик, 0,20/6,0	ПХВ-1	45
5	Алюмінієва фольга, 0,20/8,0	ПС-4	60
6	Полімерний папір, 0,35/6,0	ФК-20	60
7	Алюмінієва фольга, 0,40/10,0	ПС-4	75
8	Склопластик, 0,30/12,0	ПХВ-1	45
9	Полімерний папір, 0,15/6,0	ПС-4	60
10	Алюмінієва фольга, 0,25/5,0	ФК-20	75

Контрольні запитання

1. Які існують типи й матеріали заповнювачів?
2. Опишіть геометрію стільникових заповнювачів.
3. Яким є призначення заповнювачів?
4. Запишіть формули взаємозв'язку густини та жорсткості стільникового заповнювача.
5. Опишіть принципи вибору матеріалу заповнювача.
6. Як орієнтація стільникового заповнювача впливає на параметри його жорсткості?

Практична робота № 13

АНАЛІЗ МІЦНОСТІ ТОЧКОВОГО МЕХАНІЧНОГО З'ЄДНАННЯ МЕТАЛ – КОМПОЗИТ

Мета роботи:

1. Ознайомлення з методами механічного з'єднання метал – композит.
2. Засвоєння методики розрахунку механічного з'єднання метал – композит.

Теоретичні відомості

Розрахунок точкового механічного з'єднання полягає у виконанні одного з трьох можливих варіантів завдань на основі типового набору формул для «умовного» розрахунку:

- 1) оцінювання напруженого стану елементів з'єднання;
- 2) оцінювання несної здатності з'єднання;
- 3) проектування з'єднання.

Розглянемо докладніше ці завдання. Для оцінювання напруженого стану з'єднання необхідно визначити середні значення напружень в елементах механічного з'єднання з одним кріпильним елементом за умови, що відомими є міцнісні (якщо потрібно, ще й пружні) характеристики матеріалів (табл. 13.1 та 13.2), геометричні параметри (рис. 13.1, а, табл. 13.3) і навантаження, що передається. Використовуючи формули (13.1)–(13.4) без перетворення, отримують значення середніх напружень, що спричиняють руйнування відповідного виду, і порівнюють їх з допустимими значеннями. На основі цього порівняння роблять висновок про характер напруженого стану з'єднання. Навантаження N вважається відомим.

Таблиця 13.1

Характеристики композитної деталі 1, виготовленої з вуглецевої стрічки ЕЛУР-008П і сполучного 5-211-БН (на основі епоксидної смоли), послідовність укладання шарів [0₅₀ / 90₁₀ / ±45₄₀]

Параметр	E_x , ГПа	E_y , ГПа	G_{xy} , ГПа	μ_{xy}	F_{xp} , МПа	F_{xs} , МПа	F_{yp} , МПа	F_{ys} , МПа	F_{xy} , МПа	$[\sigma_{зм}]$, МПа
Значення	80	32	17	0,41	248	498	97	224	106	250

Примітка. Міцність композитної деталі на зсув узяти такою, що дорівнює 70 МПа.

Умова забезпечення міцності одиничного кріпильного елемента на зріз (див. рис. 13.1):

$$\frac{4N}{\pi d^2} \leq \tau_{к.е}, \quad (13.1)$$

де N – навантаження, що передається з'єднанням; d – діаметр кріпильного елемента (болта, заклепки, штифта, шпильки тощо); $\tau_{к.е}$ – границя міцності матеріалу кріпильного елемента на зріз.

Таблиця 13.2

Характеристики металевої деталі 2 (алюмінієвий сплав АК4-1)
і матеріалу штифта (30ХГСА)

Параметр	Деталь 2	Штифт
Границя міцності на розтяг $\sigma_{бр}$, МПа	400	1080
Границя міцності на стиск σ_{bc} , МПа	420	1080
Модуль пружності при розтягуванні E_p , ГПа	72	215
Модуль пружності при стисканні E_c , ГПа	73	215
Коефіцієнт Пуассона	0,33	0,3
Границя пропорційності при розтягуванні $\sigma_{пр.р}$, МПа	270	810
Границя пропорційності при стисканні $\sigma_{пр.с}$, МПа	280	810
Границя плинності при розтягуванні $\sigma_{пл.р}$, МПа	320	830
Границя плинності при стисканні $\sigma_{пл.с}$, МПа	335	830
Максимальна деформація δ , %	8	10
Допустимі напруження змінання $[\sigma_{зм}]$, МПа	268	664
Границя міцності на зсув $\tau_{зс}$, МПа	240	648

Примітка. Припускається, що напруження на змінання становлять 80 % від границі плинності.

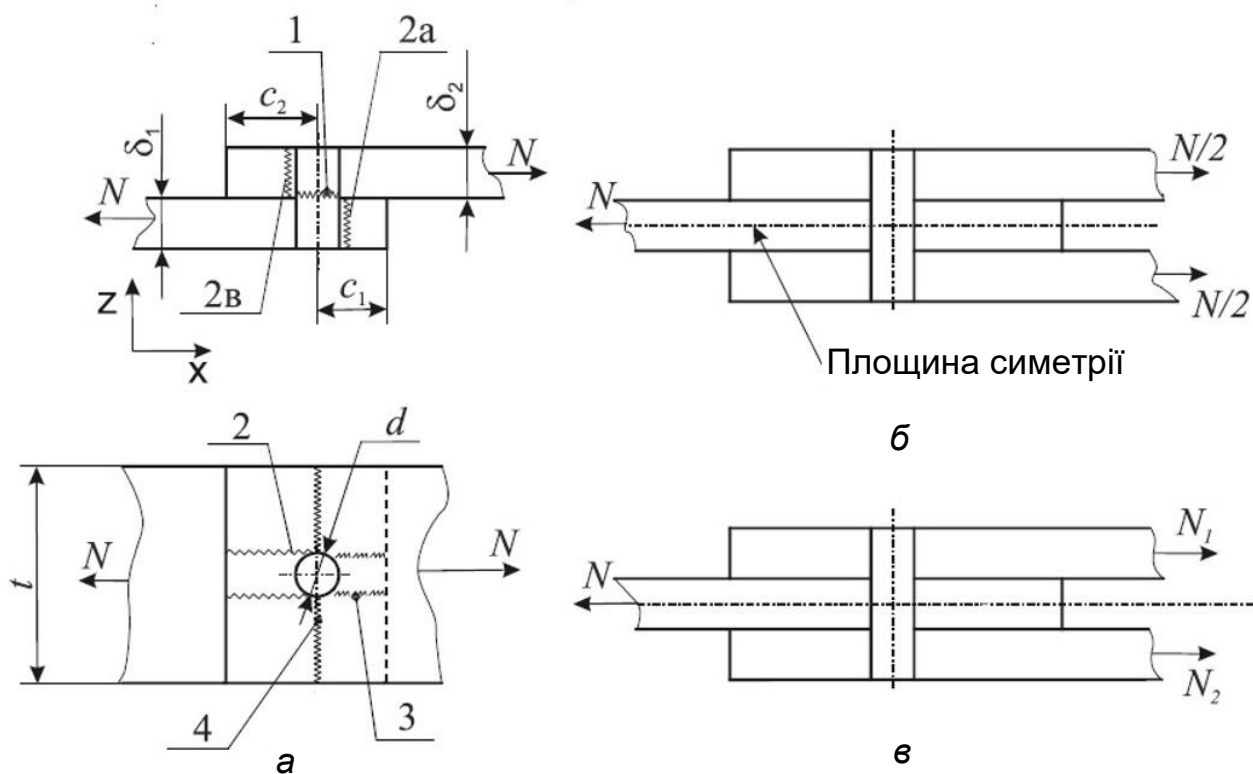


Рис. 13.1. Типовий елемент механічного з'єднання метал – композит

Таблиця 13.3

Геометричні параметри елементів з'єднання

Параметр	Значення
Товщина деталі 1 δ_1 , мм	4,8
Товщина деталі 2 δ_2 , мм	6,0
Відстань від центра штифта до кромки деталі 1 c_1 , мм	18,0
Відстань від центра штифта до кромки деталі 2 c_2 , мм	10,0
Ширина деталей (з'єднання) t , мм	30,0
Діаметр кріпильного елемента (штифта) d , мм	6,0

Умова забезпечення міцності з'єднаних деталей і кріпильного елемента при їх зминанні:

$$\frac{N}{\delta_1 d} \leq \min(\sigma_{зм.1x}, \sigma_{к.е.зм});$$

$$\frac{N}{\delta_2 d} \leq \min(\sigma_{зм.2x}, \sigma_{к.е.зм}),$$
(13.2)

де δ_1 – товщина деталі 1; δ_2 – товщина деталі 2; $\sigma_{зм.1x}$ і $\sigma_{зм.2x}$ – границя міцності деталей 1 і 2 при зминанні вздовж осі x (напрямку дії навантаження); $\sigma_{к.е.зм}$ – границя міцності при зминанні кріпильного елемента.

Умова забезпечення міцності при зсуві до кромки деталей:

$$\frac{N}{2\delta_1 c_1} \leq \tau_{зс.1x};$$

$$\frac{N}{2\delta_2 c_2} \leq \tau_{зс.2x},$$
(13.3)

де c_1 і c_2 – відстань від центра кріпильного елемента до відповідних кромок деталей 1 і 2; $\tau_{зс.1x}$ і $\tau_{зс.2x}$ – границя міцності на зсув деталей 1 і 2 у напрямку осі x .

Умова забезпечення міцності деталей у найслабшому перерізі (унаслідок свердління отворів для встановлення кріпильних елементів):

$$\frac{k_{1x} N}{\delta_1 (t-d)} \leq F_{1x};$$

$$\frac{k_{2x} N}{\delta_2 (t-d)} \leq F_{2x},$$
(13.4)

де t – ширина деталей (з'єднання); F_{1x} і F_{2x} – границя міцності деталей 1 і 2 у напрямку осі x при розтягуванні (стисканні); k_{1x} і k_{2x} – коефіцієнти концентрації напружень уздовж осі x біля отворів для матеріалу деталей 1 і 2.

Розглянемо кілька прикладів розрахунку.

1. Нехай з'єднання навантажене зусиллям 20 кН. Послідовність використання умов (13.1)–(13.4) може бути довільною, тому що вони не залежать одна від одної.

Умова зрізання кріпильного елемента (див. формулу (13.1)):

$$\tau = \frac{4 \cdot 20000}{\pi \cdot 6^2} \approx 707 \text{ МПа.}$$

Діючі напруження τ на 9,1 % є більшими за допустиму границю міцності на зсув матеріалу кріпильного елемента $\tau_{к.е.}$.

Умова зминання контактних поверхонь:

а) у межах деталі 1 (див. формули (13.2))

$$\sigma_{зм.1x} = \frac{20000}{4,8 \cdot 6} \approx 694 \text{ МПа;}$$

б) у межах деталі 2 (див. формули (13.2))

$$\sigma_{зм.2x} = \frac{20000}{6 \cdot 6} \approx 556 \text{ МПа.}$$

У межах деталі 1 допустимі напруження зминання є меншими від прикладених на 177,6 %. У межах деталі 2 допустимі напруження зминання є меншими від прикладених на 107,5 %.

Умова зрізу деталей (див. формули (13.3)):

а) для деталі 1

$$\tau_{зс.1x} = \frac{20000}{2 \cdot 18 \cdot 4,8} = 116 \text{ МПа;}$$

б) для деталі 2

$$\tau_{зс.2x} = \frac{20000}{2 \cdot 10 \cdot 6} = 167 \text{ МПа.}$$

Для композитної деталі 1 допустимі напруження зсуву дорівнюють 70 МПа, отже, напруження, що діють, є більшими на 65,7 %. Для деталі 2 допустимі напруження зсуву становлять 240 МПа, а напруження, що діють, – на 30,4 % менші.

Умова міцності деталей у найслабшому перерізі потребує попереднього оцінювання коефіцієнтів концентрації напружень біля отворів. У разі відсутності результатів конкретних випробувань можна використовувати наближені формули:

$$k_{1x} = 1 + \sqrt{2(E_x / E_y - \mu_{yx}) + E_x / G_{xy}}.$$

Тоді для деталі 1 маємо:

$$k_{1x} = 1 + \sqrt{2 \cdot (80105 / 31856 - 0,1623) + 80105 / 17175} \approx 4,061,$$

а для деталі 2

$$k_{2x} = 3.$$

Максимальний рівень напружень (див. формули (13.4)) біля отворів (відповідає найслабшому перерізу) може бути оцінений таким чином:

$$\sigma_{1x \max} = \frac{4,061 \cdot 20000}{4,8(30 - 6)} \approx 705 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{2x \max} = \frac{3 \cdot 20000}{6(30 - 6)} \approx 417 \text{ МПа}.$$

Максимальні напруження в деталі 1 є більшими за границю міцності на 184,3 %, у деталі 2 – на 4,3 %.

Отже, усі розглянуті моди руйнування, крім руйнування металевої деталі при зрізі, є ймовірними. Найбільш імовірною (може статися першою) модою руйнування є розрив композитної деталі.

2. Розглянемо другу задачу. Оцінімо навантаження, яке може витримати (передати) з'єднання. Для цього необхідно підставити у вирази (13.1)–(13.4) допустимі напруження (границі міцності) і виразити з них навантаження N . З усього переліку умов вибирається мінімальне значення навантаження:

$$N = \min \left\{ \frac{\pi d^2}{4} \tau_{k.e}; \delta_1 d [\sigma_{зм.1}]; \delta_2 d [\sigma_{зм.2}]; 2\delta_1 c_1 \tau_{зс.1x}; 2\delta_2 c_2 \tau_{зс.2x}; \frac{F_{1x} \delta_1 (t-d)}{k_{1x}}; \frac{F_{2x} \delta_2 (t-d)}{k_{2x}} \right\}.$$

Після підстановки числових значень отримаємо

$$N = \min \left\{ \frac{\pi 6^2}{4} 648; 4,8 \cdot 6 \cdot 250; 6 \cdot 6 \cdot 268; 2 \cdot 4,8 \cdot 18 \cdot 70; 2 \cdot 6 \cdot 10 \cdot 240; \frac{248 \cdot 4,8 \cdot (30 - 6)}{4,061}; \frac{400 \cdot 6 \cdot (30 - 6)}{3} \right\},$$

або $N = \min\{18322; 7200; 9648; 12096; 28800; 7035; 19200\} \text{ Н}.$

3. Третя задача стосується проектування з'єднання. Рекомендується така послідовність дій: визначити мінімальний діаметр кріпильного елемента, потім товщини деталей 1 і 2 по довжині з'єднання, потім мінімальну відстань від центра кріпильного елемента до кромки деталі та ширину

деталей. Усі розраховані параметри мають бути округлені до значень їх технологічної реалізації.

Для розв'язання цієї задачі властивості матеріалів, рівень граничного навантаження (у розглянутому прикладі дорівнює 20000 кН) та обмеження на геометричні параметри мають бути відомими. Припустимо, що для деталі 2 маємо обмеження по відстані до кромки не менше 12,0 мм.

Якщо для двох попередніх задач порядок міцнісного аналізу був довірливим, то для цієї задачі інженер має вибрати таку послідовність аналізу, щоб кількість невідомих на кожному етапі збільшувалася (в ідеальному випадку – на одне невідоме на кожному кроці). Такий підхід дає змогу отримати практично рівномірну конструкцію вздовж довжини з'єднання (тобто конструкцію мінімальної маси).

Для цього з формул (13.1)–(13.4) необхідно визначити невідомі геометричні параметри. Рекомендується така послідовність проєктувального розрахунку:

– мінімальний діаметр кріпильного елемента знаходять з формули (13.1) – умови його зрізання (або вибирають з таблиць, див. дод. 7):

$$d \geq \sqrt{\frac{4N}{\pi\tau_{к.е}}}; \quad (13.5)$$

– з умови зминання контактних поверхонь визначають мінімальні товщини з'єднуваних деталей:

$$\begin{aligned} \delta_1 &\geq \frac{N}{d[\sigma_{зм.1}]}; \\ \delta_2 &\geq \frac{N}{d[\sigma_{зм.2}]}; \end{aligned} \quad (13.6)$$

– з умови міцності деталей на зріз (при зсуві) до вільної кромки знаходять відстань від центра кріпильного елемента до кромки деталей:

$$\begin{aligned} c_1 &\geq \frac{N}{2\delta_1\tau_{зс.1x}}; \\ c_2 &\geq \frac{N}{2\delta_2\tau_{зс.2x}}; \end{aligned} \quad (13.7)$$

– останній параметр – ширину з'єднання – визначають з умови розриву деталей у найслабшому перерізі (13.4):

$$t \geq \max \left\{ \frac{k_{1x}N}{\delta_1 F_{1x}} + d; \frac{k_{2x}N}{\delta_2 F_{2x}} + d \right\}. \quad (13.8)$$

Після підстановки числових значень до формул (13.5)–(13.8) отримаємо такі параметри:

$$- d \geq \sqrt{\frac{4N}{\pi\tau_{к.е}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 20000}{\pi \cdot 648}} \approx 6,3 \text{ мм (отримане значення треба округ-}$$

лити до 8 мм відповідно до стандартного ряду метричних різей, М8);

$$- \delta_1 \geq \frac{N}{d[\sigma_{зм.1}]} = \frac{20000}{8,0 \cdot 250} = 10 \text{ мм;}$$

$$- \delta_2 \geq \frac{N}{d[\sigma_{зм.2}]} = \frac{20000}{8,0 \cdot 268} \approx 9,5 \text{ мм;}$$

$$- c_1 \geq \frac{N}{2\delta_1\tau_{зс.1x}} = \frac{20000}{2 \cdot 10 \cdot 70} \approx 14,3 \text{ мм;}$$

$$- c_2 \geq \frac{N}{2\delta_2\tau_{зс.2x}} = \frac{20000}{2 \cdot 9,5 \cdot 240} \approx 4,5 \text{ мм (цю величину збільшуємо до}$$

12 мм відповідно до заданого обмеження);

$$- t \geq \max \left\{ \frac{k_{1x}N}{\delta_1 F_{1x}} + d; \frac{k_{2x}N}{\delta_2 F_{2x}} + d \right\} =$$

$$= \max \left\{ \frac{4,061 \cdot 20,000}{10 \cdot 248} + 8; \frac{3 \cdot 20000}{9,5 \cdot 400} + 8 \right\} = \max\{41,25; 23,8\}.$$

Ширину з'єднання округляємо до 42 мм.

Потім усі отримані геометричні параметри коригуємо, якщо потрібно, відповідно до заданих обмежень.

Порядок виконання роботи

1. Отримати варіант завдання для проведення розрахунків (табл. 13.4).

2. Розрахувати напруження при зрізанні кріпильного елемента (див. формулу (13.1)).

3. Визначити напруження при зминанні контактних поверхонь (див. формули (13.2)):

а) у межах деталі 1;

б) у межах деталі 2.

4. Обчислити напруження при зрізанні деталей до вільних кромek (див. формули (13.3)):

а) для деталі 1;

б) для деталі 2.

5. Розрахувати розривні напруження у найслабшому перерізі деталей (див. формули (13.4)), попередньо визначивши коефіцієнти концентрації напружень для деталей 1 і 2.

6. Оцінити навантаження, яке може витримати (передати) з'єднання.

Таблиця 13.4

Геометричні параметри елементів з'єднання (див. рис. 13.1)

Параметр	Номер варіанта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Товщина деталі 1 δ_1 , мм	4,8	5,5	6,4	8,0	5,0	7,5	10,0	4,0	5,5
Товщина деталі 2 δ_2 , мм	6,0	5,0	8,5	6,0	7,2	4,5	8,5	5,8	8,0
Відстань від центра кріпильного елемента до кромки деталі 1 c_1 , мм	18,0	20,0	15,0	25,0	12,0	14,0	16,0	18,0	22,0
Відстань від центра кріпильного елемента до кромки деталі 2 c_2 , мм	10,0	12,0	14,0	16,0	10,0	13,5	19,0	14,0	16,0
Ширина деталей (з'єднання) t , мм	30,0	40,0	45,0	50,0	38,8	25,0	32,0	44,0	35,0
Діаметр кріпильного елемента d , мм	6,0	5,0	8,0	8,0	5,0	6,0	5,0	6,0	5,0
Прикладене навантаження N , кН	25	18	22	30	24	18	26	20	25

Контрольні запитання

1. Перелічіть можливі варіанти руйнування точкового з'єднання композит – метал.
2. Які види розрахунку точкового з'єднання композит – метал застосовуються?
3. Як геометрія з'єднання впливає на його міцність?
4. У чому полягає відмінність між зрізом і зсувом для деталей із шаруватих композитів?
5. У чому полягає відмінність між розрахованими конструктивними значеннями товщин композитних деталей та їх технологічними значеннями?

Практична робота № 14

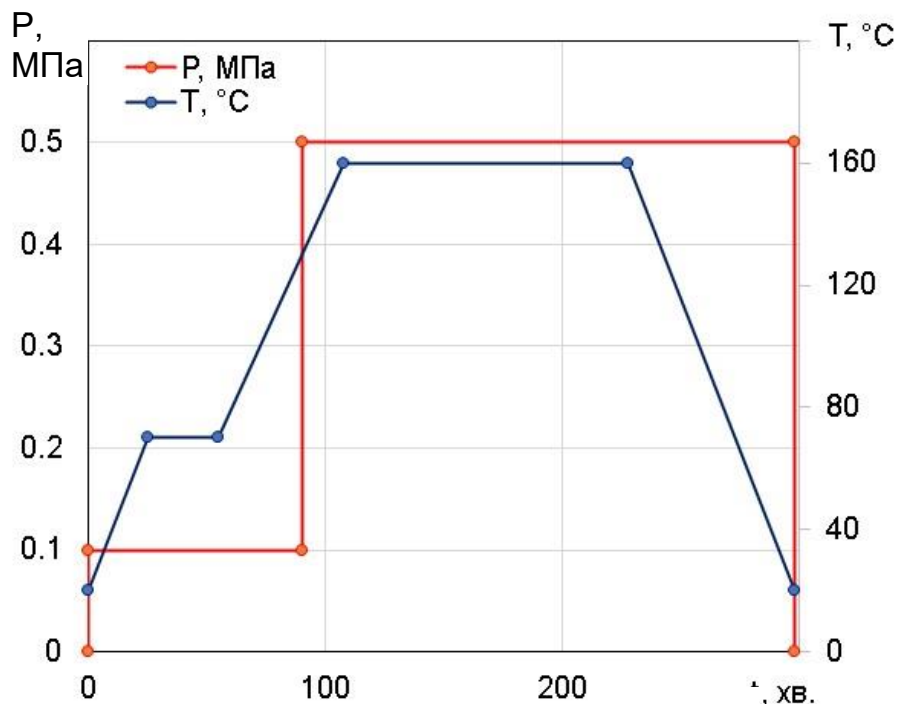
ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета роботи:

1. Ознайомлення із застосуванням різних методів формування.
2. Вивчення особливостей розрахунку параметрів формування.

Теоретичні відомості

Під технологічним процесом (ТП) формування композитних конструкцій будемо розуміти процес надання виробу на оснащенні (матриці) необоротної форми та властивостей, що відповідають експлуатаційним. Кожен ТП формування характеризується сукупністю технологічних параметрів: тиском формування (P , МПа), температурою (T , °С) і часом (t , хв). Крім того, інколи використовують і похідні параметри ТП формування – швидкість розігрівання (v_p , °С/хв) та охолодження ($v_{ох}$, °С/хв). Режим формування можна зобразити графічно в координатах температура – тиск – час (рис. 14.1).



контактне формування; ВФ – вакуумне формування; ВАФ – вакуум-автоклавне формування; ФЖФ – формування в жорстких формах.

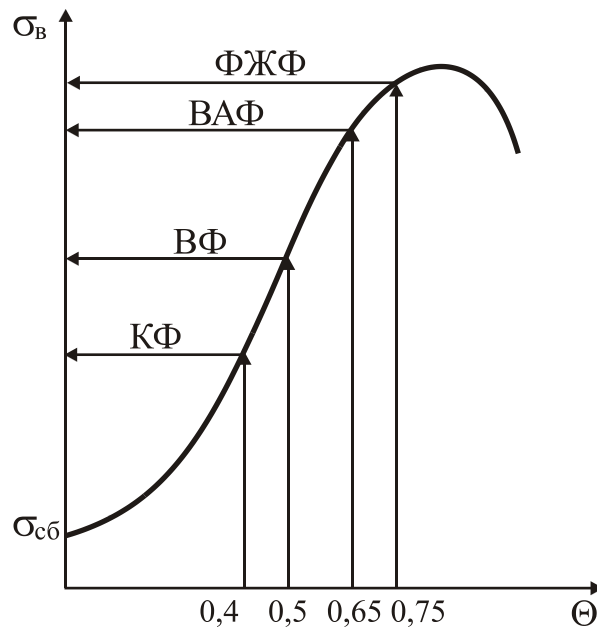


Рис. 14.2. Залежність міцності композитної конструкції на розтяг від об'ємного вмісту армувального матеріалу

Для отримання невідповідальних деталей застосовують метод контактного формування ($\theta = 0,3 \dots 0,4$; $P_{н.т} = 0$ МПа); для ненавантажених і мало-навантажених деталей – вакуумне формування ($\theta = 0,4 \dots 0,5$; $P_{н.т} = 0,1$ МПа); для сильнонавантажених і відповідальних деталей – автоклавне формування (рис. 14.3, 14.4) ($\theta = 0,5 \dots 0,7$; $P_{н.т} \leq 1$ МПа); для відповідальних деталей, які працюють в умовах екстремальних навантажень, часто вибирають пресовий метод формування в жорстких формах ($\theta = 0,7 \dots 0,9$; $P_{н.т} \leq 4$ МПа).



Рис. 14.3. Автоклавна установка

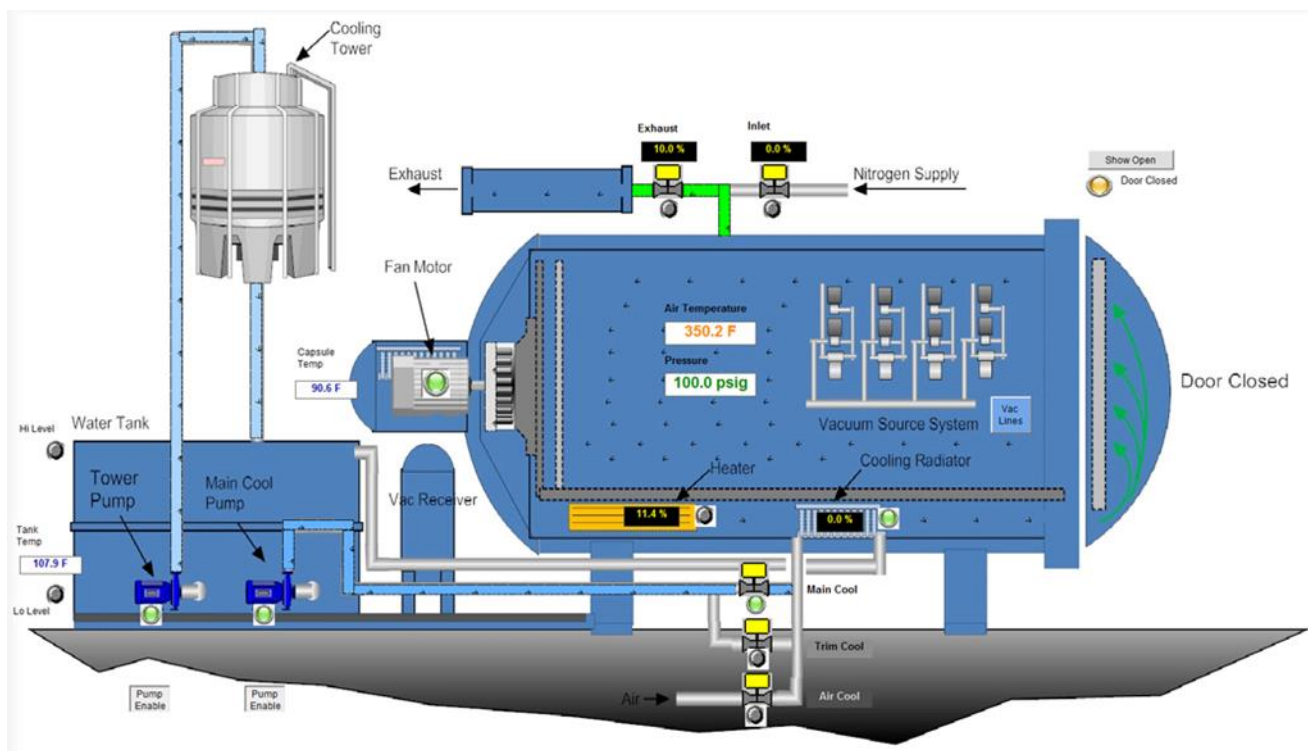


Рис. 14.4. Схема автоклавної установки

Визначення тиску формування. Під час формування композитних конструкцій тиск впливає на такі параметри й фактори: регламентований об'ємний уміст армувального матеріалу у виробі; монолітність структури; пористість; швидкість полімеризації (інтенсивність перебігу фізико-хімічних процесів); хімічну структуру сполучного. Тому вибір величини тиску та часу його прикладання має важливе значення для отримання структури з необхідними міцнісними й пружними характеристиками.

Шляхом видалення повітря з-під вакуумного мішка можна створити надлишковий тиск ($P_{н.м}$) на пакет КМ приблизно до 0,1 МПа. Вакуум створюють одразу після ретельної герметизації вакуумного мішка. Час прикладання вакуумного тиску залежить від різних факторів, насамперед від природи сполучного, температурно-часового режиму формування, габаритів конструкції, а також структури КМ.

Формування вакуум-автоклавним методом відбувається в декілька етапів. На етапі вакуумування створюється вакуумний тиск і лише після цього прикладається надлишковий автоклавний тиск. Моменти прикладання та зняття тиску залежать від особливостей конструкції.

Препреги при оптимальному просоченні, що забезпечує задане нанесення сполучного, після їх сушіння мають «хвилеподібну» поверхню (рис. 13.5). При формуванні сполучне має стекти з вершин волокон у вільні порожнини **A**, тобто тиск формування одношарового препрегу (**P**) буде перерозподілятися по локальних областях, що мають розмір у двовимірній задачі $\ell \times 1$ (смуга одиничної ширини). Необхідно прикласти такий тиск у

локальній області, який забезпечить розтікання сполучного завтовшки $2h$ у порожнині **A**.

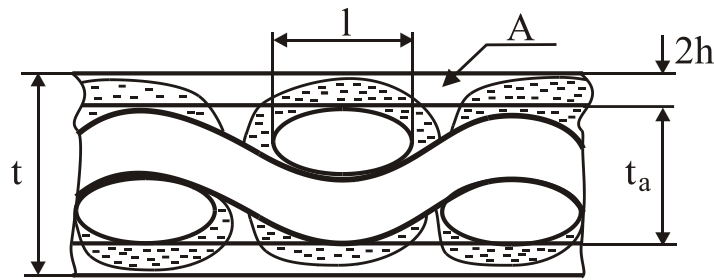


Рис. 14.5. Розподіл сполучного в перерізі

Тоді для рідини з порожнини, розташованої між двома абсолютно жорсткими пластинами (волокнами), що зближуються зі швидкістю v_0 (рис. 14.6), величину тиску подамо в такому вигляді:

$$P(x,y) = \frac{3\mu v_0 (y^2 - h^2 - x^2 + \ell^2)}{2h^3}, \quad (14.1)$$

де μ – в'язкість сполучного.

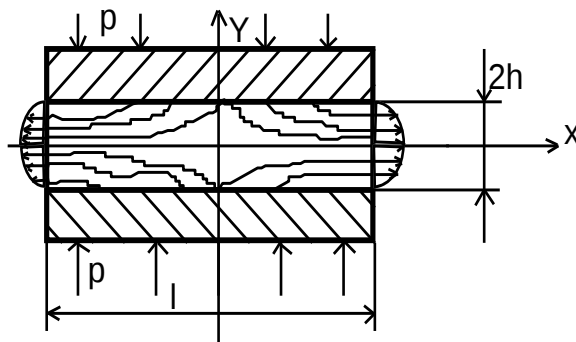


Рис. 14.6. Математична модель розподілу сполучного

Максимальний тиск $P_{\max}$, виражений через регламентовані параметри, можна визначити за формулою

$$P_{\max} = \frac{3\mu}{2\tau} \left[\frac{t_a \theta_a \theta_n \rho_a (n+1)}{g_a (\theta_a - \theta_n)} \right]^3, \quad (14.2)$$

де θ_a – відносний об'ємний уміст армувального матеріалу в КМ; θ_n – відносний об'ємний уміст армувального матеріалу в препрегу; g_a – поверхнева густина армувального матеріалу; ρ_a – густина матеріалу арматури (табл. 14.1); n – кількість шарів препрегу у виробі; t_a – товщина моношару.

Прикладання надлишкового тиску має починатися в момент часу t , коли температура сполучного набуває значення, при якому його в'язкість забезпечує рівномірне заповнення порожнин без інтенсивної міграції до зовнішніх шарів пакета, тобто при мінімальній в'язкості $\mu_{\min}$ (табл. 14.2).

Таблиця 14.1

Густина матеріалу арматури t_a

Параметри армувального матеріалу	Матеріал			
	Скловолокно (Е-скло)	Органоволокно (арамідне)	Вуглеволокно (ВМ)	Бороволокно
Густина, кг/м ³	2400...2600	1400...1450	1700...1800	2500...2700
Товщина, мм	0,25	0,20	0,35	0,15

Таблиця 14.2

Мінімальна в'язкість сполучних при температурі T протягом часу t

Параметри сполучного	Марка сполучного			
	ЛБС-4	5211-Б	БФОС	ЕНФБ
Мінімальна в'язкість, Па·с	13...19	26...33	51...54	32...37
Температура, °С	75...78	65...66	76...77	60...62
Час, год	До 6	До 6	До 6	До 6

Визначення температури формування. Температурний режим указується в інструкції до сполучного. Зазвичай розробники сполучних пропонують декілька режимів формування з термообробкою (може бути декілька режимів), а також без термообробки (кімнатна температура). Максимальна температура формування відповідає кінцевому ступеню полімеризації сполучного за відповідний час витримки (табл. 14.3).

Таблиця 14.3

Значення технологічних параметрів процесу формування для 100%-вого ступеня полімеризації

Параметри сполучного	Марка сполучного			
	ЛБС-4	5211-Б	БФОС	ЕНФБ
Температура, °С	160	155	190	175
Час, хв	270	70	80	145
Швидкість розігрівання, °С/хв	1,5	1,5	2,0	2,0

Умовно режим формування можна розбити на три етапи. Перший етап – розігрівання до температури твердіння. На цьому етапі температура плавно піднімається від кімнатної до температури твердіння, швидкість розігрівання регламентує розробник, але зазвичай $v_p = 1...3$ °С/хв. Слід зазначити, що розробники сполучних не рекомендують починати процес формування при температурі нижче +15°С. На цьому етапі необхідно максимально

просочити армувальний матеріал шляхом температурної витримки пакета КМ. Температура витримки буде відповідати мінімальній в'язкості сполучного, а час – габаритам, масі конструкції. Після температурної витримки розігрівання продовжується з певною швидкістю до температури полімеризації. Другий етап – ізотермічна витримка. На цьому етапі композитна конструкція витримується протягом певного часу при певній температурі, які вказано в інструкції до сполучного. Третій етап – охолодження до кімнатної температури. Найчастіше, охолодження відбувається природним шляхом ($v_{ох} = 1...2 \text{ }^{\circ}\text{C/хв.}$), однак можливим є й примусове охолодження зі збільшеною швидкістю.

Порядок виконання роботи

1. Отримати варіант завдання для розрахунків (табл. 14.4).
2. Визначити необхідний тиск формування за формулою (14.2).
3. За отриманим результатом вибрати метод формування.
4. Визначити технологічні параметри режиму формування для першого етапу:
 - за табл. 14.2 визначити температуру, що відповідає мінімальній в'язкості сполучного;
 - розрахувати час, необхідний для досягнення цієї температури;
 - визначити час першої температурної витримки для просочення пакета КМ;
 - за табл. 14.3 визначити температуру полімеризації сполучного;
 - розрахувати час, необхідний для досягнення температури полімеризації від першої температурної витримки.
5. Визначити час другої температурної витримки (див. табл. 14.3).
6. Визначити час охолодження від другої температурної витримки до кімнатної температури ($v_{ох} = 1...2 \text{ }^{\circ}\text{C/хв.}$).
7. Визначити режим прикладання тиску:
 - якщо тиск, розрахований за формулою (14.2), є меншим або дорівнює $0,1 \text{ МПа}$, то тиск на всьому етапі режиму буде дорівнювати $0,1 \text{ МПа}$;
 - якщо тиск, розрахований за формулою (14.2), є більшим за $0,1 \text{ МПа}$, то тиск прикладається таким чином:
 - а) на початку процесу прикладається тиск $0,1 \text{ МПа}$, це значення тримається приблизно до того моменту, який відповідає середині етапу розігрівання від першої температурної витримки до температури полімеризації;
 - б) тиск збільшується на розраховану величину й витримується до завершення охолодження.
8. Побудувати графік залежності температура – тиск – час.
9. Зробити висновки.

Варіанти завдань

Номер варіанта	Армувальний матеріал, поверхнева щільність, г/м ² , кількість шарів	θ_a / θ_n	Сполучне
1	Склотканина (Е-скло), 145, 30	0,60/0,40	ЛБС-4
2	Органотканина, 90, 20	0,70/0,50	5211-Б
3	Вуглетканина (ВМ), 50, 50	0,65/0,55	БФОС
4	Склотканина (Е-скло), 200, 20	0,70/0,40	ЕНФБ
5	Органотканина, 200, 40	0,55/0,45	ЛБС-4
6	Вуглетканина (ВМ), 100, 50	0,60/0,55	5211-Б
7	Склотканина (Е-скло), 300, 20	0,70/0,50	БФОС
8	Органотканина, 400, 20	0,60/0,50	ЕНФБ
9	Вуглетканина (ВМ), 450, 15	0,55/0,40	ЛБС-4
10	Склотканина (Е-скло), 400, 14	0,65/0,50	5211-Б
11	Органотканина, 120, 60	0,70/0,50	БФОС
12	Вуглетканина (ВМ), 150,40	0,55/0,40	ЕНФБ

Контрольні запитання

1. Які існують методи формування?
2. Що собою являє технологічний процес формування?
3. Як визначають необхідний метод формування?
4. Як товщина конструкції впливає на вибір методу формування?
5. Як вид сполучного впливає на технологічні параметри формування?
6. Як можна оптимізувати процес вакуумного формування?

ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТІВ

Таблиця Д.1.1

Фізико-механічні характеристики моношару КМ

Властивості	Номер матеріалу										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Вугле- пластик ОС	Вугле- пластик ОС	Скло- пластик ОС	Органо- пластик ОС	Вугле- пластик тканий	Скло- пластик тканий	Органо- пластик тканий	Вугле- пластик тканий	Вугле- органопластик тканий	Скло- органопластик тканий	Боро- алюміній ОС
ρ , кг/м ³	1450	1400	2000	1320	1500	1900	1360	1360	1300	1600	3200
E_1 , ГПа	100	150	45	80	60	24	36	100	50	25	220
E_2 , ГПа	10	8	10	5,5	60	16	30	50	70	35	70
G_{12} , ГПа	6	4	5	2	6	4	3	5	6	5,5	25
μ_{12}	0,35	0,3	0,3	0,31	0,28	0,26	0,22	0,26	0,28	0,25	0,32
F_{1T} , МПа	900	1300	800	1600	400	350	600	1000	800	400	2200
F_{1C} , МПа	700	1200	1000	300	400	280	150	800	500	450	2000
F_{2T} , МПа	50	40	50	16	400	300	550	1200	500	600	400
F_{2C} , МПа	120	100	40	300	400	250	140	200	600	150	400
F_{12} , МПа	75	50	60	30	50	45	40	60	55	50	240
G_{inp} , ГПа	7	3,6	4	2,2	4	1,8	2,5	2,2	2,4	2,6	20
π_{np} , МПа	60	50	45	50	40	40	50	55	50	60	230
α_1 , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	0	-2	8	-4	1	12	-3	-2	-1	6	5
α_2 , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	30	40	25	60	1	16	-2,6	-3	0	-1	10
δ_0 , мм	0,08	0,12	0,15	0,12	0,35	0,25	0,25	0,16	0,28	0,3	0,14
Ширина, мм	250	20	50	50	600	900	900	500	1000	1200	100

Примітка. ОС – односпрямований матеріал.

Таблиця Д.1.2

Механічні й фізичні властивості типових волокон

Параметр	Е-скло	S-скло	Вугле- волокно AS-4	Вугле- волокно T-300	Вугле- волокно IM7	Боро- волокно	Арамідне волокно Kevlar 49	Волокно на основі карбіду кремнію (Nicalon)
Діаметр, мкм	8...14	10	7	–	4	140	12	15
Густина, г/см ³	2,54	2,49	1,81	1,76	1,80	2,50	1,45	2,60
Поздовжній модуль пружності, ГПа	73	86	235	230	290	395	131	172
Поперечний модуль пружності, ГПа	73	86	15	15	21	395	7	172
Осьовий модуль зсуву, ГПа	30	35	27	27	14	165	21	73
Поперечний модуль зсуву, ГПа	30	35	7	7	–	165	–	73
Коефіцієнт Пуассона	0,23	0,23	0,20	0,20	0,20	0,13	0,33	0,20
Границя міцності на розтяг уздовж волокна, МПа	3450	4500	3700	3100	2170	3450	3800	2070
Поздовжній КЛТР, 10 ⁻⁶ /°C	5,0	5,6	–0,5	–0,7	–0,2	16	–2	3,2
Поперечний КЛТР, 10 ⁻⁶ /°C	5,0	5,6	15	12	10	16	60	3,2

Таблиця Д.1.3

Властивості типових полімерних матричних матеріалів

Параметр	Епоксидне сполучне 3501-6	Епоксидне сполучне 977-3	Епоксидне сполучне HY6010/ HT917/DY070	Поліефіри	Вінілефір (Derakane)	Полііміди	Поліефір- ефіркетон (PEEK)
Густина, г/см ³	1,27	1,28	1,17	1,1...1,5	1,15	1,4...1,9	1,32
Модуль пружності (модуль Юнга), ГПа	4,3	3,7	3,4	3,2...3,5	3,0...4,0	3,1...4,9	3,7
Модуль зсуву, ГПа	1,60	1,37	1,26	0,7...2,0	1,1...1,5	–	–
Коефіцієнт Пуассона	0,35	0,35	0,36	0,35	0,35	–	–
Границя міцності на розтяг, МПа	69	90	80	40...90	65...90	70...120	96
Границя міцності на стиск, МПа	200	175	104	90...250	127	–	–
Границя міцності на зсув, МПа	100	52	40	45	53	–	–
КЛТР, 10 ⁻⁶ /°C	45	–	62	60...200	100...150	90	–
Температура склування, °C	200	200	152	50...110	–	280...320	143
Максимальна робоча температура, °C	150	177	–	–	–	300...370	250
Деформація при розриві, %	2...5	–	–	2...5	1...5	1,5...3,0	–

НЕСНА ЗДАТНІСТЬ І ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗАКІНЦІВОК СТЕРЖНІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В АВІАЦІЇ

Таблиця Д.2.1

Регульовані й нерегульовані закінцівки типу «вухо»

Technical drawing of a rod end fitting. The top view shows a cross-section of the fitting with dimensions d (rod diameter), H (height), and l (length). The bottom view shows the end of the fitting with a label "Позначення закінцівки" (Fitting designation).

Діаметр d , мм	Різь D	H , мм	l , мм	Руйнівне навантаження, Н		Маса, г		
				30ХГСА	АК4-1	30ХГСА	АК4-1	
5	М8	8	20	1200	1000	38	24	
			30			51	28	
			40			63	33	
			30		1200	75	34	
			40			54	39	
7	М12х1,5	12	30	1800	1800	81	48	
			40			94	53	
	М16х1,5		30			106	58	
			40			121	64	
8	М16х1,5	14	35	2900	2900	147	90	
10		16	40	3200	3200	238	150	
12	М18х1,5	17	45	4200	3800	252	157	
						334	215	

Примітки:

1. Матеріали закінцівок – 30ХГСА та АК4-1.
2. Позиція 2 є стандартним підшипником кочення.
3. Міцність матеріалу закінцівки після гартування становить (1200 ± 100) МПа для сталі та 380 МПа (не менше) для алюмінієвого сплаву.
4. Більше інформації щодо умов виробництва закінцівок (використані покриття, розміри фасок, канавки, допуски на розміри, підшипники, рекомендації щодо методів їх встановлення тощо) можна знайти у стандартах 4473A і 6285A на закінцівки.
5. Стандартні закінцівки рекомендовано використовувати із запресованими та знімними підшипниками.

Таблиця Д.2.2

Розміри регульованих й нерегульованих закінцівок типу «вилка»
(див. рис. Д.2.1, Д.2.2)

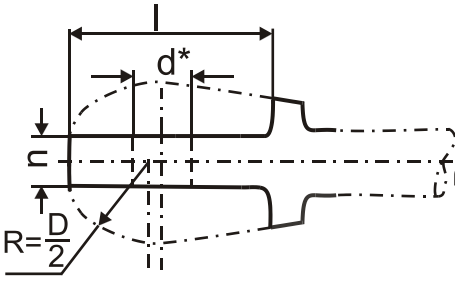
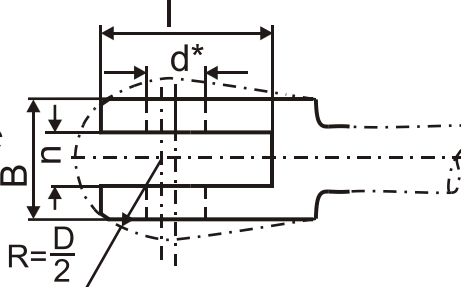
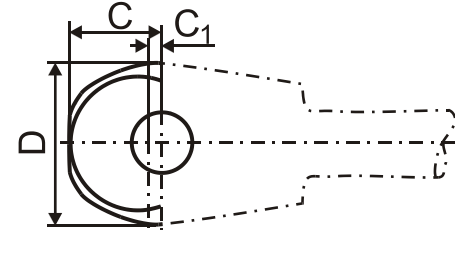
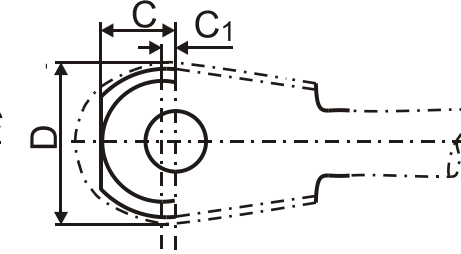
<i>d</i> , мм	<i>d</i> ₁ , мм	Різь <i>D</i>	<i>H</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>b</i> ₁ , мм	<i>b</i> ₂ , мм	<i>C</i> , мм	<i>L</i> , мм		<i>l</i> , мм		<i>l</i> ₁ , мм	<i>l</i> ₂ , мм		<i>r</i> , мм	Руйнівне навантаження, Н	Маса, г									
								РЗ	НЗ	РЗ	НЗ		РЗ	НЗ			РЗ	НЗ								
5	—	М8	18	8	10	8	10	67	45	32	30	25	—		12	29000	58	48								
								87	65	52	50	45					77	67								
	5	М12х1,5						22	12	14	9	12	77	55		32	30	25	38	15	43000	71	56			
													97	75		52	50	45				90	75			
7	8	М16х1,5	24	14	16	10	13						82	60	37	35	30	42	25	54000	92	76				
													97	75	52	50	45				109	93				
								8	М18х1,5	27	16	18	12	14	87	67	37			35	30	46	30	77000	124	97
															102	82	52			50	45				141	114
10	М18х1,5	30	17	20	15	16	92	72	42						40	35	18	88000	143	115						
							97	75											46	30	110000	162	132			
12	М18х1,5						200	141																		
									236	175																

Примітка. РЗ – регульована закінцівка (див. рис. Д.2.1); НЗ – нерегульована закінцівка (див. рис. Д.2.2).

Таблиця Д.2.3

Стандартні розміри для закінцівок типу «вухо» і «вилка»,
які рекомендується використовувати без установлення в них додаткових вкладишів або підшипників

140

		d^* , мм	D , мм	n , мм	B , мм	$(C\pm0,2)$, мм	C_1 , мм	Руйнівне навантаження, Н	
								Сталь 45	Сталь 30ХГСА
		2,6	7	2,2	5	4,0	0,8	4300	7400
		3	8	2,5	6	4,5	1,0	5800	9900
		4	11	3,5	8	6,0	1,8	10300	17500
		5	14	4,5	10	8,0	2,0	18000	27400
		6	16	5,5	13	9,0	2,0	23100	39500
		7	19	6,0	15	10,5	2,5	31500	53800
		8	22	7,0	17	12,0	2,5	41200	70300
		9	24	8,0	19	13,5	2,7	52000	89000
		10	27	9,0	21	15,0	3,5	64300	109900
		11	29	10,0	24	16,0	4,0	77800	133000
		12	32	11,0	26	17,5	5,0	92600	158200
		14	37	12,0	28	20,5	5,5	120600	215400
		16	43	13,5	32	23,5	5,5	164800	281300
		18	49	15,0	35	27,0	5,5	208500	356000
		20	54	17,0	39	30,0	5,5	257400	439600
		22	59	19,0	44	33,0	5,5	311500	531900
		24	64	21,0	49	35,5	5,5	370700	633000

Примітки:

1. Матеріали для закінцівок – сталь 45 ($\sigma_s = 600$ МПа) і 30ХГСА ($\sigma_s = 1100$ МПа).
2. Припускається, що елементи вилки, вуха та з'єднувальних болтів (штифтів) мають однакову міцність.
3. Довжину l та допуски на діаметр d вибирає конструктор.

МЕТРИЧНІ РІЗИ

Таблиця Д.3.1

Деякі стандартні метричні різі та їх кроки (мм)

Номинальний діаметр різі $d = D$			Крок								
1-й ряд	2-й ряд	3-й ряд	Великий	Малий							
				1	0,75	0,5	0,35	0,25	0,2		
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...		
3	—	—	0,5	—	—	—	0,35	—	—		
—	3,5	—	0,6	—	—	—	0,35	—	—		
1-й ряд	2-й ряд	3-й ряд	Великий	Малий							
				4	3	2	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5
4	—	—	0,7	—	—	—	—	—	—	—	0,5
—	4,5	—	0,75	—	—	—	—	—	—	—	0,5
5	—	—	0,8	—	—	—	—	—	—	—	0,5
—	—	5,5	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5
6	—	—	1,0	—	—	—	—	—	—	—	0,5
—	7	—	1,0	—	—	—	—	—	—	0,75	0,5
8	—	—	1,25	—	—	—	—	—	1,0	0,75	0,5
—	—	9	1,25	—	—	—	—	—	1,0	0,75	0,5
10	—	—	1,5	—	—	—	—	1,25	1,0	0,75	0,5
—	11	1,5	—	—	—	—	—	—	1,0	0,75	0,5
12	—	—	1,75	—	—	—	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5
—	14	—	2,0	—	—	—	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5
—	—	1,5	—	—	—	—	1,5	—	1,0	—	—
16	—	—	2,0	—	—	—	1,5	—	1,0	0,75	0,5

Примітка. Перший ряд різей є переважним порівняно з другим, а другий – порівняно з третім.

Закінчення табл. Д.3.1

Номінальний діаметр різі $d = D$			Крок								
1-й ряд	2-й ряд	3-й ряд	Великий	Малий							
				4	3	2	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5
—	—	17	—	—	—	—	1,5	—	1,0	—	—
—	18	—	2,5	—	—	2,0	1,5	—	1,0	0,75	0,5
20	—	—	2,5	—	—	2,0	1,5	—	1,0	0,75	0,5
—	22	—	2,5	—	—	2,0	1,5	—	1,0	0,75	0,5
24	—	3	—	—	—	2,0	1,5	—	1,0	0,75	—
—	—	25	—	—	—	2,0	1,5	—	1,0	—	—
—	—	26	—	—	—	—	1,5	—	—	—	—
—	27	—	3,0	—	—	2,0	1,5	—	1,0	0,75	—
—	—	28	—	—	—	2,0	1,5	—	1,0	—	—
30	—	—	3,5	—	3,0	2,0	1,5	—	1,0	0,75	—
—	—	32	—	—	—	2,0	1,5	—	—	—	—
—	33	—	3,5	—	3,0	2,0	1,5	—	1,0	0,75	—
—	—	35	—	—	—	—	1,5	—	—	—	—
36	—	—	4,0	—	3,0	2,0	1,5	—	1,0	—	—
—	—	38	—	—	—	—	1,5	—	—	—	—
—	39	—	4,0	—	3,0	2,0	1,5	—	1,0	—	—
—	—	40	—	—	3,0	2,0	1,5	—	—	—	—
42	—	—	4,5	4,0	3,0	2,0	1,5	—	1,0	—	—
—	45	—	4,5	4,0	3,0	2,0	1,5	—	1,0	—	—
48	—	—	5,0	4,0	3,0	2,0	1,5	—	1,0	—	—
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Таблиця Д.4.1

Осереднені властивості металевих конструкційних матеріалів

Сплав	Границя міцності при розтягуванні $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Границя міцності при зминанні $\sigma_{\text{зм}}$, МПа	Границя міцності при зсуві $\tau_{\text{в}}$, МПа	Границя втоми σ_{-1} , МПа
Сталь 30ХГСА	1200	1430	700	320
Алюмінієвий сплав АК4-1	380	400...500	220	160
Сталь 45	600	780	410	280
Титановий сплав BT22	1080...1280	–	500...600	410
Алюмінієвий сплав В95 (7075)	570	745	340	160

ВЛАСТИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ КЛЕЇВ

Таблиця Д.5.1

Клеї гарячого твердіння

Клей	Стан поставки	Середня товщина клею в затверділому стані, мм	Середня границя міцності клею при зсуві, МПа	Довготривала термічна стійкість клею, °C
ВК-25 (епоксидний)	Плівка	0,10	25...27	-60...+200
ВК-31 (епоксидний)	Плівка	0,13	35...38	-50...+140
ВК-36 (епоксидний)	Плівка	0,13	3...40	-130...+160
BSL-308	Плівка	0,06	42	-40...+120
Loctite E-05MR (епоксидний)	Рідина	0,10	22	-40...+120
Spabond 340 LV HT	Рідина	0,08...0,12	32...36	-20...+70
Hysol EA-9394	Рідина	0,05...0,10	35...37	-30...+150

Таблиця Д.5.2

Клеї холодного твердіння (що не потребують додаткового підігрівання)

Клей	Стан поставки	Середня товщина клею в затверділому стані, мм	Середня границя міцності клею при зсуві, МПа	Довготривала термічна стійкість клею, °C
ВК-26 (епоксидний)	Плівка	0,10	18	-20...+120
ВК-9 (епоксидний)	Плівка	0,12	4...15	-30...+200
ВК-41 (епоксидний)	Плівка	0,08	21	-20...+100
ВК-57 (епоксидний)	Плівка	0,10	10...27	-30...+125
DELO-DUOPOX AD897 (епоксидний)	Паста	0,12	17...32	-40...+140
K-400	Рідина	0,10	15...18	-20...+100
Araldite 420-A/B	Рідина	0,08...0,12	35	-20...+70

ЗАПОВНЮВАЧІ ДЛЯ ПАНЕЛЕЙ ТИПУ «СЕНДВІЧ»

Таблиця Д.6.1

Характерні властивості матеріалів заповнювачів

145

Параметр	Пінопласт Divinycell H80	Пінопласт Divinycell H100	Пінопласт Divinycell H160	Пінопласт Divinycell H250	Бальса СК57	Алюмінієві стільники	Стільники + пінопласт (Style 20)	Поліуретан FR-3708
Густина, кг/м ³	80	100	160	250	150	130	128	128
Модуль пружності вздовж осі x, МПа	77	95	150	240	65	8,3	25	35
Модуль пружності вздовж осі y, МПа	77	95	150	230	65	6,0	7,6	35
Модуль пружності вздовж осі z, МПа	115	140	250	403	5200	2415	270	110
Модуль зсуву в площині x-z, МПа	40	50	75	115	58,7	580	8,5	10
Границя міцності на стиск уздовж осі x, МПа	1,2	1,7	2,8	4,6	0,78	0,2	0,4	1,2
Границя міцності на розтяг уздовж осі x, МПа	2,3	2,7	4,5	7,2	1,13	1,6	0,5	1,1
Границя міцності на стиск уздовж осі y, МПа	1,2	1,7	2,8	4,6	0,78	0,2	0,3	1,2
Границя міцності на стиск уздовж осі z, МПа	1,5	2,2	3,5	5,7	9,6	11,8	1,4	1,7
Границя міцності на зсув у площині x-z, МПа	1,5	1,8	3,0	5,0	3,7	3,5	0,75	1,4

Таблиця Д.6.2

**Характеристики стільникових заповнювачів
із алюмінієвої фольги**

Марка заповнювача	Густина, кг/м ³	Границя міцності, МПа			Модуль пружності, ГПа		
		$\sigma_{z.cm}$	τ_{xz}	τ_{yz}	$E_{z.cm}$	G_{xz}	G_{yz}
1/8 – 5052 – .0007	49,7	1,38	1,07	0,62	0,52	0,31	0,15
1/8 – 5052 – .001	72,1	2,59	1,97	1,16	1,03	0,48	0,21
1/8 – 5052 – .0015	97,7	4,48	3,14	1,88	1,65	0,68	0,28
1/8 – 5052 – .002	129,7	6,89	4,62	2,76	2,41	0,93	0,37
1/8 – 5052 – .0025	160,2	10,86	5,07	2,86	3,45	1,21	0,45
1/8 – 5052 – .003	192,2	14,48	8,62	6,89	6,21	1,45	0,54
5/32 – 5052 – .0007	41,6	1,03	0,83	0,48	0,38	0,26	0,13
5/32 – 5052 – .001	60,9	1,97	1,48	0,86	0,76	0,39	0,18
5/32 – 5052 – .0015	84,9	3,38	2,55	1,48	1,34	0,58	0,25
5/32 – 5052 – .002	110,5	5,31	3,72	2,26	1,97	0,79	0,32
5/32 – 5052 – .0025	134,6	7,38	4,76	2,90	2,55	0,97	0,39
3/16 – 5052 – .0007	32,0	0,62	0,55	0,32	0,23	0,19	0,10
3/16 – 5052 – .001	49,7	1,38	1,07	0,62	0,52	0,31	0,15
3/16 – 5052 – .0015	70,5	2,48	1,93	1,10	1,0	0,47	0,21
3/16 – 5052 – .002	91,3	3,86	2,83	1,68	1,52	0,62	0,27
3/16 – 5052 – .0025	110,5	5,31	3,72	2,26	1,97	0,79	0,32
3/16 – 5052 – .003	129,7	6,89	4,62	2,76	2,41	0,93	0,37
1/4 – 5052 – .0007	25,6	0,41	0,41	0,22	0,14	0,14	0,08
1/4 – 5052 – .001	36,8	0,83	0,69	0,39	0,31	0,22	0,11
1/4 – 5052 – .0015	54,5	1,65	1,24	0,72	0,62	0,34	0,17
1/4 – 5052 – .002	68,9	2,41	1,83	1,07	0,97	0,46	0,21
1/4 – 5052 – .0025	83,3	3,45	2,48	1,38	1,31	0,57	0,24
1/4 – 5052 – .003	96,1	4,34	3,07	1,83	1,62	0,66	0,28
3/8 – 5052 – .0007	16,0	0,14	0,22	0,14	0,07	0,08	0,05
3/8 – 5052 – .001	25,6	0,41	0,41	0,22	0,14	0,14	0,08
3/8 – 5052 – .0015	36,8	0,83	0,69	0,39	0,31	0,22	0,11
3/8 – 5052 – .002	48,1	1,31	1,0	0,59	0,48	0,30	0,15
3/8 – 5052 – .0025	59,3	1,86	1,38	0,79	0,72	0,38	0,18
3/8 – 5052 – .003	67,3	2,31	1,76	1,03	0,93	0,45	0,20

Примітки:

1. Номенклатура стільникових заповнювачів, що випускаються фірмою HEXEL.
2. У позначенні заповнювача: 1-ше число – розмір комірки в частках дюйма (радіус вписаного в комірку кола); 2-ге число – марка алюмінієвого сплаву; 3-тє число – номінальна еталонна товщина фольги в дюймах.
3. Напрямок осей при визначенні пружних характеристик і границь міцності показано на рис. 12.2.

НЕСНА ЗДАТНІСТЬ СТАНДАРТНИХ БОЛТІВ І ГВИНТІВ ПРИ РОЗТЯГУВАННІ ТА ЗСУВІ

Таблиця Д.7.1

Руйнівне навантаження (Н) болтів і гвинтів при розтягуванні

Різь	Матеріал кріпильного елемента										
	30ХГСА			1Х17Н2 (ЕІ268)*					1Х17Н2 (ЕІ268)**	38ХА	45
	Температура, °С										
	20	100...300	400	20	100	200	300	400	20		
M4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6700	5000
M5	14800	—	—	14800	—	—	—	—	10400	11000	8000
M6	21100	19000	15800	21100	19000	18300	17500	15800	14700	15600	11500
M8	38000	34000	28500	38000	34000	33000	31500	28500	27000	28700	20700
M10	60000	54000	45000	60000	54000	52000	49500	45000	43000	45700	32700
M12x1,5	89400	80000	67000	89400	80000	77500	74000	67000	67000	71000	48500
M14x1,5	125000	112500	94000	125000	112500	109000	104000	94000	96300	102000	68000
M16x1,5	170000	—	—	—	—	—	—	—	131000	139000	92500
M18x1,5	222000	—	—	—	—	—	—	—	171000	182000	121000
M20x1,5	281000	—	—	—	—	—	—	—	216000	—	—
M22x1,5	347000	—	—	—	—	—	—	—	267000	—	—
M24x1,5	347000	—	—	—	—	—	—	—	323000	—	—

Примітка: * – $\sigma_s = (1200 \pm 100)$ МПа; ** – $\sigma_s = (950 \pm 100)$ МПа.

Закінчення табл. Д.7.1

Різь	Матеріал кріпильного елемента									
	4X12H8Г8МФБ (E1481)								10	Д1Т
	Температура, °C									
	20	100	200	300	400	500	600	700	20	
М4	–	–	–	–	–	–	–	–	3000	–
М5	10400	8800	8300	7800	7250	6750	6200	5200	5700	5100
М6	14700	12500	11700	11000	10300	9500	8800	7300	8200	7200
М8	27000	23000	21500	20000	18500	17500	16000	13500	14800	13000
М10	43000	36500	34000	32000	30000	28000	25500	21500	23400	20500
М12х1,5	67000	57000	53500	50000	46500	43500	40000	33500	–	30800
М14х1,5	96500	82000	77000	72000	67500	62500	57500	48000	–	–

Таблица Д.7.2

Руйнівне навантаження болтів і гвинтів при зсуві (в одній площині), Н

Діаметр болта, мм			4	5	6	7	8	9	10	12	14	15
30 ХГСА	Температура, °C	20	8700	13700	19700	26900	35000	44500	54900	79000	107000	123000
		100...300	—	—	19700	26900	35000	44500	54900	—	—	—
		400	—	—	16800	22800	29800	37800	48500	—	—	—
30ХГСНА		20	—	—	28500	—	50700	—	79000	114000	155000	—

Закінчення табл. Д.7.2

Діаметр болта, мм		16	17	18	20	22	24
30 ХГСА	Температура, °C	20	140000	158000	178000	219000	316000
		100...300	–	–	–	–	–
		400	–	–	–	–	–
30ХГСНА		20	202000	–	258000	317000	456000

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Barbero, E. J. Introduction to Composite Materials Design / E. J. Barbero. – Philadelphia : Taylor and Francis, 1998. – 336 p.

Jones, R. M. Mechanics of composite materials / R. M. Jones. – Taylor and Francis, 2nd edition, 1999. – 519 p.

Karpov, Ya. Jointing of high-loaded composite structural components. Part 3. An experimental study of strength of joints with transverse fastening microelements / Ya. Karpov // Strength of Materials. – 2006. – Vol. 38. – P. 575–585.

Karpov, Ya. S. Mechanics of composite materials : textbook / Ya. S. Karpov, P. P. Lepikhin, I. M. Taranenko. – Kharkiv : KhAI, 2004. – 104 p.

Taranenko, I. M. Designing of airplane's units made of composites : textbook / I. M. Taranenko. – Kharkiv : KhAI, 2015. – 140 p.

Taranenko, I. M. Designing of Airplane's Units of Composites : workbook / I. M. Taranenko. – Kharkiv : KhAI, 2016. – 50 p.

ЗМІСТ

Вступ	3
Практична робота № 1. Дослідження впливу армування симетричного композита на модуль його пружності.....	4
Практична робота № 2. Вивчення властивостей волокнистих армувальних матеріалів, що використовуються для виробництва композитів.....	12
Практична робота № 3. Приготування полімерних матричних матеріалів для ПКМ і визначення їх технологічних параметрів.....	29
Практична робота № 4. Залежність властивостей односпрямованих КМ від характеристик компонентів і ступеня армування.....	42
Практична робота № 5. Методика визначення пружних констант шаруватого композита	53
Практична робота № 6. Визначення міцнісних властивостей шаруватого ортотропного композита	62
Практична робота № 7. Проектування композитних стержнів і тяг.....	77
Практична робота № 8. Розрахунок на міцність композитних балок і лонжеронів крила	82
Практична робота № 9. Проектування композитних балок і лонжеронів крила	89
Практична робота № 10. Проектування намотаних оболонок обертання при довільному навантаженні	95
Практична робота № 11. Проектування підкріплених композитних панелей	107
Практична робота № 12. Заповнювачі для тришарових конструкцій	115
Практична робота № 13. Аналіз міцності точкового механічного з'єднання метал – композит.....	119
Практична робота № 14. Визначення технологічних параметрів формування композитних конструкцій	127
Додаток 1. Властивості композитів.....	134

Додаток 2. Несна здатність і геометричні параметри закінцівок стержнів, що використовуються в авіації	137
Додаток 3. Метричні різі	141
Додаток 4. Металеві конструкційні матеріали.....	143
Додаток 5. Властивості конструкційних клеїв	144
Додаток 6. Заповнювачі для панелей типу «сендвіч»	145
Додаток 7. Несна здатність стандартних болтів і гвинтів при розтягуванні та зсуві.....	147
Бібліографічний список	149

Навчальне видання

**Гагауз Федір Миронович,
Кривенда Сергій Петрович
Вамболь Олексій Олександрович та ін.**

**КОМПОЗИТНІ КОНСТРУКЦІЇ В АВІАЦІЙНІЙ
ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНІЙ ТЕХНІЦІ**

Редактор Т. О. Іващенко

План, 2025

Підписано до друку 18.04.2025

Формат 60x84 1/16. Папір офс. Офс. друк

Ум. друк. арк. 8,4. Обл.-вид. арк. 9,50. Наклад 50 пр.

Замовлення 53-25. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<https://www.khai.edu>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001