

$$|-H^2 \Delta\chi| > TdS ;$$

б)  $dS < 0$  і  $d\chi < 0$ , при цьому

$$H^2 \Delta\chi < |TdS|.$$

Ці нерівності можуть бути пояснені певними змінами в структурі аустеніта внаслідок зміни намагніченості.

Отже збільшення  $c$  для хромонікелевих сталей можна пояснити тим, що кількість і розподіл кластерів феромагнітного типу поступово збільшується зі збільшенням нікелю. При цьому аустеніт перетворюється у колоїдний розчин з максимальною ентропією.

Для високомарганцевих сталей зменшення ентропії пов'язано зі зменшенням карбідів феромагнітного типу  $(Fe, Mn)_3C$  або  $(Mn, Fe)_3C$  (при їх розчиненні в аустеніті), але при цьому завдяки зменшенню парціального хімічного потенціалу вуглецю у присутності марганцю відбувається утворення потужних антиферомагнітних кластерів (за участю вуглецю), що потребує зменшення магнітної сприйнятливості.

#### Список літератури

1. Ol'shanetskii V. E. Structural and magnetic stability of austenite in chromium-nickel and manganese steels with cold deformation / V. E. Ol'shanetskii, G. V. Snezhnoi, V. N. Sazhnev // Metal Science and Heat Treatment. – 2016. – Vol. 58. – № 5. – P. 311–317.
2. Ольшанецкий В. Ю. О магнитном упорядочивании кластерных зон в аустенитных сталях при изменении их состава или деформационном воздействии / В. Е. Ольшанецкий, Г. В. Снежной // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2019. – № 2. – С. 100–101.

Одержано 14.12.2020

**Д-р техн. наук Г. В. Сніжної, д-р техн. наук В. Ю. Ольшанецкий**

Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

**Snizhnoi G., Ol'shanetskii V. Thermodynamic aspects of the opposite effect of Mn and Ni on the magnetic state of austenite**

## СМС-КОМПОЗИТИ: ХАРАКТЕРИСТИКИ, СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА, ЗАСТОСУВАННЯ

Основними напрямками в покращенні експлуатаційних характеристик авіаційних двигунів є підвищення температури робочого циклу та зниження маси конструкції. На сьогодні у світі проводиться активний пошук нових високо-температурних композиційних матеріалів і технологій виготовлення з них деталей [1]. Новий клас перспективних високотемпературних композиційних матеріалів (КМ) – керамоматричні композиційні матеріали (СМС-композити). На сьогодні створені основи синтезу і технології поєднання складноутворювальних, керамічних, склокерамічних, склокристалічних матриць з вуглецевими джгутами, тканинами, ниткоподібними кристалами та волокнами карбіду кременію, діоксиду кременію, оксиду алюмінію та іншими армувальними компонентами [2].

Питома вага надлегких СМС-композитів складає лише третину питомої ваги металевих сплавів, що дозволяє при їх використанні суттєво підвищити експлуатаційні характеристики двигунів, довговічність і паливну економічність. СМС-композити, окрім високих міцності, тріщиностійкості, хімічної інертності та корозійної стійкості, характеризуються набагато більш значною теплостійкістю, ніж металеві сплави, тому потребують подання меншої кількості повітря для охолодження гарячої частини двигуна. За рахунок використання зменшеної кількості повітря у газоповітряному тракті при робочому циклі підвищується коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна. Прогнозується, що потреба в СМС-композитах протягом наступного десятиріччя збільшиться мінімум у 10 разів.

Наступним кроком у виробництві перспективних літаків стає перехід на виготовлення 100 % композитного силового набору фіюзеляжу. Застосування як матриць смол з більш високою гнучкістю, прогнозовано забезпечить поліпшення поглинання ударних навантажень.

## Основні види та характеристики СМС-композитів

Широкий діапазон властивостей матеріалів можна забезпечити при використанні вуглецевих волокон для армування скла та зміни концентраційного сполучення волокно-скло. Властивості деяких матеріалів, що отримано за кордоном, на основі безперервних вуглецевих волокон і скломатриць з робочою температурою 600...800 °С наведені у таблиці 1.

Головною перевагою склокристалічної матриці є зменшена ймовірність зниження міцності вуглецевих волокон внаслідок окислення, за рахунок того, що формування заготовки проводять при відносно низьких температурах. Термооброблення забезпечує протікання спрямованої кристалізації у скломатриці, що суттєво підвищує опір деформації матеріалу під навантаженням зі збільшенням робочих температур.

**Таблиця 1** – Властивості композиційних матеріалів на основі боросилікатного скла типу DURAN і вуглецевих волокон [2]

Армувальний наповнювач	Властивості армувального наповнювача			Властивості композиційного матеріалу	
	$\sigma_b$ згину, МПа	E, ГПа	Густина $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_b$ згину, МПа	E, ГПа
T300	3530	230	1,76	684	137
T1000	7060	294	1,82	1249	161
M40J	4410	377	1,77	1173	180
M50J	3920	540	1,93	1434	272
M60J	3920	588	1,94	1647	278

Матеріали на основі склокерамічних матриць, що армовані волокнами SiC, за даними закордонних джерел, здатні працювати при робочих температурах до 1250 °С (табл. 2).

**Таблиця 2** – Властивості композиційних матеріалів на основі склокерамічних матриць і волокон карбіду кремнію [2]

Армувальний наповнювач	Матриця	Властивості армувального наповнювача			Властивості композиційного матеріалу	
		$\sigma_b$ згину, МПа	E, ГПа	Густина $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_b$ згину, МПа	E, ГПа
Nicolon	LAS	2800	200	2,55	800	-
	CAS	2800	200	2,55	870	130
	SAS	2800	200	2,55	1000	-
Hi-Nicolon	BAS	2800	269	2,74	900	160

СМС-композити армовані волокнами вуглецю, карбіду кремнію та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при кімнатній температурі мають показники міцності на рівні 100...400 МПа і 100...250 МПа відповідно при температурах 1400...1500 °С. Ударна в'язкість таких композитів сягає КСТ = 20...30 кДж/м<sup>2</sup>.

Пріоритетним напрямом підвищення властивостей СМС-композитів є забезпечення захисту керамічною матрицею армувальних волокон від окислення. На сьогодні над цим активно працюють при підтримці держави у Японії (фірми Ube Industry, Nippon Carbon) та США (фірми Dow Corning, Kaiser). Дані розробки базуються на використанні елементоорганічних полімерів, які при відносно невисоких температурах і тисках здатні переходити із органіки у неорганіку, що дозволяє отримати керамічну матрицю заданого складу (табл. 3). Для досягнення цієї мети використовують полімерні зв'язувальні речовини типу полікарбосиланів, полісілазанів. В результаті піролізу в інертному середовищі утворюються керамічні залишки та суміші SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, які заповнюють міжволоконний простір у якості матриці. Головним недоліком технології є: подолання усадкових явищ та надмірної взаємодії на кордоні розділу матриця-волокно; необхідність проведення багатократних додаткових рідкофазових і газофазових просочувань з повторенням процесу піролізу.

Відомо, що СМС-композити типу SiC-SiC та C-SiC характеризуються високою стійкістю до окислення. Випробування при температурах 1500 °С впродовж 500 годин не виявило втрат маси зразків. Залежно від складу матеріалів та їх структури, в окислювальному середовищі починаючи з 800 °С спостерігалось збільшення маси зразків за рахунок утворення фази SiO<sub>2</sub> на поверхні SiC. З підвищенням температури процес проходив більш інтенсивно, що призводило до самозаліковування дефектів (шпарин, тріщин) композиційного матеріалу [2].

Зараз активно проводяться пошукові роботи по розробці ефективних технологій керування процесами самолікування СМС-композитів. Одним із напрямків є введення до складу КМ тонкодисперсних капсул, які при температурах ~ 1400 °С плавляться і випаровуються, після чого парова фаза кремнію заповнює порожнини та осаджується на дефектах матеріалу, що були на початку та накопичилися в процесі експлуатації. Такі підходи забезпечують заліковування дефектів, підвищення тріщиностійкості, додатковий захист від окислення при високих температурах.

**Таблиця 3** – Властивості СМС-композитів на основі полімерних керамоутворювальних матриць [2]

Держава	Армувальний наповнювач	Властивості КМ		
		$\sigma_b$ згину, МПа	$T_{роб.}$ , °С	Густина $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>
Франція	-	400	1400	-
Японія	Волокна SiC (Nicolon)	110	до 1000	1,9
	Тканина SiC (Tiranno)	350	1200	1,8
США	Волокна: C (Celion), SiC (Nicolon), алюмоборосилікатні (Nextel-312)	70...100	-	1,3...1,5
	Тканина SiC (Nicolon)	220	до 900	1,96

### Сучасний стан та перспективи виробництва

Хімічний гігант Solvay (головний офіс знаходиться у Бельгії) в даний час є лідером у поставці легких матеріалів для аерокосмічної галузі та постійно розширює потужності з виробництва композиційних матеріалів. В рамках даної програми, Solvay вводить до строю нову чергу з виробництва смол і запускає удосконалений виробничий комплекс в м. Естринген (Німеччина). На цьому підприємстві компанія Solvay планує випускати унікальні просочувальні смоли (infusion resins), а також смоли для армування композиційних матеріалів. Об'єм інвестицій в проєкт в м. Естринген склав приблизно 50 млн. євро. Також Solvay випускає смоли для просочування (процесу інфузії) в м. Анахейм (Anaheim, штат Каліфорнія, США) та в м. Рексем (Wrexham, Великобританія) [3, 4].

Постачальник вуглецевого волокна Hexcel Composites готується до прогнозованого зростання попиту на композити з урахуванням прискорення темпів виробництва в рамках реалізації програм, що існують та діють, а також збільшення кількості деталей з композитів у перспективних комерційних авіалайнерах [5].

Новий виробничо-технологічний центр компанії Hexcel в м. Касабланці (вільна економічна зона Midparc, Марокко) планує виготовлення із сотових матеріалів HexWeb деталей спеціального призначення для підвищення міцності конструкцій та зниження ваги у виробках аерокосмічного призначення: конструкціях планерів літальних апаратів, мотогондолох і лопатях несучого гвинта гелікоптерів [6].

Hexcel постачає попередньо просочені тканини з вуглецевого волокна для виробництва мотогондол турбогвинтових двигунів для літака A350 XWB і двигуна CFM Leap. Відповідно до програми A350 XWB, постачальники AIRBUS виготовляють 90 % силового набору фюзеляжу та усі стрингери з вуглецевого волокна виробництва Hexcel.

Hexcel ставить перед собою мету будівництва до 2030 року вузькофюзеляжного літака у якому доля використання композиційних матеріалів досягне 70...75 % від загальної ваги літака, що перевищить долю композитів у конструкції новітнього авіалайнера A350 (53%). Загальна доля композитних деталей в конструкції A380 на сьогодні становить 23 %.

Компанія General Electric (GE) Aviation зробила велику ставку на СМС-композити, як матеріали з низькою питомою вагою та високою температурною стійкістю [5]. Компанія GE Aviation інвестує більш ніж \$200 млн. у будівництво двох фабрик на площі 100 акрів у м. Ханствіль (штат Алабама, США). Фабрики призначені для масового виробництва матеріалів на основі карбїду кремнію (SiC), які використовують для виготовлення деталей з композитів із керамічною матрицею (СМС<sub>к</sub>) для реактивних двигунів і наземних газових турбін енергогенерувальних установок [7]. Дві фабрики GE Aviation, що будуються, задіяні в окремих операціях технологічного процесу – виробництві SiC-керамічних волокон та виготовленні керамічної стрічки із SiC. Фабрика з виготовлення керамічних волокон фінансується дослідницьким центром ВПС США в обсязі \$21,9 млн. Температурна стійкість SiC керамічного волокна сягає 2400 °F [7]. Використання легковагових теплостійких композитів з керамічною матрицею у гарячій частині реактивних двигунів виробництва GE Aviation є проривом в індустрії реактивного руху. СМС-композити складаються з SiC-керамічних волокон в матриці, властивості яких підвищують шляхом нанесення патентованих покриттів [7].

Rolls-Royce офіційно відкрила (27.10.2016 р.) новий центр з досліджень високотемпературних композитів в Cypress (на південь від Лос-Анжелесу, США). В центрі вже виготовляють перші дослідні листи СМС-композиту з SiC-матрицею, що зміцнена волокном із карбїду кремнію (SiC/SiC). Даний матеріал складає основу деталей наступного покоління, які будуть демонструватися у складі технологій Rolls-Royce. Rolls-Royce планує використання СМС-композитів у проставках статора турбіни та соплових лопатках. У перспективі планується розширення номенклатури деталей з поступовим ускладненням умов експлуатації [8].

Протягом багатьох років компанія Israel Aerospace Industries (IAI) забезпечує виконання програм заказів Boeing на постачання складних вузлів літаків Boeing 787 та Boeing 777. IAI має значний досвід у виробництві композиційних матеріалів для широкого спектру авіаційних виробів і технологій:

- удосконалені шаруваті препреги;
- конструкції з монолітним підкріпленням, заповнювачем у вигляді піни (Integrally Stiffened, Foam-core Structures);

- нарізні сотові конструкції (Fulldepth Honeycomb Structures);
- інфузія рідкої смоли (Liquid Resin Infusion (LRI));
- зклеювання металу з металом (Metal-to-metal Bonding) [9].

На сьогодні, єдиним великим виробником керамічного волокна у світі вважається: NGS Advanced Fibers (Японія) – сумісне підприємство Nippon Carbon, General Electric та Safran (Франція).

### Застосування СМС-композитів

На сьогодні виробники авіаційних двигунів великої потужності General Electric та Rolls-Royce демонструють історичне зростання об'ємів виробництва на фоні рекордних темпів будівництва широкофюзеляжних авіалайнерів.

Компанії Boeing та General Electric готують до випробувань найбільший у світі турбовентиляторний двигун GE9X для широкофюзеляжного літака Boeing 777X. В цьому двигуні облицьовувальний матеріал камери згоряння та секторів статору I ступені турбіни високого тиску (ТВТ), а також лопатки соплових апаратів I і II ступенів ТВТ виготовлені з композитів з керамічною матрицею [10]. На сьогодні розміщено заказів на більш ніж 700 двигунів GE9X, початок комерційної експлуатації заплановано на 2020 рік [7]. Застосування СМС-композитів у гарячій частині двигуна продиктовано необхідністю знизити витрати палива, покращити співвідношення «потужність-маса» та скоротити експлуатаційні витрати.

На виробничих потужностях General Electric Aviation в м. Ешвіль (штат Північна Кароліна, США) виготовляються бандажні проставки із СМС-композиту для турбіни високого тиску двигуна LEAP. В м. Гринвіль (штат Південна Кароліна, США) виготовляють деталі із СМС-композитів, що призначені для заміни суперсплавів в газових турбінах великої потужності.

Кожен двигун LEAP нараховує 18 бандажних проставок турбіни з СМС-композиту, які відносяться до статорних деталей ТВТ. Авіадвигун LEAP встановлюють на пасажирські літаки Airbus A319neo, A320neo та A321neo. На сьогодні він відрізняється використанням найбільш прогресивних технологій:

- композитні лопатки та корпус вентилятора з вуглецевого волокна з тривимірним плетінням;
- сектори бандажу статора ТВТ із композитів з керамічною матрицею;
- робочі лопатки турбін низького тиску (ТНТ) із алюмініду титану;
- унікальна система попередження попадання в газоповітряний тракт сторонніх предметів;
- малоємісійна камера згоряння NAPS з форсунками для палива, які виготовлені методом адитивного виробництва.

**Компанія Rolls-Royce.** На сьогодні Rolls-Royce активно проводить випробування з метою демонстрації прогресивних технологій у Великобританії, Німеччині та США. Головна концепція Rolls-Royce, у питанні суттєвого підвищення експлуатаційних характеристик авіадвигунів, полягає у зниженні витрат палива та маси деталей у порівнянні з металевими деталями. Ставка робиться на широке використання СМС-композитів, що забезпечує:

- зниження витрат палива у авіадвигунах наступного покоління;
- зниження витрат повітря на охолодження у робочих циклах і маси деталей серійних двигунів;
- можливість переходу до двигунів з більш удосконаленим робочим циклом.

У 2013 році у рамках програми Великобританії Environmental Friendly (EFE) з успіхом закінчено всі термомеханічні атестаційні випробування ущільнювальних секторів статору турбіни високого тиску із SiC/SiC СМС-композиту.

Особлива увага приділяється легковажній системі низького тиску. У рамках програми Advanced Low Pressure System в 2016 році закінчено випробування вентилятора системи «С-композит + Ti». Випробування з метою оцінювання проводять на двигуні Trent 1000.

В двигуні Advance 3 для забезпечення низького рівня викиду шкідливих речовин при згорянні палива впроваджені ущільнювальні сектори статору ТВТ I ступені із композиту з керамічною матрицею та соплові лопатки I ступені ТВД, що виготовлені за Cast-Bond технологіями.

В рамках програми Joint Strike Fighter (Єдиний Ударний Винищувач) є включення до конструкції головних підшипників гібридного підходу, за яким роликові елементи виготовляють керамічними. Необхідність застосування таких підшипників у перспективних конструкціях двигунів обумовлена вирішенням проблеми опору високим навантаженням, які діють всередині газогенераторів [11].

Для підвищення температурного ККД деталі вентилятора двигуна Trent 7000 з 2020-х років планується виготовляти з більш коштовних композитів на керамічній основі, що дозволить підвищити робочі температури [12].

**Компанія Pratt & Whitney.** Двигуни постійного циклу, що експлуатуються на сьогодні, оптимізовані на досягнення або максимальної потужності, або економії палива.

В рамках програми Adaptive Engine Technology Development (AETD) виконано пуски двигуна F414, у якого ряд деталей виготовлені із СМС-композитів. До них відносяться:

- робочі лопатки II ступені турбіни низького тиску (ТНТ);
- удосконалений теплообмінник;
- статорна частина вентилятора;
- створи та ущільнення з оксид-оксидного композиційного матеріалу з керамічною матрицею [5].

Список літератури

1. Авиационные материалы и технологии : настоящее и будущее. – Изд. комплекс АО «Мотор Сич», 2015. – № 2(1). – 146 с.
2. www.viam.ru/public.
3. www.cytec.com/company/news/.
4. www.plasticsnewseurope.com/.
5. www.ainonline.com/.
6. www.hexcel.com/news//
7. www.geaviation.com.
8. www.envirotrec.ca/rolls-royce-gearbox-and-ceramics-word-aim-at-next-gen-engines/.
9. www.iai.co.il/.
10. AW&ST (23.05-05.06.2016r).
11. www.aviationweek.com/.
12. www.airbus.com.

Одержано 18.12.2020

© Д-р техн. наук Мітяєв О. А.

Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

Mityaev O.

**SMS-composites: characteristics, current state and prospects of production, application**

## РОЛЬ ФІЗИКИ У ФАХОВІЙ ПІДГОТОВЦІ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ

**Вступ.** Згідно законодавчої бази України [8, 11] дисципліна «фізика» один із компонентів цілісної системи підготовки інженерно-технічних фахівців. Сучасні реалії підготовки майбутніх інженерів вимагають певних змін в реалізації освітнього процесу, оновленні дидактичної моделі фізики. В умовах освітнього процесу, зокрема, фізики необхідно сприяти формуванню «здатності майбутніх інженерів застосовувати фундаментальні наукові факти, концепції, теорії, принципи для розв’язування професійних задач і практичних проблем металургії, галузевого машинобудування» [11] тощо. В умовах сьогодення посилюється увага щодо створення НМК з фізики, який би був адаптований для підготовки майбутніх інженерів і, зокрема, для галузі знань 13 «Механічна інженерія» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, що визначає актуальність дослідження в цьому напрямку.

**Мета дослідження.** Розглянемо роль фізики для фахової підготовки майбутніх інженерів для галузі знань 13 «Механічна інженерія» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

**Методи дослідження.** Згідно поставленої мети використано *загальнонаукові методи*: теоретичного пошуку щодо аналізу психологічної, методичної літератури за темою статті, аналізу нормативно-правової документації в сфері освіти, системно-структурні щодо порівняння, узагальнення теоретико-прикладних аспектів відповідно даної теми; *емпіричні методи*: аналіз освітньої діяльності майбутніх інженерів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Ні в кого не виникає сумнівів у тому, що курс фізики є фундаментом для усвідомлення фахових дисциплін майбутніми інженерами і має бути орієнтованим на їхню майбутню професію. А це спонукає викладачів фізики змінювати дидактичні підходи щодо реалізації освітнього процесу та здійснювати його на якісно новому рівні, на засадах компетентнісного підходу. Акцентуємо увагу на тому, що на всіх видах навчальних занять, а саме: лекціях, лабораторних, практичних, індивідуальних заняттях, консультаціях, а також під час виконання завдань самостійної роботи доречно розглядати фізичні знання в контексті майбутньої професійної діяльності.

*Мета освітньої діяльності* викладачами фізики завжди і, зокрема, сьогодні визначається згідно нормативних документів про освіту. В стандарті вищої освіти одним із результатів навчання майбутніх інженерів є «знання і розуміння фундаментальних наук, що лежать в основі відповідної галузі знань» [11].

У зв’язку з урахуванням реалій сьогодення діяльність викладача фізики підпорядковується досягненню результату освітньої діяльності студента щодо підготовки висококваліфікованого фахівця [1].

З метою реалізації даної вимоги під час розробки робочої програми викладач фізики продумує приклади інтеграції академічних знань з дисципліни «фізика» та фахових знань, наприклад, зі спеціалізації «прикладне матеріалоз-