

II ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 620.1-419:629.73.002

Д-р техн. наук С. Б. Беліков, д-р техн. наук І. П. Волчок, д-р техн. наук О. А. Мітяєв,
канд. техн. наук В. М. Плєскач, канд. техн. наук В. О. Савченко

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ В АВІАБУДУВАННІ (ОГЛЯД)

На основі власних досліджень та літературних даних наведена інформація щодо основних властивостей (питомі міцність та модуль пружності, границя втоми, коефіцієнт інтенсивності напружень, густина та ін.) сучасних композиційних матеріалів. Розглянуто перспективи використання композиційних матеріалів у авіабудуванні та в інших галузях промисловості.

Ключові слова: композиційні матеріали, механічні та службові властивості, авіабудування.

Вступ

Традиційно застосовувані металеві та неметалеві матеріали значною мірою досягли своєї границі конструктивної міцності. Разом з тим розвиток сучасної техніки вимагає створення матеріалів, які надійно працюють у складній комбінації силових і температурних полів, при дії агресивних середовищ, випромінювань, глибокого вакууму і високих тисків. Дуже часто вимоги до матеріалів можуть мати суперечливий характер. Відомо, наприклад, що високоміцні сплави, як правило, мають низьку пластичність, високу чутливість до концентраторів напружень і порівняно низький опір розвитку тріщин утоми. Хоча традиційні методи металознавства шляхом легування і термомеханічного оброблення дозволяють істотно підвищити міцність металів і сплавів, вони не можуть змінити модуль пружності високоміцного матеріалу. Визнано, що для конструкційних матеріалів, які працюють у складних умовах, найбільш важливими характеристиками є питома міцність ($\sigma_g / \gamma g$), питома жорсткість ($E / \gamma g$) та коефіцієнт інтенсивності напружень $K_{1C} = \sigma \sqrt{\pi c}$, де σ_g – тимчасовий опір, E – модуль нормальної пружності, γ – густина матеріалу, а g – прискорення вільного падіння, σ – середнє прикладене напруження, c – напівдовжина тріщини. За першими двома показниками композиційні матеріали (КМ) переважають усі відомі конструкційні сплави (рис. 1).

КМ дозволяють одержати задане сполучення різнорідних властивостей: високої питомої міцності і твердості, жароміцності, зносостійкості, теплозахисних властивостей тощо. Спектр властивостей КМ неможливо отримати при використанні звичайних матеріалів. Їх застосування дає можливість створювати раніше не доступні, принципово нові конструкції. Завдяки КМ став

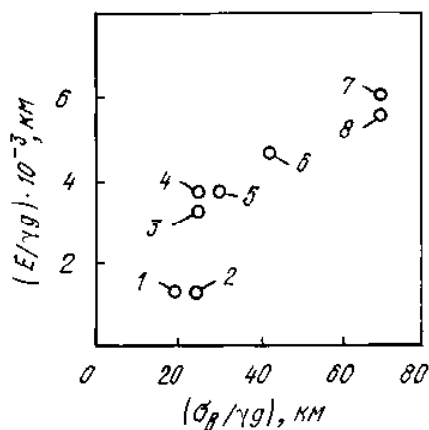


Рис. 1. Питома міцність і питомий модуль пружності деяких неармованих матеріалів і композиційних матеріалів, армованих волокнами (50 об. %):

- 1 – алюміній; 2 – титан і сталь; 3 – титан, армований берилієвим дротом; 4 – титан, армований волокнами SiC; 5 – титан, армований волокнами борсику (SiC/B/W); 6 – алюміній, армований борними волокнами; 7 – епоксидна смола, армована волокнами графіту; 8 – епоксидна смола, армована борними волокнами [1]

можливим новий якісний стрибок у збільшенні потужності двигунів, зменшенні маси машин і конструкцій і підвищенні вагової ефективності транспортних засобів і авіаційно-космічних апаратів. Так, використання КМ в конструкції найбільшого транспортного літака світу АН-225 «Мрія» дало змогу замінити 16 тонн металевих сплавів, збільшити його вантажопідйомність і далькість польоту та зекономити паливе [2–4]. Зараз загальна частка композитних деталей в конструкції літака А380 становить 23 %, а в новітньому літаку А350 – 53 %. За дани-

ми французької фірми Hexcel Composites у майбутніх літаках, які планується ввести в експлуатацію в 2030 році, частка композитів може досягти 70...75 %.

Дисперснозміцнені композиційні матеріали

При дисперсному зміцненні частинки блокують процеси ковзання в матриці. Ефективність зміцнення, за умови мінімальної взаємодії з матрицею, залежить від виду частинок, їхньої об'ємної концентрації, а також рівномірності розподілу в матриці. Застосовують дисперсні частинки тугоплавких фаз типу Al_2O_3 , Si_2O_2 , BN, SiC, які мають малу густину і високий модуль пружності. КМ звичайно одержують методом порошкової металургії, важливою перевагою якого є ізотропність властивостей у різних напрямках (табл. 1).

Ефективність зміцнення матриці некогерентними дисперсними частинками фаз залежить від їхнього розміру і відстані між сусідніми частинками. Найбільший ефект зміцнення спостерігається при розмірі частинок менше 0,1 мкм, відстані між ними $S_v = 0,01...0,3$ мкм і кількості їх близько 15 % за об'ємом. Дисперсійні композиційні матеріали мають подібність з традиційними сплавами, які дисперсійно твердіють і в яких дисперсні частинки, що виділяються при старінні, також зміцнюють матрицю. Однак у сплавах, що дисперсійно твердіють, ефект зміцнення знижується при нагріванні за рахунок розчинення, коагуляції та розупорядкування. Головна ж перевага дисперснозміцнених композитів полягає не в підвищенні границі плинності при кімнатній температурі, а в здатності зберігати високий рівень границі плинності і, відповідно, збільшувати опір повзучості матриці в широкій температурній області. Тому як дисперсні фази доцільно використовувати фази, які нерозчинні в матриці та некогерентні з нею.

Роль армувальних частинок зводиться не стільки до зміцнення матриці, скільки до перерозподілу прикладеного навантаження між матрицею і наповнювачем. Причому важливе значення матриці – це передача навантаження армувальним частинкам.

Марки САП, застосовувані в Україні, містять 6...23 % Al_2O_3 . Розрізняють САП-1 із вмістом 6...9 %, САП-2 із 9...13 %, САП-3 з 13...18 % Al_2O_3 . Зі збільшенням об'ємної концентрації оксиду алюмінію зростає міцність композиційних матеріалів. При кімнатній температурі характеристики міцності САП-1: $\sigma_s = 280$ МПа, $\sigma_{0,2} = 220$ МПа; САП-3: $\sigma_s = 420$ МПа, $\sigma_{0,2} = 340$ МПа.

Матеріали типу САП за жароміцністю переважають всі ливарні та деформівні алюмінієві сплави. Навіть при температурі 500 °С їх σ_s становить не менше 60–110 МПа. Жароміцність пояснюється гальмувальною дією дисперсних частинок Al_2O_3 на процес рекристалізації. Характеристики міцності сплавів типу САП досить стабільні. Випробування тривалої міцності сплавів типу САП-3 протягом 2 років практично не вплинули на рівень властивостей як при кімнатній температурі, так і при нагріванні до 500 °С. При 400 °С міцність САП була в 5 разів вищою від міцності алюмінієвих сплавів, що піддають старінню.

Сплави типу САП застосовують у авіаційній техніці для виготовлення деталей з високою питомою міцністю і корозійною стійкістю, що працюють при температурах до 300–500 °С. З них виготовляють штки поршнів, лопатки компресорів, оболонки тепловідільних елементів, що виділяють тепло і труби теплообмінників.

Методом порошкової металургії одержують КМ з використанням дисперсних частинок карбіду кремнію SiC. Хімічна сполука SiC має низку позитивних властивостей: високу температуру плавлення (більше 2650 °С), високі міцність (близько 2000 МПа) і модуль пружності (≈ 450 ГПа), малу густину (3,2 г/см³) і добру корозійну стійкість. Температурні залежності міцності та модуля пружності КМ Д16–20 % SiC порівняно з σ_s сплаву Д16 наведено на рис. 2.

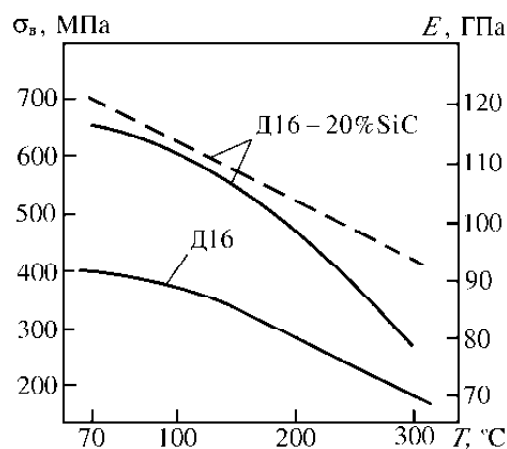


Рис. 2. Температурна залежність міцності (—) і модуля пружності (---) КМ Д16–20 % SiC

Таблиця 1 – Властивості дисперсних частинок керамічних наповнювачів

Властивість	TiB ₂	SiC	Al ₂ O ₃	BN	AlN
Густина, г/см ³	4,52	3,19–3,21	3,9–4,0	2,25	3,25–3,3
ТКЛР · 10 ⁶ , К ⁻¹	4,6–8,1	4,63–4,7	3,6–9,5	0,8–7,5	53
E, ГПа	500	350–490	380–490	90	350–380
σ _в , ГПа	1,29	0,4–1,7	0,2–6,5	1,2–1,38	3,5–7,0
σ _{0,2} , ГПа	–	1,4–17	1,7–2,5	–	–
HV, ГПа	–	24–28	15–18	–	12
T _{пл} , К	3253	2873–2970	2313	3253	2703

Матриця, крім забезпечення міцності й монолітності конструкції, повинна мати необхідну пластичність і бути працездатною в тій температурній області, для якої призначений КМ. Для виготовлення КМ, застосовуваних при температурах нижче 200 °С, належать полімерні матриці. До таких композитів відносяться склопластики, армовані короткими скляними волокнами в матриці з поліефірної смоли. Склопластики застосовують для виготовлення корпусів автомобілів, човнів, деяких побутових приладів. Як матриці також використовують термореактивні полімери, в яких поперечні зв'язки між основними ланцюгами формують тверду структуру з тривимірною сіткою. Такими полімерами є епоксидні смоли, які завдяки поперечним зв'язкам мають високу термостійкість. На рис. 3 схематично показаний спосіб виготовлення такого композиту. Волокна змотують з бобін, піддають поверхневому обробленню, що поліпшує адгезію, протягують через ванну, де їх покривають полімерною смолою. Смола скріплює волокна в плоский джгут – стрічку. Готові стрічки збирають у шаруватий листовий матеріал або ж намотують у більш складні форми. Складений в листи або намотаний матеріал піддають термообробці для підвищення твердості. Шари можна накладати по черзі з різним напрямком волокон і формувати в композиті картату структуру арматури. Це надає матеріалу жорсткість.

Недоліком такого композиту є відсутність поперечного армування в кожному окремому шарі та між шарами. Тому матеріал може розшаровуватися. До того ж, тріщина в об'ємному зразку з такого КМ, що може з'явитися, легко знаходить шлях поширення між шарами. Для усунення цих недоліків виготовляють ткани КМ.

Для роботи при вищих температурах застосовують металеві матриці. Звичайно використовують метали з малою густиною – алюміній, магній і рідше титан. Металеві КМ мають низку переваг над полімерними. Крім вищої робочої температури, вони характеризуються кращими ізотропією і стабільністю властивостей у процесі експлуатації, а також вищою ерозійною стійкістю.

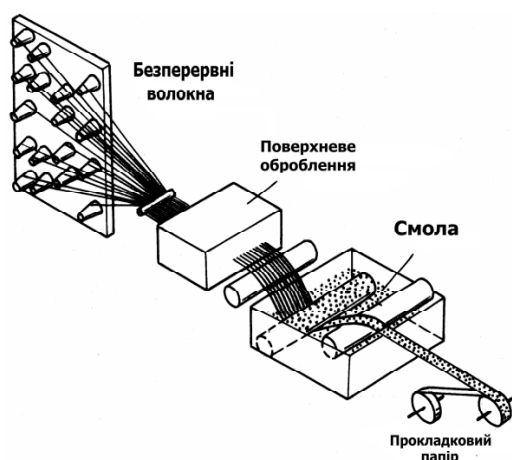


Рис. 3. Схема виготовлення композитного матеріалу

Армувальні волокна МКМ, крім високої міцності й твердості, повинні мати добре змочування розплавленою матрицею в процесі виготовлення композиту. Важливими умовами є також слабка взаємодія волокна з матеріалом матриці і його висока стійкість до окислення. Для армування металевих КМ звичайно використовують безперервні волокна: вуглецеві (ВВ), борні (В), оксиду алюмінію (Al_2O_3), карбіду кремнію (SiC), карбіду бору (B_4C), нітриду бору (BN), дибориду титану (TiB_2), оксиду кремнію (SiO_2). Також як волокна застосовують металевий тонкий дріт, отриманий методом волочіння зі сталі, W, Ti, Mo і Be. Рідше використовують ниткоподібні, спеціально вирощені кристали різних матеріалів [5].

Волокна бору звичайно одержують осадженням бору з газової фази при дисоціації його галоїдних сполук, наприклад трихлористого бору BCl_3 . Бор осаджується на основу з тонкої (12 мкм) вольфрамової нитки, нагрітої до 1100...1200 °С. У процесі осаджування бор дифундує у вольфрамову основу, утворюючи бориди вольфраму в осерді волокна. Час перебування волокна в реакційній камері становить 1...2 хв. Загальний діаметр волокна бору становить 100...150 мкм. Волокно бору після виходу з реактора проходить вимірювання діаметра і намотується на готові до вживання шпулі або йде на подальше перероблення. Для захисту волокон бору від взаємодії з розплавом алюмінію на їхню поверхню наносять покриття з карбіду кремнію (борсик) або карбіду бору. Будова стрічки товщиною 0,5 мм із композиційного матеріалу алюміній – волокна бору наведена на рис. 4, властивості волокон бору – в табл. 2.

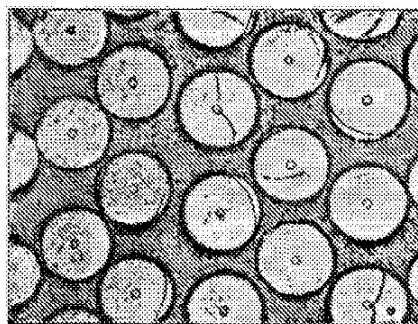


Рис. 4. Будова композиційного матеріалу Al-B

На рис. 5 наведені типові властивості композиційного матеріалу на основі алюмінієвого сплаву, армованого борним волокном (з покриттям карбідом кремнію).

Недоліком волокон бору (див. табл. 2), отриманих за цією технологією, є висока вартість вольфрамової нитки. Розроблено процес заміни вольфрамової струмопровідної нитки на підкладку дешевшого вуглецевого волокна діаметром 30 мкм.

Технологія виготовлення волокон карбіду кремнію, отриманих осадженням з газової фази на струмопровідну підкладку, багато в чому схожа на процес одержання борних волокон. Як підкладку застосовують вольфрамову

Таблиця 2 – Властивості волокон бору

Підкладка	Покриття	Діаметр волокна, мкм	γ , г/см ³	σ_g , МПа	E , ГПа
Вольфрам	—	100*	2,6...2,62	2800...3500	400
Те ж	—	140*	2,46...2,55	3500...200	400...420
—	—	200*	2,40	3300...3500	400
Вуглець	—	100...200	2,22...2,27	3320	370...390
Вольфрам	SiC	140	2,70	2900...3100	400
Те ж	B ₄ C	140	2,46	3780...4200	400...410

* Температурний коефіцієнт лінійного розширення $(4,5 \div 5,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; коефіцієнт Пуассона 0,2

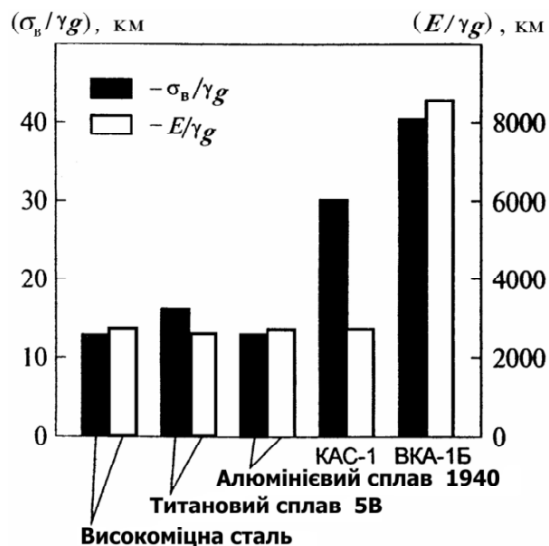


Рис. 5. Питомі міцність і жорсткість сталі, титанового, алюмінієвого сплавів і композиційних матеріалів
Al – сталевий дріт (КАС-1) і Al – борне волокно (ВКА-1Б)

або вуглецеву нитку. Основна відмінність процесу полягає в складі газового середовища, де здійснюється осадження карбіду кремнію. Процес осадження йде при нагріванні підкладки до 1200...1400 °С.

Залежно від використання волокна в тій або іншій матриці (титан, алюміній) поверхня волокна може бути збагачена вуглецем. Так, крім звичайного волокна SiC у промислових масштабах виробляється волокно карбіду кремнію SCS-2 з різним поверхневим обробленням: наприклад, волокно SCS-2 має збагачений вуглецем шар товщиною 1 мкм. Волокна карбіду кремнію на вольфрамовій і вуглецевій підкладці діаметром 100–140 мкм

випускаються в промислових масштабах; їхні основні властивості наведені в табл. 3. Волокна карбіду кремнію мають добру теплостійкість, стійкість до окиснення і мало реагують з матричним металом.

Сировиною для одержання високоміцних і високомодульних вуглецевих волокон є такі полімери з високим вмістом вуглецю, як поліакрилонітрил (ПАН), і рідше – пек і віскоза. ПАН-волокно витискають через малі отвори і піддають піролізу в інертній атмосфері при температурі близько 2000 °С. Вуглецеві волокна випускають у вигляді ниток, що містять до 10 000 елементарних волокон, діаметр яких становить близько 7 мкм. Модуль пружності та міцність волокна не змінюються при нагріванні його до 600 °С. Вуглецеві волокна мають низьку густину (до 2 г/см³), високі значення міцності та модуля пружності, що становлять відповідно 4000 МПа і 700 ГПа. Їх частіше застосовують для армування полімерних матриць, але останнім часом використовують й у МКМ.

Волокнисті композити одержують різними методами. До них належать просочення пучка волокон розплавами алюмінію і магнію з низькою температурою плавлення, плазмове напилювання, застосування методів гарячого пресування, іноді з наступною гідроекструзією або прокатуванням заготовок. При армуванні безперервними волокнами композицій типу «сендвіч», які складаються з шарів, алюмінієвої фольги й волокон, що чергуються, застосовують прокатування, гаряче пресування, зварювання вибухом, дифузійне зварювання. Лиття прутків і труб, армованих високоміцними волокнами, здійснюється з рідкометалевої фази. Пучок волокон безупинно проходить через ванну з розплавом і просочується під тиском рідким алюмінієм, магнієм або рідкою смолою у випадку виготовлення полімер-

Таблиця 3 – Властивості* волокон карбіду кремнію

Матеріал підкладки	Діаметр волокна, мкм	γ , г/см ³	σ_g , МПа	E , ГПа
Вольфрам	100	3,05...3,2	3400...4000	406...428
Вольфрам	140	3,15...3,45	3100...4000	407...428
Вольфрам, SCS-2	140	3,05	3450	407
Вуглець	140	2,89...3,05	4000...4300	420...440

* Коефіцієнт Пуассона волокон 0,2; температурний коефіцієнт лінійного розширення $(4 \div 5,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

ного матеріалу. При виході з просочувальної ванни волокна з'єднуються і пропускаються через фільтр, яка формує прутко або трубу. Цей метод забезпечує максимальне наповнення композиту волокнами (до 85 %), їхній однорідний розподіл у поперечному перерізі й безперервність процесу.

Для багатьох видів волокон розроблені технологічні процеси нанесення покриттів для забезпечення кращої змочуваності й окислостійкості та оптимальної взаємодії волокна з матрицею. Волокна бору захищають від реагування з розплавами титану і алюмінію створенням на поверхні дифузійного бар'єру з карбідів кремнію або бору. Волокна бору, захищені карбідом кремнію, називають borsic (борсик). Через високу здатність вуглецевих волокон до окиснювання на їхню поверхню наносять спеціальні покриття, а процеси перероблення здійснюють у захисній атмосфері.

Вуглецеві волокна мають негативні значення температурного коефіцієнта лінійного розширення, завдяки чому з'являється можливість при відповідному укладанні волокон одержувати ТКЛР композиційних матеріалів, близьким до нуля.

КМ системи Al-B одними з перших знайшли застосування в авіації та машинобудівній галузі. Це пояснюється їхніми високими властивостями: міцністю і твердістю при порівняно невеликій густині, що дозволяє зменшити масу виготовлених конструкцій. Основним методом одержання КМ системи Al-B є дифузійне

зварювання під тиском методом гарячого пресування чи прокатування шарів борного волокна і алюмінієвої матриці, що чергуються. При використанні борних волокон з покриттями з SiC або B₄C можна одержувати КМ методом просочення розплавом матриці [6].

Типовим представником бороалюмінієвих композитів є матеріали ВКА-1 на основі корозійностійкого алюмінієвого сплаву 1561. В табл. 4 наведені його основні фізико-механічні властивості, а також властивості КМ марки КАС-1, армованого тонким сталевим дротом ВНС-9. Властивості наведені в напрямку армування при об'ємному вмісті борних волокон 40...45 %.

За рівнем фізико-механічних властивостей композиційні матеріали марок ВКА-1Б і КАС-1 не поступаються кращим металокомпозитам фірм «Avco Speciality Div.», «DWA Composite Speciality», «Dural Aluminium Composite Corp.» [5].

Як видно на рис. 6, за питомою міцністю і жорсткістю композити ВКА-1Б і КАС-1 в 2–3 рази переважають всі сучасні суднобудівні металеві конструкційні матеріали (сталі, титанові й алюмінієві сплави). Межогрупа металевих гомогенних матеріалів міцність при стисканні. Границя утоми його на базі 2·10⁶ циклів становить ≈ 0,7 границі міцності при розтягу ($\sigma_e > 700$ МПа), у той час як для гомогенних металевих конструкційних матеріалів він не перевищує 0,4. Високі властивості КМ зберігаються аж до температури 500 °С.

Таблиця 4 – Механічні властивості В-А1 композитів

Марка композиту	ВКА-1Б	КАС-1
Границя міцності, МПа:		
- при розтягу	1100	1300
- при згині	1500	1400
- при стисканні	> 2000	1400
Модуль нормальної пружності, ГПа	> 200	110
Густина, г/см ³	2,65	4,2
Міцність при зсуві, МПа	150	140
Границя утоми на базі 2·10 ⁶ циклів, МПа	700	400
Питома міцність при розтягу, км	> 40	30
Питома жорсткість, км	> 7500	2600

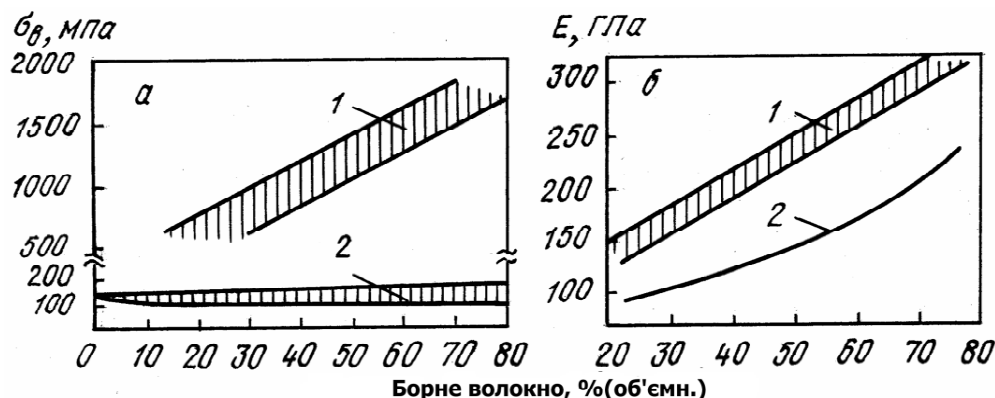


Рис. 6. Залежність тимчасового опору (а) і модуля пружності (б) бороалюмінієвого композиційного матеріалу уздовж (1) і поперек (2) осі армування від об'ємного вмісту борного волокна

Вуглеалюмінієві КМ як армувальний матеріал містять близько 50 % (об.) вуглецевих волокон і стільки ж різних алюмінієвих сплавів. Звичайно вуглеалюмінієвий композит виготовляють методом просочування армувального каркасу з вуглецевих волокон у ливарній прес-формі матричним розплавом під тиском.

КМ системи $Al-Al_2O_3$. Волокна Al_2O_3 просочують під тиском матричними алюмінієвими сплавами систем $Al-Cu-Mg$, $Al-Si-Cu$. Перевага цієї системи КМ порівняно з вуглеалюмінієм – вища корозійна стійкість. Міцнісні властивості КМ $Al-Al_2O_3$ перебувають на рівні $\sigma_s = 600 \dots 1100$ МПа, $E = 107$ ГПа.

Галузі застосування: суднобудування (гребні гвинти, корпуси торпед), авіакосмічна техніка (антени, платформи), військова техніка (корпуси двигунів, стабілізатори ракет), автомобілебудування (шатуни, голівки поршнів, деталі гальмівної системи) [6].

Міцність, модуль пружності і коефіцієнт інтенсивності напружень односпрямованих композиційних матеріалів на основі алюмінію, магнію й титану підвищуються зі збільшенням у композиції об'ємного вмісту волокон. Вплив температури випробування на питому міцність і жорсткість композиційних матеріалів різних класів наведено на рис. 7.

Для дуже високих температур, наприклад, у камерах згоряння реактивних двигунів, використовуються системи, що містять Mo і W дріт у матрицях з титану і суперсплавів. Найбільша міцність $\sigma_s \approx 2,2$ ГПа при температурі $1093^\circ C$ має дріт зі сплаву $W-Re-Hf-C$, яка в 6 разів більша від міцності нікелевих або кобальтових суперсплавів при такій же температурі.

Більші перспективи відкриваються з розвитком процесів об'ємного армування металевих КМ. Зокрема, для металевих КМ об'ємне армування дає істотний виграш в ударній в'язкості. Система Al_2O_3/Al тривимірного армування поглинає майже таку саму енергію удару, як і чистий метал. Армування по товщині, забезпечуване тривимірною волокнистою структурою, запобігає розшаруванню й обмежує поширення тріщин.

В авіації та ракетно-космічній техніці найширше використовують КМ з борними волокнами. Деталі з боропластику і бороалюмінію застосовують такі великі фірми США, як «Локхід», «Боїнг», «Дженерал Дайнемікс». Із них виготовляють горизонтальні та вертикальні стабілізатори, стерня, елементи хвостового оперіння лонжерони, лопаті гвинтів, обшивку крил тощо [4].

Полімерні композити. До недоліків металевих КМ належать їх порівняно висока вартість і складність виготовлення. За вартістю на сьогодні вони перевищують показники полімерних КМ у кілька разів. Матрицею в полімерних КМ служать епоксидні, фенолоформальдегідні, поліефірні та інші смоли, а зміцнювальним компонентом волокнистих ПКМ – борні, вуглецеві та скляні волокна, а також волокно карбїду кремнію, оксиду алюмінію, оксиду цирконію та металевий дріт. Як було показано на рис. 1, за показниками питомої міцності й питомого модуля пружності ПКМ перевищують деякі неармовані матеріали та волокнисті композити [7–12].

За типом армувального волокна ПКМ поділяються на групи: склопластики (підвищена міцність і низька ціна), органопластики (високі ударна в'язкість, питома міцність і жорсткість, витримують температуру від 100 до $300^\circ C$), вуглеволоконіти (високі механічні і службові властивості, застосовуються в авіаційній та космічній техніці), бороволоконіти (підвищена міцність, жорсткість, твердість, робота при температурі до $300^\circ C$, використовуються в авіаційній та космічній техніці). Корпус і робочі лопатки реактивного двигуна Lear виробництва CFM International виробляються з пластику армованого вуглецевими волокнами [4].

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали. Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ) з'явилися в останні роки. Вони характеризуються хімічною інертністю, малою густиною, добрими електрофізичними властивостями, можливістю регулювання теплопровідності та електричного опору в широких межах. Під «вуглецевими матеріалами» прийнято розуміти матеріали з графітоподібною структурою – від кристалічної до аморфної.

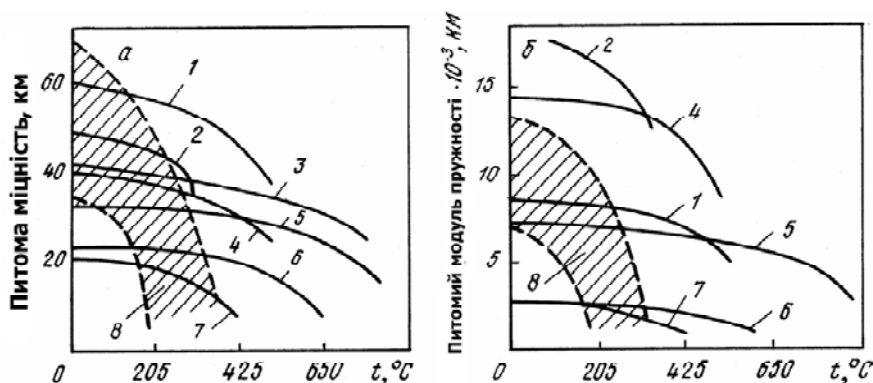


Рис. 7. Залежність питомої міцності (а) і питомої пружності (б) матеріалу від температури:

1 – B/Al; 2 – B-B/Mg; 3 – B/Ti; 4 – B-B/Al; 5 – SiC/Ti; 6 – Ti; 7 – Al; 8 – заштрихована область – КМ вуглецеве волокно/полімерна смола

У наш час найінтенсивніше розвиваються матеріалознавство, технологія і галузі застосування ВВКМ. Незважаючи на відносно високу вартість, ВВКМ знаходять застосування насамперед у авіації та космонавтиці, крім цього в медицині, у вузлах реакторів термоядерного синтезу, в автомобілебудуванні та при виготовленні спортивного інвентарю. Специфіка використання властивостей ВВКМ пов'язана з низкою унікальних особливостей, властивих класу вуглецевих матеріалів. Наявність волокнистого наповнювача в об'ємі ВВКМ робить рівень їхніх фізико-механічних властивостей недостижним для традиційних вуглецевих матеріалів. Варіювання просторовим розташуванням волокнистого наповнювача композиту є ефективним інструментом у керуванні анізотропією властивостей ВВКМ.

ВВКМ складаються з армувального каркасу і вуглецевої матриці в його об'ємі. Для армування використовують вуглецеві волокна (ВВ), що мають не тільки різні характеристики, але й різні просторові сполучення, які визначають процес заповнення каркасу вуглецевою матрицею. Волокна бувають трьох основних груп: високомодульні, високоміцні та волокна з підвищеним видовженням (табл. 5). Властивості волокон залежать від підготовки вихідної сировини і технології їх виготовлення.

Методи виготовлення об'ємних структур вуглецевих каркасів різноманітні. Відомі такі технологічні заходи, як ткацтво сухих ниток, прошивання тканин, намотування ниткою, складання жорстких стрижнів, а також комбінація цих методів. Керування анізотропією властивостей ВВКМ здійснюється шляхом варіювання укладанням арматури. Вибір схеми армування композиту роблять на підставі даних про розподіл температурних і силових полів і характер навантажування готового виробу.

Вуглецева матриця в композитному матеріалі бере участь у створенні тримальної здатності композиту, забезпечує передання зусиль на волокна. Від властивостей матриці залежать фізико-хімічні властивості матеріалу в цілому. В основі процесів одержання вуглецевих матриць лежать термохімічні (піролітичні) перетворення органічних сполук (мономерів, пеків, сітчастих полімерів) у газоподібному або конденсованому стані з формуванням різних модифікацій вуглецю і його сполук.

На цей час розроблені дві принципово різні технології одержання ВВКМ – рідкофазна і газопіролітична. У першому випадку волокнистий вуглецевий каркас просочується природним (кам'яновугільний або нафто-

вий пек) або синтетичною зв'язкою, наприклад, фенолоформальдегідною. За газофазною технологією вуглецева матриця у волокнистому вуглецевому каркасі формується в результаті осаджування вуглецю, який утворюється при розкладанні природного газу.

Застосування ВВКМ. Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали перспективні для застосування в газотурбінних двигунах (ГТД) [13]. До їх переваг належать низька густина, високі міцнісні характеристики і теплопровідність. Однак для них необхідне вирішення проблеми вигорання або окиснювання при температурах вище 370 °С шляхом застосування захисних покриттів. Зокрема, фірма «Вільям інтернейшнл» (США) проводить випробування турбінної форсунки з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу з покриттям із карбіду кремнію.

Нові ВВКМ, які зможуть працювати при температурах до 1927 °С, пропонується застосовувати в ГТД з дуже низькою витратою палива [12]. Одержання таких композитів можливо з використанням захисних покриттів, що не змінюють механічні властивості композиту. Крім того, проводяться роботи зі зниження ступеня окиснювання в інтервалі температур 538–760 °С. Однак відзначається обмеженість можливостей застосування широкого кола протиокиснювальних речовин, тому що виникає проблема збереження високого рівня механічних властивостей ВВКМ.

Фірмою «Ліцзас дівіжн» (США) виготовлене колесо турбіни діаметром 365 мм, масою 3,4 кг з ВВКМ, яке успішно пройшло стендове випробування при дії на нього навантаження 2000 Н при швидкості його обертання 28 000 об/хв. Фірма «Пратт та Вітні» (США) виготовляє панелі з тривимірного тканого ВВКМ з ребрами жорсткості для слабонавантажених конструкцій з внутрішнім кріпленням, призначеним для використання в перспективних ГТД. З ВВКМ на основі віскозних вуглецевих волокон фірма «Аерогент» (Франція) пропонує виготовляти вихідні сопла двигунів.

Основні напрямки робіт із застосування деталей з ВВКМ у конструкції ГТД спрямовані на одержання антиокиснювальних покриттів або заміну, повну або часткову, вуглецевої матриці на карбідну. Японською фірмою «Норитак» розроблений новий високоміцний композит з керамічною матрицею, армований вуглецевими волокнами. Матеріал має високу ударну в'язкість, яка в 6 разів вища від ударної в'язкості традиційних керамічних матеріалів і не погіршується в інтервалі температур до 1200 °С. Для одержання матеріалу з високими характеристиками міцності на розрив і в'яз-

Таблиця 5 – Властивості вуглецевих волокон

Тип волокна	d , мкм	γ , кг/м ³	σ , МПа (розрив)	E , ГПа
Високомодульне	8,3	2000	2100	413
Високоміцне	7,7	1800	2400...3200	240...290
З підвищеним видовженням	6,9...7,4	1750	2300...2900	170...200

кості руйнування, вміст вуглецевих волокон у матеріалі повинен становити від 30 до 45 %. Такий матеріал має в'язкість руйнування $29 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-2}$ і міцність при згині 690 МПа у випадку використання як матриці нітриду кремнію, і 18 та 610 МПа відповідно у випадку використання муліту [1].

Високощільні багатоармовані ВВКМ, отримані із застосуванням пеку, успішно застосовують у соплах ракетних двигунів у найбільш теплонапружених зонах, замінюючи маломіцні графіти та важкі тугоплавкі сплави на основі вольфраму і молібдену. Так, у двигунах ракет типу «Minuteman» соплові вкладні критичного перетину виконані у вигляді моноблочної конструкції з ВВКМ зі структурою 3D, що дозволило при модернізації двигунів знизити масу вузла, забезпечити необхідні тягові характеристики та підвищити надійність роботи сопла. У малогабаритних порохових ракетах неохолоджувана конструкція сопел часто виконується з різнорідних матеріалів. Властивості цих матеріалів для вкладнів критичного перетину наведені в табл. 6, з якої видно, що комплекс характеристик ВВКМ (густина, міцність, термостійкість) забезпечує високу ерозійну стійкість і дозволяє одержати оптимальну за масою концентрацію вкладня. ВВКМ мають особливі переваги при їхньому використанні в гальмових дисках авіаколіс. Перші повідомлення про успішну реалізацію цих ідей з'явили-

ся в 1980-х роках. На підставі проробок численних варіантів конструкцій з різних матеріалів (сталі, берилію, металокераміки та ін.) для гальм міжконтинентальних літаків фірма «Dunlop» (Англія) установила, що застосування ВВКМ дає вигоду у масі вузла до 450 кг . При цьому строк експлуатації вузлів може досягати 2000 посадок літака проти 600 посадок зі сталевими дисками. Відоме використання ВВКМ для виготовлення крайок несучих поверхонь літальних апаратів, бронювання відсіків танків і суден.

Іншою галуззю застосування ВВКМ є атомна енергетика. З цих матеріалів виготовляють труби та елементи кріплення теплообмінників для високотемпературних атомних реакторів з гелієвим охолодженням. Абсолютна інертність вуглецю стосовно кислот, лугу і солевих розчинів, а також стосовно органічних розчинників визначає ВВКМ як досить цінний матеріал для хімічної апаратури і пристроїв, умови роботи яких вимагають застосування матеріалів з високою механічною міцністю.

Вуглецева основа ВВКМ, особливості структури й армування матеріалу, а також існуючі способи його одержання дозволяють широко варіювати властивості ВВКМ, що значно розширює галузі їх застосування в майбутньому. Характеристики матеріалів, отриманих за типовою технологією, наведені в табл. 7.

Таблиця 6 – Деякі властивості матеріалів сопла

Матеріал	Температура плавлення (сублімації), °C	Густина, г/см^3	Міцність при згині, МПа	Теплопровідність, Вт/м^2	Ерозійна стійкість
Склопластик (кварц)	1400	1,72	110...160	0,4...0,9	Низька
Вуглепластик	> 700	1,45	60...90	1,0...1,6	Задовільна
	(карбонізування)				
Псевдосплав (W + Mo)	3100	1,40	240	20	Висока
Графіт	3700	1,65	29...28	60...120	Добра
	3700	1,88	34...38	80...160	Добра
Високощільний графіт ВВКМ	3700	1,80	90...110	40...70	Висока

Таблиця 7 – Типові експлуатаційні властивості ВВКМ

Характеристики	Вітчизняні ВВКМ	Закордонні аналоги			
		Sekarb-SOO	Sekarb-SF	Aerolor-32	Aerolor-33
Густина, г/см^3	1,91	1,87	2,0	1,93	1,85
Міцність при розтягу, МПа	113,0	–	130,0	170,0	80,0
Модуль пружності, ГПа	52,5	–	62,0	–	–
Міцність при стиску, МПа	145,0	95,0	115,0	130,0	100,0
Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт/м} \cdot \text{К}$	61,0	100,0	180,0	150,0	200,0
$\text{ТКЛР} \cdot 10^6, \text{К}^{-1}$	3,4	1,5	0,5...4,0	–	–
Діаметр, мм:					
заготовки	410	500	500	–	–
стрижнів	1,2	1,0...1,8	–	1,6	1,2
Температура оброблення, °C	–	3000	–	2700	195

Список літератури

1. Спеціальні конструкційні матеріали. Підручник для ВНЗ / [Солнцев Ю. П., Беліков С. Б., Волчок І. П., Шейко С. П.]. – Запоріжжя : Валпіс-Поліграф. – 2010. – 534 с.
2. Матеріалознавство : підручник / [Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І.]. – Харків : Видавництво ХНАДУ, 2007 – 440 с.

3. Савченко В. А. Проблемы и перспективы применения композиционных материалов в авиастроении. Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. трудов / Савченко В. А. – Днепропетровск : ПГА-СА, 2015. – Вып.80– С. 290–296.
4. Авиационные материалы и технологии: настоящее и будущее // Информационно-аналитический сборник материалов зарубежных периодических изданий и научных трудов. – Запорожье : Издательский комплекс АО «Мотор Сич». – 2016. – № 2 (1). – 145 с.
5. Дж Любин Справочник по композиционным материалам / Дж Любин. – М. : Машиностроение, 1988. – 584с.
6. Березовский В. В. Применение дисперсно-упрочненных металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного частицами SiC в авиационной промышленности // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2013. – № 4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/38.pdf>
7. Промышленные полимерные композиционные материалы / под. ред. М. Ричардсон. – М. : Химия, 1980. – 262с.
8. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Профессия, 2006. – 624 с.
9. Конструктивно-технологическое решение и несущая способность межступенного отсека ракеты-носителя «Циклон-4» из полимерных композиционных материалов / А. М. Зиновьев, А. П. Кушнарев, А. В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 3. – С.46–53.
10. Комиссар О. Н. Композиционные материалы и технологии для аэрокосмической промышленности / О. Н. Комиссар // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2013. – № 4. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/32.pdf>
11. Субботин В. В. Опыт применения материалов производства ФГУП «ВИАМ» и PORCHER в конструкциях узлов и деталей авиационных силовых установок из полимерных композиционных материалов / Субботин В. В., Гринев М. А. // Новости материаловедения. Наука и техника. – № 5. – 2013. – С. 1–7.
12. American Composites Manufacturers Association (ACMA) [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.acmanet.org> .
13. Гуняева А. Г. Наномодифицированный углепластик ВКУ-18 на основе ткани «Porchet» для нагруженных элементов силового набора планер / А. Г. Гуняева, О.А. Комарова // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2013. – № 5 [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/47.pdf>

Одержано 15.12.2017

Беликов С.Б., Волчок И.П., Митяев А.А., Плескач В.М., Савченко В.А. Композиционные материалы в авиастроении (обзор)

На основе собственных исследований и литературных данных приведена информация об основных свойствах (удельные прочность и модуль упругости, предел усталости, коэффициент интенсивности напряжений, плотность и др.) современных композиционных материалов. Рассмотрены перспективы использования композиционных материалов в авиастроении и в других отраслях промышленности.

Ключевые слова: композиционные материалы, механические и служебные свойства, авиастроение.

Byelikov S., Volchok I., Mityaev A., Pleskach V., Savchenko V. Composite materials in aircraft industry (review)

Based on their own research and literature data, information on the main properties (specific strength and elastic modulus, fatigue limit, stress intensity factor, density, etc.) of modern composite materials is given. The prospects of composite materials application in aircraft construction and other industries are considered.

Key words: composite materials, mechanical and service properties, aircraft building.