

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

Ю. А. Буренніков І. О. Сивак, С. І. Сухоруков

НОВІ МАТЕРІАЛИ ТА КОМПОЗИТИ

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2013

УДК [620.22+621.763] (075)

ББК 30.3 я73

Б91

Автори

Ю. А. Буренніков, І. О. Сивак, С. І. Сухоруков

Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів.
Лист № 1/11-20254 від 28.12.12 р.

Рецензенти:

В.В. Рудь, доктор технічних наук

І. В. Кузьо, доктор технічних наук

М. І. Пилипець, доктор технічних наук

Буренніков, Ю. А.

Б91 Нові матеріали та композити навчальний посібник / Ю. А. Буренніков
І. О. Сивак, С. І. Сухоруков – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 158 с.

ISBN 978-966-641-516-8

В навчальному посібнику головна увага приділена армованим композиційним матеріалам – композиціям, в яких матриця зміцнена елементами ниткоподібної форми. Приведені методи отримання таких композиційних матеріалів та їх властивості. Розглянуті особливості процесів різання композиційних матеріалів.

Один із розділів присвячений результатам досліджень в області наноматеріалів та нанотехнологій. В посібнику приведено інформацію про найбільш відомі на даний час наноматеріали.

Навчальний посібник призначений для студентів старших курсів машинобудівних спеціальностей.

УДК [620.22+621.763] (075)620.1.002.3

ББК 30.3 я73

ISBN 978-966-641-516-8

© Ю. Буренніков, І. Сивак, С. Сухоруков, 2013

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗМІЦНЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ВОЛОКНАМИ.....	7
1.1 Класифікація армованих КМ.....	7
1.2 Вимоги, що висуваються до волокон і матриці.....	11
1.3 Закон Гука для анізотропних тіл.....	13
1.4 Модулі пружності однонаправлених армованих КМ.....	21
1.5 Міцність однонаправлених КМ з неперервними волокнами у напрямі армування.....	25
1.6 Міцність при розтягуванні КМ, армованих дискретними волокнами.....	32
2 АРМУВАЛЬНІ ВОЛОКНА.....	38
2.1 Ниткоподібні кристали.....	38
2.2 Металеві дроти.....	46
2.3 Керамічні волокна.....	55
2.4 Вуглецеві, борні і карбідокремнієві волокна.....	61
2.5 Армувальні елементи.....	67
3 КОНСТРУКЦІЙНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	70
3.1 Металеві композиційні матеріали.....	70
3.1.1 Матричні матеріали.....	70
3.1.2 Способи виготовлення МКМ.....	74
3.2 Полімерні композиційні матеріали.....	83
3.2.1 Наповнювачі для полімерних композиційних матеріалів.....	83
3.2.2 Неперервні волокна і тканини.....	87
3.2.3 Наноккомпозити.....	92
4 МЕХАНІЧНА ОБРОБКА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	100
4.1 Особливості процесів різання композиційних матеріалів.....	100
4.2 Вплив механічної обробки на властивості композитів.....	104
4.2.1 Якість поверхні при обробці композитів.....	104
4.2.2 Точіння виробів з композитів.....	107
4.2.3 Свердління виробів із композитів.....	110
4.2.4 Фрезерування виробів із композитів.....	112
4.2.5 Алмазно-абразивна обробка виробів із композитів.....	114
4.2.6 Розрізання виробів із композитів.....	115
4.2.7 Нарізання різі абразивними і алмазними кругами.....	117
4.3 Основні вимоги охорони праці та промислової безпеки при обробці композитів.....	118
5 НОВІ МАТЕРІАЛИ.....	121
5.1 Графен.....	121
5.1.1 Властивості графену.....	123
5.1.2 Використання графену.....	124

5.1.3 Вуглецеві нанотрубки.....	126
5.1.4 Сенсори типу "штучна шкіра" – датчики тиску і деформації, створені на основі прозорих гнучких плівок з вуглецевих нанотрубок.....	134
5.2 Надлегкі пористі матеріали	144
5.3 Формування в металах ультрадрібнозернистих (УДЗ) структур.....	147
ЛІТЕРАТУРА	156

ВСТУП

Композиційні матеріали (КМ) – це матеріали, які складаються із двох або більше компонентів (дискретних елементів і матриці, що їх зв'язує), мають специфічні властивості, відмінні від суми властивостей елементів, що їх складають. Дискретні елементи можуть виконувати пасивну роль – служити наповнювачем, або активну – використовуватись як армувальні (зміцнювальні елементи). Інертні наповнювачі найчастіше використовуються для зменшення вартості композита або для заповнення об'єму. Активні наповнювачі використовуються для модифікації механічних або експлуатаційних властивостей (міцність, електропровідність, теплопровідність та ін.).

Композиційні матеріали мають цілий ряд специфічних властивостей, які мало характерні для традиційних конструкційних матеріалів, наприклад, для КМ характерна значна анізотропія механічних і фізичних характеристик, умови руйнування КМ значно відрізняються від умов руйнування металів. Композиційні матеріали використовують як для заміни традиційних конструкційних матеріалів, так і як спеціально створені матеріали, які мають деякі спеціальні властивості, заради яких вони і створюються, – теплозахисні, електрофізичні, оптичні, антикорозійні, радіопрозорі та ін.

Розвиток техніки, з одного боку, породжує необхідність розробки нових конструкційних матеріалів, а з іншого – в значній мірі залежить від результатів цих розробок. Тому нові матеріали, які з'являються в зв'язку з необхідністю вдосконалення існуючих конструкцій, відкривають можливості для реалізації нових конструктивних рішень і розробки нових технологічних процесів.

Відомі конструкційні матеріали вже не можуть задовольнити зростаючі до них експлуатаційні вимоги. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є створення матеріалів з комплексом необхідних характеристик, які можна забезпечити лише розробкою відповідних композицій, в яких об'єднані кращі якості окремих складових. За рахунок вибору компонентів, їх концентрації, розмірів, форми, орієнтації та міцності з'єднання один з одним, фізико-механічні властивості композиційних матеріалів можна регулювати в дуже широких межах. Використання композиційних матеріалів дозволяє значно підвищити міцність і одночасно зменшити масу літаків, ракет, автомобілів, суден; збільшити потужність двигунів, створити нові конструкції, працездатність яких раніше обмежувалась відсутністю необхідних матеріалів.

В даному навчальному посібнику головна увага приділена армованим композиційним матеріалам – композиціям, в яких матриця зміцнена елементами ниткоподібної форми. Саме в таких матеріалах можливе широке варіювання властивостей, зміцнення композиційних матеріалів в

найбільш навантажених напрямках, пристосування їх до вимог конструкції. Використання таких композиційних матеріалів нерозривно пов'язано з питаннями проектування. Як правило, в різних напрямках елементи конструкції мають різні навантаження: в одних – великі, в інших – малі. Використання армованих композиційних матеріалів в таких випадках дуже ефективно, оскільки сам матеріал можна отримати з відповідними властивостями, створеними у відповідних напрямках.

Останнім часом все більше уваги приділяють дослідженням в області наноматеріалів та нанотехнологій, де працюють з об'єктами, розмір яких хоча б в одному вимірюванні співрозмірний із кореляційним радіусом того чи іншого фізичного явища (наприклад, довжини вільного пробігу електронів, фононів, довжини когерентності в надпровіднику, розмір магнітного домену або зародка твердої фази). За рекомендації Міжнародного союзу з чистої та прикладної хімії (IUPAC) за «нанокритерій» приймають величину 100 нм. Використання наноматеріалів має дуже великі перспективи через їх фундаментальну відмінність від звичайних матеріалів. Тому в посібнику наведено інформацію про найбільш відомі на даний час наноматеріали.

Навчальний посібник охоплює більшу частину матеріалу лекційного курсу та основні теми практичних і лабораторних занять.

Вважається, що студенти вже ознайомлені з курсами технології металів, матеріалознавства, математичного аналізу, опору матеріалів і термодинаміки, а також знайомі з елементами теорії ймовірності та тензорного аналізу.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗМІЦНЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ВОЛОКНАМИ

Наука про композиційні матеріали (КМ) зовсім молода, проте дослідники теорії зміцнення матеріалів волокнами досягли значних успіхів. Вона дозволяє знайти загальні закономірності зміцнення для композицій з різними матрицями, не дивлячись на те, що технологічні прийоми отримання КМ на металевій, полімерній чи керамічній основах можуть істотно відрізнятися один від одного. Механіка зміцнення КМ базується на положеннях теорії анізотропних середовищ, теорії пружності та опору матеріалів. Матеріалознавців, що займаються синтезом КМ, в першу чергу цікавить питання – як розрахувати властивості композиції за відомими характеристиками і концентраціями компонентів. Для вирішення цієї задачі необхідно використовувати розрахункові моделі. Питання про те, наскільки достовірно та чи інша модель описує поведінку реальних КМ, можна вирішити лише експериментальною перевіркою, оскільки будь-яка модель ідеалізує поведінку реальних об'єктів. Найбільш розроблений і простий з теоретичної точки зору випадок КМ, це КМ армовані волокнами, які орієнтовані в одному напрямі. Розгляду механічних властивостей таких композицій буде приділено основну увагу. Перш ніж приступити до аналізу механічних властивостей КМ, розглянемо основні види анізотропних матеріалів, які використовуються в техніці [1].

1.1 Класифікація армованих КМ

Композиційні армовані матеріали можна класифікувати за такими ознаками: матеріал компонентів, тип арматури та її орієнтації, спосіб отримання композиції і виробів з неї, за призначенням. Залежно від матеріалу матриці всі КМ можна розбити на три групи: композиції з металевою матрицею – металеві композиційні матеріали (МКМ), з полімерною матрицею – полімерні композиційні матеріали (ПКМ) і з керамічною матрицею – керамічні композиційні матеріали (ККМ).

Полімерні КМ в більшості випадків називають за матеріалом армувальних волокон. ПКМ, армовані скляними волокнами, називаються склопластиками, металевими – металопластиками, органічними – органопластиками, борними – боропластиками, вуглецевими – вуглепластиками, азбестовими – азбопластиками і т. п.

Відносно металевих і керамічних КМ поки що немає чітко встановлених правил присвоєння назв. В більшості випадків спочатку називають матеріал матриці, потім матеріал волокна. Наприклад, позначення "мідь-вольфрам" (Cu-W) стосується КМ з мідною матрицею і вольфрамовими волокнами; "оксид (III) алюмінію-молібден" (Al_2O_3 -Mo) – до КМ на основі Al_2O_3 з арматурою з молібденових дротів. Ми будемо користуватися такими позначеннями, але в літературі іноді зустрічається й

інше: спочатку вказують матеріал волокна, а потім - матриці. Залежно від початкового структурного і фазового стану матричного матеріалу розрізняють МКМ з порошковою, литою і листовою матрицею. МКМ, що набирають з поперемінних шарів волокон і тонких листів матричного матеріалу, називають іноді МКМ типу "сендвіч". Для отримання керамічних композиційних матеріалів найчастіше використовують матрицю у вигляді порошку.

За орієнтацією та типом арматури (конструкційний принцип) всі МКМ можна розбити на дві групи: ізотропні і анізотропні.

Ізотропними називають матеріали, що мають однакові властивості в усіх напрямках. Серед МКМ, що розглядаються в цьому посібнику, до числа ізотропних відносять дисперсно-зміцнені і хаотично армовані матеріали. В першому випадку зміцнювальні елементи мають приблизно рівновісну форму, в другому зміцнення здійснюється короткими (дискретними) частинками голчатої форми, хаотично орієнтованими в просторі. Як такі частинки використовують відрізки волокон або ниткоподібні кристали („вуса”); при цьому МКМ виходять квазіізотропними, тобто анізотропними в мікрооб'ємах, але ізотропними в об'ємі всього виробу.

Анізотропними називають матеріали, властивості яких залежать від напрямку. До таких МКМ відносять матеріали, волокна яких орієнтовані в певних напрямках – однонаправлені, шаруваті і тривимірноармовані. Анізотропія МКМ конструкційна – її спеціально закладають в МКМ для виготовлення конструкції, де вона найбільш бажана. На відміну від такої анізотропії існують технологічна анізотропія, що виникає при пластичній деформації ізотропних матеріалів (металів), і фізична анізотропія, властива кристалам у зв'язку з особливостями будови їх кристалічних ґраток.

В техніці найчастіше використовують анізотропні МКМ з певною симетрією властивостей. При вивченні їх фізико-механічних характеристик реальний, як правило, вельми неоднорідний, матеріал уявляють як деяке суцільне однорідне середовище, що ідеалізується, з відповідною симетрією будови та властивостей. Найбільш часто практично важливі орієнтовані МКМ вдається подати як ортотропні або як трансверсально ізотропні середовища.

Ортотропними (ортогонально анізотропними) називають матеріали, що характеризуються наявністю в кожному елементарному об'ємі трьох взаємно перпендикулярних площин симетрії властивостей. З достатнім ступенем точності до таких матеріалів можна віднести МКМ, армовані волокнами з поздовжньо-поперечним укладанням (рис. 1.1), а також шаруваті МКМ, армовані в двох неортогональних напрямках x'_1 і x'_2 , під кутом 2γ (рис. 1.2) з правильним чергуванням шарів.

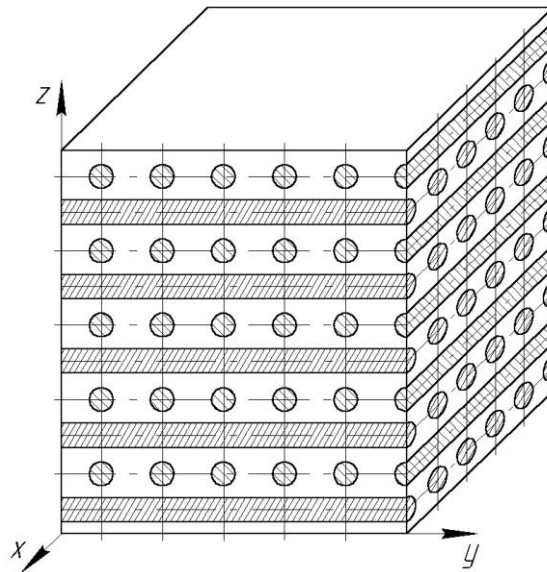


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення структури ортотропного КМ з поздовжньо-поперечним укладанням волокон

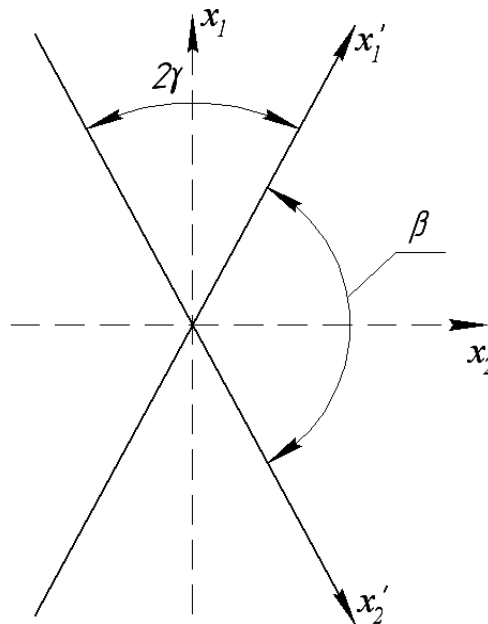


Рисунок 1.2 – Напрями осей армування в ортотропних КМ з неортогональним укладанням волокон

В останньому випадку площинами симетрії будуть серединна площина листа і дві площини, перпендикулярні до неї які проходять через бісектриси x_1 та x_2 кутів 2γ і β .

Доведено (теорією анізотропних середовищ), що шаруваті матеріали із зірковим укладанням волокон в суміжних шарах (рис. 1.3) мають ізотропні властивості в площині листа, якщо кут між напрямками волокон в суміжних шарах менше 72° . Матеріали, що мають площину ізотропії і перпендикулярну до неї вісь симетрії n -го порядку (віссю симетрії n -го порядку називають таку вісь, навколо якої достатньо обернути фігуру на кут $2\pi/n$, щоб отримати повне поєднання всіх точок

фігури з їх первинним положенням), називають *трансверсально ізотропними (транстропними)*. До таких матеріалів звичайно відносять і однонаправлені КМ. В цьому випадку площина ізотропії уз перпендикулярна до напрямку x укладання волокон (рис. 1.4).

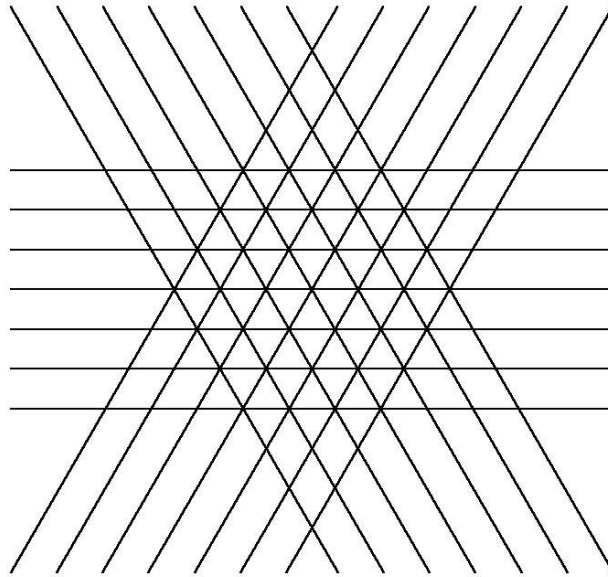


Рисунок 1.3 – Схема орієнтації арматури в шаруватих КМ із зірковим укладанням волокон в суміжних шарах

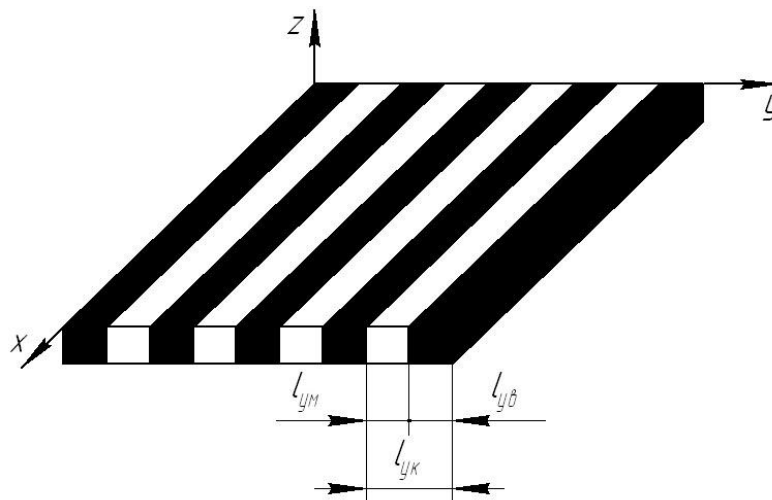


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення структури однонаправленого КМ (чорні області – волокна, білі – матриця)

Однонаправлені матеріали називають також матеріалами з орієнтацією волокон 1:0 (дріб показує відношення числа шарів волокон в поздовжньому і поперечному напрямках), двовимірноюармовані шаруваті КМ з взаємно перпендикулярним укладанням волокон позначають дробами 1:1, 1:2, 1:3, 3:4 і т. д. Шаруваті КМ із зірковим укладанням, волокна яких в суміжних шарах утворюють між собою кут 60° , називають матеріалами з укладанням 1:1:1. Тривимірноюармовані орієнтовані КМ одержують армуванням матриць волокнами в трьох взаємно перпендикулярних напрямках або об'ємними тканинами.

За способом отримання (технологічний принцип) полімерні КМ можна розділити на *ливарні, пресовані і намотувальні*. ПКМ з хаотичною структурою звичайно одержують литвом і пресуванням, а з орієнтованою – намотуванням і пресуванням. Металеві КМ за цим способом ділять на *ливарні і деформовні*.

Ливарні одержують, просочуючи арматуру розплавленим матричним сплавом або застосовуючи направлену кристалізацію сплавів евтектичного складу з виділенням зміцнювальної армувальної фази безпосередньо з розплаву (так званий метод *in situ* – в собі, на місці перебування). Для отримання деформовних МКМ застосовують спікання, гаряче пресування, дифузійне зварювання, гаряче штампування і кування на молотах, вибухове пресування, електролітичне, хімічне і парогазове осадження, плазмове і газополум'яне напилення та ін. Більшість з цих твердофазних методів, не враховуючи динамічні, застосовують і для отримання керамічних КМ.

За призначенням (експлуатаційний принцип) КМ можна розбити на матеріали *загальноконструкційного призначення* (для різного роду несучих конструкцій літаків, ракет, суден, автомобілів, двигунів, посудин високого тиску, предметів широкого споживання і т. д.), *жароміцні* (для лопаток турбін, камер згоряння та інших виробів, що працюють при підвищених температурах), *термостійкі* (для виробів, які експлуатуються в умовах різких тепломінів, наприклад, для облицьовування каналів МГД-генераторів), *фрикційні і антифрикційні* (підшипники ковзання, шестерні та ін.), *ударотривкі* (броня літаків, танків і т. п.), *теплозахисні*, а також *КМ зі спеціальними властивостями* (електричними, магнітними, ядерними, оптичними та ін.).

1.2 Вимоги, що висуваються до волокон і матриці

Вимоги до волокон. Ниткоподібна форма армувальних елементів має як позитивні, так і негативні сторони. Перевага їх полягає у високій міцності та можливості створити зміцнення тільки в тому напрямі, в якому це потрібно конструктивно, що забезпечує максимальне використання властивостей волокон. Недолік такої форми полягає в тому, що волокна здатні передавати навантаження тільки у напрямі своєї осі, тоді як в перпендикулярному напрямі зміцнення немає, а в деяких випадках може виявитися навіть знеміцнення.

Волокна, які використовують як арматуру, повинні мати такі властивості: високу температуру плавлення, малу густину, високу міцність у всьому інтервалі робочих температур, технологічність, мінімальну розчинність у матриці, високу хімічну стійкість, відсутність фазових перетворень в зоні робочих температур, відсутність токсичності при виготовленні і в експлуатації.

Для армування, в основному, застосовують три види волокон:

ниткоподібні кристали, металеві дроти і неорганічні полікристалічні волокна.

Ниткоподібні кристали („вуса”) розглядають як перспективний матеріал для армування металів, полімерів і кераміки. Надвисока міцність в широкому діапазоні температур при малій густині, хімічна інертність стосовно багатьох матричних матеріалів, висока жаростійкість і корозійна стійкість ниткоподібних кристалів оксидів алюмінію та магнію, карбїду кремнію, муллїта та інших робить їх незамінними армувальними елементами. На жаль, поки що на шляху їх практичного застосування є багато труднощів. Необхідно вирішити проблеми отримання їх в промисловому масштабі, відбору якісних вусів, орієнтації їх в матриці, методів формування композицій з вусами та ін.

Високоміцний *металевий дріт* із сталі, вольфраму, молібдену та інших металів менш перспективний, ніж вуса, через більшу густину і меншу міцність, проте, оскільки випускається він промисловістю у великих кількостях і має порівняно невисоку вартість, його широко використовують як арматуру, особливо для КМ на металевій основі.

Полікристалічні неорганічні волокна, як і металевий дріт, одержують у великих кількостях. Недолік цих волокон – дуже висока чутливість до механічних пошкоджень. Проте мала густина, висока міцність і хімічна стійкість вуглецевих, борних, скляних, карбїдокремнієвих, кварцових, цирконійових, алюмосилікатних та інших волокон дозволяють широко використовувати їх для армування пластмас і металів.

Якщо КМ конструюють для конкретного виробу, при виготовленні якого потрібно буде згинати волокна під радіусом R , то максимально допустимий діаметр волокна d_{max} розраховують за формулою, що враховує границю міцності σ_g і модуль нормальної пружності волокон E_g :

$$d_{max} = 2\sigma_g R / E_g.$$

Якщо діаметр волокон буде більше максимально допустимого, вони при вигині руйнуватимуться.

Вимоги до матриці. Матриця в армованих композиціях надає виробу форму і робить матеріал монолітним. Об'єднуючи в єдине ціле численні волокна, матриця повинна дозволяти композиції сприймати різного роду зовнішні навантаження – розтягування, стиснення, згин, зсув й ін. В той же час вона бере участь в створенні несучої здатності композиції, забезпечуючи передачу зусиль на волокна. За рахунок пластичності матриці зусилля від зруйнованих або дискретних (коротких) волокон передаються сусіднім волокнам, а концентрація напружень поблизу різного роду дефектів зменшується. Матриці відводиться і роль захисного покриття, що оберігає волокна від механічних пошкоджень і

окислення.

Крім того, матриця повинна забезпечувати міцність і жорсткість системи при дії розтягувального або стискального навантаження в напрямі, перпендикулярному до армувальних елементів. Якщо розтягувальне навантаження направлено по осі паралельних між собою волокон, то для отримання ефекту зміцнення граничне відносне видовження матриці як мінімум повинно бути рівним відносному видовженню волокон. Якщо ж навантаження перпендикулярне до осі волокон, то цього виявляється недостатньо. В цьому випадку навантаження на волокна передається тільки через матрицю, і чим більша концентрація волокон і відношення модулів пружності матеріалів волокна і матриці, тим більшою повинна бути гранична деформація матриці. Оціночні розрахунки, виконані на пружних моделях, показують, що для забезпечення монолітності КМ при поперечному навантаженні потрібні матриці, відносне видовження яких у декілька разів перевищує середню деформацію волокон.

Прагнення отримати максимальну міцність композиції викликає тенденцію до підвищення об'ємної частки V_v волокон. Проте якщо відносне видовження матриці мале, то у разі великих значень V_v монолітність КМ може порушитися навіть при невеликих навантаженнях. З'являються розшарування, тріщини. Запобігти цим негативним явищам при розтягуванні ортотропного матеріалу заданого складу можна за умови, що товщина δ прошарку матриці між волокнами, діаметр d_v і їх відносні видовження при розриві волокон ε_v і матриці ε_m зв'язані співвідношенням

$$\delta \geq d_v \sqrt{\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_v} - 1},$$

тобто, чим більша пластичність матриці, тим менше допускається товщина прошарку матриці між волокнами і тим більше волокон може бути введено в КМ.

1.3 Закон Гука для анізотропних тіл

Закон Гука встановлює зв'язок між пружними напруженнями σ , що діють на тіло, і деформаціями ε , викликаними цими напруженнями. Для одноосного розтягу або стиску ізотропного тіла, на яке діє тільки одна сила, закон Гука записується у вигляді

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (1.1)$$

Коефіцієнт пропорційності E називають модулем пружності при одноосному розтягу або модулем нормальної пружності, або модулем Юнга. Це константа ізотропного матеріалу, що характеризує його

жорсткість.

При одноосному розтягу матеріалу разом із збільшенням його довжини у напрямі дії сили (наприклад, по осі x) зменшуються поперечні розміри уздовж двох інших осей (y і z). Відношення відносних деформацій зразка в поперечному і поздовжньому напрямках називається коефіцієнтом Пуассона ν :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}. \quad (1.2)$$

За аналогією з розтягом зв'язок між дотичними напруженнями τ і відповідними пружними деформаціями зсуву γ можна записати співвідношенням

$$\tau = G\gamma, \quad (1.3)$$

де G – модуль пружності при зсуві (модуль зсуву).

При гідростатичному стиску ізотропних тіл закон Гука встановлює пряму пропорційність між гідростатичним тиском p і зміною об'єму $\chi = \frac{\Delta V}{V}$:

$$p = -K\chi, \quad (1.4)$$

де K – модуль об'ємної деформації.

Справедливий закон Гука тільки при порівняно малих величинах напружень і деформацій, коли ще немає незворотних пластичних деформацій і матеріал поводить себе як абсолютно пружне тіло.

Співвідношення (1.1) і (1.3) характеризують зв'язок між напруженням і деформацією в одному і тому ж напрямі. Але до тіла одночасно можуть бути прикладені напруження в двох або трьох взаємно перпендикулярних напрямках. В результаті мають справу відповідно з плоским і з об'ємним напруженими станами матеріалу.

Проте навіть під дією одноосного розтягу або стиску тіло деформується в трьох взаємно перпендикулярних напрямках x , y і z , тобто одноосний (лінійний) напружений стан приводить до виникнення тривісного, або об'ємного, деформованого стану. Можлива і така комбінація сил, при якій тіло буде знаходитися в плоскому або одноосному деформованому стані.

В загальному випадку зв'язок між напруженнями і деформаціями для ізотропного тіла встановлює узагальнений закон Гука, який в позначеннях, використовуваних в техніці (технічних позначеннях), має

такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]; \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy}; \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G}\tau_{yz}; \\ \gamma_{xz} &= \frac{1}{G}\tau_{xz}; \end{aligned} \right\}, \quad (1.5)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальні напруження в трьох взаємно перпендикулярних напрямках x, y і z ;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – відносні деформації у напрямі відповідних осей координат (осьові деформації);

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – дотичні напруження;

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ – кутові (зсувові) деформації.

Пружні константи E, G, ν і K зв'язані між собою співвідношеннями

$$\left. \begin{aligned} E &= 2G(1 + \nu); \\ K &= 3G(1 - 2\nu). \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Тому тільки дві з чотирьох констант незалежні; дві інші можна обчислити співвідношенням (1.6) за цими двома відомими. Іншими словами, щоб отримати повну інформацію про співвідношення між напруженим і деформованим станами пружного ізотропного тіла, достатньо знати дві його пружні константи.

Для анізотропних тіл закон Гука встановлює пропорційність між кожним компонентом тензора деформацій і всіма шістьма компонентами тензора напружень (тензором називають сукупність математичних величин, що перетворюються при повороті осей координат за певними лінійними законами і які мають ряд властивостей, загальних для цих величин).

Напружений стан в будь-якій точці навантаженого тіла характеризується дев'ятьма величинами, що утворюють тензор напружень, який записують у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{ccc} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{array} \right\}. \quad (1.7)$$

Тут три компоненти (σ_x , σ_y , σ_z) позначають нормальні напруження, інші шість – дотичні. Часто нормальні і дотичні напруження позначають однією буквою σ_{ik} і розрізняють їх за індексами: компоненти з двома однаковими індексами (σ_{11} , σ_{22} , σ_{33}) відповідають нормальним, а з різними індексами – дотичним напруженням. В цьому випадку говорять, що тензор напружень записаний в нумерованих осях 1; 2; 3:

$$\left\{ \begin{array}{ccc} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{array} \right\}. \quad (1.8)$$

З дев'яти компонентів тензора напружень тільки шість незалежні; компоненти, симетричні щодо головної діагоналі тензора $\sigma_{11} - \sigma_{33}$, рівні між собою, тобто $\sigma_{12} = \sigma_{21}$; $\sigma_{13} = \sigma_{31}$; $\sigma_{23} = \sigma_{32}$.

Деформований стан в точці описується за допомогою тензора деформацій, який в технічних позначеннях має вигляд

$$\left\{ \begin{array}{ccc} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{array} \right\}, \quad (1.9)$$

а в нумерованих осях записується так:

$$\left\{ \begin{array}{ccc} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{array} \right\}. \quad (1.10)$$

У виразі (1.9) компоненти ε_x , ε_y і ε_z – лінійні, а інші шість компонентів описують деформації зсуву. При цьому

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx}; \quad \gamma_{xz} = \gamma_{zx}; \quad \gamma_{yz} = \gamma_{zy}. \quad (1.11)$$

В рівнянні (1.10) відповідно

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21}; \quad \varepsilon_{13} = \varepsilon_{31}; \quad \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32}. \quad (1.12)$$

В літературі використовують три форми запису закону Гука для анізотропних середовищ – тензорну, матричну та технічну.

В скороченій тензорній формі закон Гука можна подати так:

$$\varepsilon_{ik} = c_{iklm} \sigma_{lm}. \quad (1.13)$$

Тут індекси i, k, l, m приймають послідовно значення 1; 2 і 3; ε_{ik} позначає відносну лінійну деформацію при $i=k$ і кутову при $i \neq k$ ($\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ – лінійні деформації, відповідні деформаціям $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ і ε_z уздовж осей x, y і z ; $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21}$; $\varepsilon_{13} = \varepsilon_{31}$; $\varepsilon_{23} = \varepsilon_{32}$ – кутові деформації, відповідні деформаціям $1/2 \gamma_{xy}, 1/2 \gamma_{xz}$ і $1/2 \gamma_{yz}$); σ_{lm} – нормальні напруження при $l=m$ і дотичні при $l \neq m$ (наприклад, при $l=1, m=1$ σ_{11} позначає нормальне напруження, що діє вздовж осі x , при $l=2, m=2$ σ_{22} позначає те ж у напрямі осі y ; при $l=1, m=2$ σ_{12} позначає дотичне напруження, відповідне τ_{xy}); c_{iklm} – коефіцієнти пружності анізотропного тіла, які створюють тензор четвертого рангу.

Запис (1.13) припускає, що для отримання значень ε_{ik} слід підсумувати добутки $c_{iklm} \sigma_{lm}$ за індексами, що зустрічаються двічі, тобто за індексами l і m . Знак підсумовування при цьому опускається. Запис (1.13) відповідає нижченаведеному запису з використанням знаків підсумовування:

$$\varepsilon_{ik} = \sum_{l=1}^{\ell=3} \sum_{m=1}^{m=3} c_{iklm} \sigma_{lm}. \quad (1.14)$$

Якщо хочуть детально розписати вираз для відносного подовження у напрямі осі x , приймають $i=k=1$. Тоді

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} = & c_{1111} \sigma_{11} + c_{1112} \sigma_{12} + c_{1113} \sigma_{13} + c_{1121} \sigma_{21} + c_{1122} \sigma_{22} + \\ & + c_{1123} \sigma_{23} + c_{1131} \sigma_{31} + c_{1132} \sigma_{32} + c_{1133} \sigma_{33}. \end{aligned}$$

Вираз для кутової деформації в площині xu виходить з рівняння (1.13), якщо покласти $i=1, k=2$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{12} = & c_{1211} \sigma_{11} + c_{1212} \sigma_{12} + c_{1213} \sigma_{13} + c_{1221} \sigma_{21} + c_{1222} \sigma_{22} + \\ & c_{1223} \sigma_{23} + c_{1231} \sigma_{31} + c_{1232} \sigma_{32} + c_{1233} \sigma_{33}. \end{aligned}$$

Тензорний запис (1.13) вимагає для обчислення всіх деформацій знати 81 коефіцієнт c_{iklm} . Але насправді, як доводить теорія пружності, з 81 коефіцієнта незалежними і відмінними від нуля можуть бути тільки 21. Так, щоб визначити всі компоненти тензора деформацій, в загальному випадку анізотропного тіла потрібно знати 21 коефіцієнт пружності.

Вираз (1.13) встановлює залежність пружних деформацій ε_{ik} від напружень σ_{lm} . Справедливо і обернене співвідношення, записане в тензорній формі:

$$\sigma_{ik} = a_{iklm}\varepsilon_{lm}, \quad (1.15)$$

яке встановлює залежність напружень від деформацій. Правила підсумовування тут такі ж, як і у формулі (1.13).

Тензорний запис зручний для обчислення пружних коефіцієнтів анізотропних матеріалів в напрямках, які не збігаються з головними осями симетрії, оскільки такий запис дозволяє використовувати правила тензорного числення при повороті координатних осей. Його доцільно застосовувати, коли розглядається плоский або об'ємний напружений стан анізотропного тіла з низькою симетрією.

В загальному випадку анізотропного матеріалу пружні сталі, які створюють тензор четвертого рангу, для довільно орієнтованих напрямів можна розрахувати відповідно до правил перетворення тензорних величин при повороті осей координат за такою формулою:

$$c_{i'k'l'm'} = c_{iklm}C_{i'i}C_{k'k}C_{l'l}C_{m'm}. \quad (1.16)$$

Тут буквами C з двома індексами позначені напрямні косинуси кутів між новою і старою системами прямокутних координат (табл. 1.1). Перший індекс відповідає номеру нової осі, а другий – номеру старої. Першою вважається вісь x , другою – y і третьою – z . Наприклад, C_{11} – це косинус кута між новою віссю x' і старою x , C_{12} – між новою віссю x' і старою y . C_{32} – між новою віссю z' і старою y і т. п. Кути між позитивними напрямками осей можуть змінюватися від 0 до 180° , тому кожне значення C однозначно визначає кут.

Таблиця 1.1 – Напрямні косинуси

	x	y	z
x'	C_{11}	C_{12}	C_{13}
y'	C_{21}	C_{22}	C_{23}
z'	C_{31}	C_{32}	C_{33}

Формула (1.16) – скорочений тензорний запис. Вона припускає підсумовування за всіма індексами, що двічі зустрічаються в правій частині. Індеси послідовно пробігають значення 1; 2 і 3.

Разом з тензорним записом закону Гука застосовується матрична форма запису:

$$\sigma_m = a_{mn}\varepsilon_n \quad (1.17)$$

$$\varepsilon_m = c_{mn} \sigma_n. \quad (1.18)$$

Від тензорного запису можна перейти до матричного, якщо два індекси об'єднати в один, який пробігає значення 1, ..., 6. Схема заміни індексів така:

тензорні позначення – 11; 22; 33; 23,32; 31,13; 12,21

матричні позначення – 1; 2; 3; 4; 5; 6.

Матричний запис (1.18), наприклад, детально можна розписати так:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= c_{11}\sigma_1 + c_{12}\sigma_2 + c_{13}\sigma_3 + c_{14}\sigma_4 + c_{15}\sigma_5 + c_{16}\sigma_6; \\ \varepsilon_2 &= c_{21}\sigma_1 + c_{22}\sigma_2 + c_{23}\sigma_3 + c_{24}\sigma_4 + c_{25}\sigma_5 + c_{26}\sigma_6; \\ \varepsilon_3 &= c_{31}\sigma_1 + c_{32}\sigma_2 + c_{33}\sigma_3 + c_{34}\sigma_4 + c_{35}\sigma_5 + c_{36}\sigma_6; \\ \varepsilon_4 &= c_{41}\sigma_1 + c_{42}\sigma_2 + c_{43}\sigma_3 + c_{44}\sigma_4 + c_{45}\sigma_5 + c_{46}\sigma_6; \\ \varepsilon_5 &= c_{51}\sigma_1 + c_{52}\sigma_2 + c_{53}\sigma_3 + c_{54}\sigma_4 + c_{55}\sigma_5 + c_{56}\sigma_6; \\ \varepsilon_6 &= c_{61}\sigma_1 + c_{62}\sigma_2 + c_{63}\sigma_3 + c_{64}\sigma_4 + c_{65}\sigma_5 + c_{66}\sigma_6 \end{aligned} \right\}. \quad (1.19)$$

При заміні тензорних позначень на матричні коефіцієнти a_{iklm} переходять в a_{mn} $\sigma_{ik} - \sigma_m$; перехід від ε_{ik} до ε_m виконується за правилом

$$\varepsilon_{ik} = \varepsilon_m, \text{ якщо } m=1; 2 \text{ або } 3;$$

$$2\varepsilon_{ik} = \varepsilon_m, \text{ якщо } m=4; 5 \text{ або } 6;$$

при переході від c_{iklm} до c_{mn} вводяться множники:

$$c_{iklm} = c_{mn}, \text{ якщо } m \text{ і } n \text{ рівні } 1; 2 \text{ або } 3;$$

$$c_{iklm} = 1/2c_{mn}, \text{ якщо } m \text{ або } n \text{ рівно } 4; 5 \text{ або } 6;$$

$$c_{iklm} = 1/4c_{mn}, \text{ якщо } m \text{ і } n \text{ рівні } 4; 5 \text{ або } 6.$$

З 36 коефіцієнтів, що входять в запис (1.19), коефіцієнти $c_{mn}=c_{nm}$, і фактично достатньо 21 коефіцієнта для отримання повної інформації про поведінку анізотропною тіла в межах пружності.

Технічна форма запису закону Гука використовує технічні постійні пружності – модулі Юнга, зсуву, об'ємного стиску і коефіцієнти Пуассона. Звичайно її застосовують, описуючи пружну поведінку анізотропних тіл з достатньо високою симетрією.

Наприклад, для ортотропного матеріалу закон Гука в технічних позначеннях можна записати так:

$$\left. \begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yx}}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zx}}{E_z} \sigma_z; \\
\varepsilon_y &= -\frac{\nu_{xy}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zy}}{E_z} \sigma_z; \\
\varepsilon_z &= -\frac{\nu_{xz}}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yz}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z; \\
\gamma_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy}; \\
\gamma_{yz} &= \frac{1}{G_{yz}} \tau_{yz}; \\
\gamma_{xz} &= \frac{1}{G_{xz}} \tau_{xz}.
\end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

Тут і надалі прийняті позначення:

E – модулі нормальної пружності при розтягуванні або стисненні у напрямі осі, вказаної в індексі;

G – модулі зсуву при дії дотичних напружень по площинах, вказаних в індексах;

ν – коефіцієнти поперечної деформації (коефіцієнти Пуассона) у напрямі першої з осей, вказаних в індексі, при дії нормальних напружень у напрямі другої осі.

З 12 пружних коефіцієнтів, що входять у вирази (1.20), 9 незалежні. Зазвичай за незалежні константи вибирають 3 модулі пружності – E_x , E_y , E_z , 3 модулі зсуву – G_{xy} , G_{xz} і G_{yz} і 3 коефіцієнти Пуассона – ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{zx} . Решта 3 коефіцієнта Пуассона розраховують із співвідношень

$$E_x \nu_{xy} = E_y \nu_{yx}; \quad E_x \nu_{xz} = E_z \nu_{zx}; \quad E_y \nu_{yz} = E_z \nu_{zy}. \quad (1.21)$$

Пружні постійні c_{iklm} ортотропного тіла пов'язані з технічними модулями пружності такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
c_{1111} &= \frac{1}{E_x}; \quad c_{1212} = \frac{1}{4} G_{xy}; \quad c_{1122} = -\frac{\nu_{xy}}{E_x} = -\frac{\nu_{yx}}{E_y}; \\
c_{2222} &= \frac{1}{E_y}; \quad c_{2323} = \frac{1}{4} G_{yz}; \quad c_{2233} = -\frac{\nu_{yz}}{E_y} = -\frac{\nu_{zy}}{E_z}; \\
c_{3333} &= \frac{1}{E_z}; \quad c_{3131} = \frac{1}{4} G_{zx}; \quad c_{3311} = -\frac{\nu_{zx}}{E_z} = -\frac{\nu_{xx}}{E_x}.
\end{aligned}$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Карпинос Д. М. Новые композиционные материалы / Карпинос Д. М., Тучинский Л. И., Вишняков Л. Р. – К. : Вища школа, 1977. – 312 с.
2. Основы механики и технологии композиционных материалов : учебн. пос. / [Фрегер Г. Е., Аптекарь М. Д., Игнатъев Б. Б. и др.]. – К. : Аристей, 2004. – 524 с.
3. Шевченко В. Г. Основы физики полимерных композиционных материалов / Шевченко В. Г. – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2010. – 98 с.
4. Anke Krueger, Ed. *Carbon Materials and Nanotechnology*. 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
5. Gate-controlled guiding of electrons in graphene / J. R. Williams, Tony Low, M. S. Lundstrom & C. M. Marcus / *Nature Nanotechnology* 6, 222–225 (2011) doi:10.1038/nnano.2011.3
6. S. Mouras et al. Synthesis of first stage graphite intercalation compounds with fluorides // *Revue de chimie minerale* (1987). ISSN 0035-1032. – V. 24. – № 5. – P. 572–582.
7. A. K. Geim i K. S. Novoselov / The rise of graphene в *Nature Materials*
8. K. S. Novoselov, A. K. Geim et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films в *Science*
9. Anke Krueger, Ed. *Carbon Materials and Nanotechnology*. 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
10. Саранчук В. И. Углерод: неизвестное об известном / Саранчу В. И. и др. – Донецк : УК Центр, 2006.
11. Ефремкин А. Ф. Структурные особенности диенстирольных термоэластопластов, модифицированных мономерами / А. Ф. Ефремкин, В. Б. Иванов, А. П. Романюк, В. В. Шибанов // *Ж. ВМС. А.* – 1990. – Т. 32. – № 9. – С. 1995–2001.
12. Иванов В. Б. Кинетика полимеризации в диенстирольных блок-сополимерах / В. Б. Иванов, А. П. Романюк, В. В. Шибанов // *Ж. ВМС.* – 1993. – Т. 35. – №2. – С. 119–124.
13. Ван-Чин-Сян Ю. Я. Дослідження пошарової полімеризації трикомпонентних систем на основі термоеластопласту / Ю. Я. Ван-Чин-Сян, О. П. Романюк // *Вісник НУ «Львівська політехніка»* – № 426. – Львів. – 2001. – С. 24–28.
14. Мала гірнича енциклопедія. В 3-х т. ; За ред. В. С. Білецького. – Донецьк : «Донбас», 2004. — ISBN 966-7804-14-3.
15. Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes / Darren J. Lipomi, Michael Vosgueritchian, Benjamin C-K. Tee, Sondra L. Hellstrom, Jennifer A. Lee, Courtney H. Fox & Zhenan Bao / *Nature Nanotechnology* 6, 788–792 (2011)

doi:10.1038/nnano.2011.184

16. Highly conductive, printable and stretchable composite films of carbon nanotubes and silver / Kyoung-Yong Chun, Youngseok Oh, Jonghyun Rho, Jong-Hyun Ahn, Young-Jin Kim, Hyouk Ryeol Choi & Seunghyun Baik / *Nature Nanotechnology* 5, 853–857 (2010) doi:10.1038/nnano.2010.232 / Received 09 July 2010 Accepted 25 October 2010 Published online 28 November 2010
17. Flexible solid state lithium batteries based on graphene inks / Di Wei, Piers Andrew, Huafeng Yang, Yuanyuan Jiang, Fenghua Li, Changsheng Shan, Weidong Ruan, Dongxue Han, Li Niu, Chris Bower, Tapani Ryhanen, Markku Rouvala, Gehan A. J. Amaratunga and Ari Ivaska / *J. Mater. Chem.*, 2011, 21, 9762-9767 / DOI: 10.1039/C1JM10826C
18. Ultralight Metallic Microlattices / T. A. Schaedler^{1,*}, A. J. Jacobsen¹, A. Torrents², A. E. Sorensen¹, J. Lian³, J. R. Greer³, L. Valdevit², W. B. Carter¹ / *Science* 18 November 2011: Vol. 334 no. 6058 pp. 962-965 / DOI: 10.1126/science.1211649
19. Бейгельзимер Я. Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / [Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков]. – Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.

Навчальне видання

**Буренніков Юрій Анатолійович
Сивак Іван Онуфрійович
Сухоруков Сергій Іванович**

**НОВІ МАТЕРІАЛИ
ТА КОМПОЗИТИ**

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет підготовлено С. Сухоруковим

Підписано до друку 25.02.2013 р.
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 10,1.
Наклад 300 (1-й запуск – 100) прим. Зам. № 2013-050.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.