

## НЕОРГАНІЧНІ ВОЛОКНА

УДК 620.178.1.002.237;678.5.029.6:669

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, М.Б. Складанюк

### Властивості вуглецевих волокон (огляд)

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна*

Приведена класифікація вуглецевих волокон та наведені результати технологічного виготовлення вуглецевих матеріалів. Наводяться різні властивості вуглецевих волокон: механічні, електрофізичні, радіаційні, поверхневі та антифрикційні.

**Ключові слова:** вуглецеві волокна, електрофізичні властивості, радіаційні характеристики, трибологічні властивості.

H.O. Sirenko, L.M. Soltys, M.B. Skladanyuk

### Properties of Carbon Fibers (Review)

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,  
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine*

The classification of carbon fibers is described when for results has been carried on fabric, characteristics and technological fabrication of carbon materials. The description of mechanical, thermophysical, surface-active, fatigue-resistant, thermochemical, thermostable, electrophysical, radiation-resistant, antifriction-resistant and different specific characteristics of carbon fibers are studied.

**Key words:** carbon fibers, electrophysical properties, radiation characteristics, tribological properties.

*Стаття постуила до редакції 15.05.2015; прийнята до друку 15.09.2015.*

## Вступ

Вуглецеві волокна у науковій літературі часто називають «графітовими», «карбовими», «вугільними», «вуглецевими». Терміни «вуглецеві волокна» (ВВ) і «вуглецевий волокнистий матеріал» (ВВМ) є науково і технічно коректними та надалі будуть використовуватися у статті.

Відносно композиційних матеріалів на основі вуглецевих волокон і ВВМ будемо дотримуватися загально визнаного узагальненого терміна «карбопластик». Цим же терміном позначимо матеріали з хаотичним розміщенням коротких волокон у шарі і в просторі та у вуглецевому папері. Терміном «карбоволокнит» позначимо матеріали з односпрямованими волокнами, які одержані пресуванням або методом навивки. Терміном «карботекстоліт» позначимо матеріали на основі вуглецевої тканини та вуглецевих лент, бинт і стрічок.

## I. Класифікація вуглецевих волокнистих матеріалів і вуглецевих волокон

До цього часу класифікація ВВМ не розроблена. На підставі літературних даних [4-6, 16, 19, 21, 23-33, 32-34, 36, 42, 57-58, 61, 62] будемо розрізняти ВВМ та ВВ за такими ознаками: вихідною органічною відповідних волокон речовиною, текстильною формою, призначенням, формою поперечного перерізу, вмістом карбону, кінцевою температурою термообробки  $T_k$  (ТТО), фізико-механічними властивостями.

**1. За вихідною органічною речовиною.** ВВМ виготовляють піролітичним перетворенням хімічних і природних волокон та волокон, які отримані з лігніну, кам'яновугільної смоли, нафтового пеку, фенольної смоли, циклізованих полібутадієнів та інших речовин [32-34]. Частіше використовують

ВВ та ВВМ, які виготовлені на основі волокон із гідратцелюлози (ГЦ), поліакрілонітрилу (ПАН), кополімерів поліакрілонітрилу і гідратцелюлози (КПАН) та нафтового пеку (НП).

**2. За текстильною формою.** ВВМ виготовляють різної текстильної форми: волокна, трикотаж, лента, бинта, стрічка, шнури, тасьма, фетр, папір, пряжа, повсть, тканина, рівниця, сітка, картон, мата тощо [16, 36, 57]. Діаметр індивідуальних ВВ у ВВМ коливається від 4 до 25 мкм, з довжиною від 2-6 мм до кількох метрів або безкінечної довжини, з густиною від 1250 до 2200 кг/м<sup>3</sup>.

**3. За призначенням.** Виходячи з механічних і спеціальних властивостей, ВМ класифікують за призначенням на: конструкційні (загального призначення і для армування пластмас), теплозахисні, електрофізичні, сорбційноактивні, текстильні тощо [62]. Для антифрикційних цілей ВВМ спеціально не виготовляються.

**4. За формою поперечного перерізу.** Кругла і бобовидна форми поперечного перерізу характерні для ВВ на основі ПАН та КПАН, а покряяна форма – на основі ГЦ [6, 23, 42]. Особливим видом ВВ є шарувата неоднорідна за перерізом форма. Гомогенна шаруватість ВВ утворюється внаслідок перетворень у структурі вихідних волокон під час термо-технологічного процесу. Такі ВВ мають більш-менш густий та орієнтований поверхневий шар і відносно пухкий і неорієнтований стрижень. До гетерогенних шаруватих ВВ відносять волокна, на поверхню яких нанесено шари з матеріалів, що за хімічним складом та властивостями відрізняються від матеріалу основи, наприклад піровуглець, пірографіт, карбіди Zr, W, Si, сульфід, селенід, телуриди Mo, W, Pb, або метали Cu, Ni, Fe, Pb, Au, Ag тощо.

**5. За вмістом карбону.** За вмістом карбону ВВМ розділяють на матеріали типу 1, які містять 54-90 % карбону, типу 2 – 90-98 %, типу 3 – більш, як 98 % [62]. Вуглецеві тканини з низькомодульними ВВ містять 54-99,9 % вуглецю, 0,1-28 % золи (залишки неорганічних сполук), 0-4,5 % водню, 0-35 % кисню, 0-3,1 % нітрогену, 0,05-12 % волюги [5, 16, 19, 57].

**6. За температурою кінцевої термообробки** ( $T_k$ ) вуглецеві волокнисті матеріали класифікують таким чином: частинно карбонізовані (ЧКВ) ( $T_k=473-873$  К), які містять до 65 % карбону; карбонізовані (КВ) ( $T_k=1023-1973$  К), які містять до 98 % карбону; квазіграфітовані (КГВ) ( $T_k=2073-2173$  К), які містять до 98,5 % карбону; графітовані (ГВ) ( $T_k=2173-3473$  К), які містять до 99,9 % карбону [6, 19, 32, 61]. Час проведення карбонізації, квазіграфітації та графітації коливається від декількох секунд до 2,5 год. [4, 6]. Температура кінцевої термообробки впливає на утворення структури вуглецевого волокна. Температурною межею карбонізованих і графітованих матеріалів прийнято вважати 2073-2173 К, виходячи з того, що за цих температур спостерігаються перші ознаки квазіграфітації:

структура вуглецевого волокна наближається до тривимірного упорядкування – турбостратної (двовимірної) структури високого ступеня упорядкування та мікрофібрилярності порівняно з карбонізованими волокнами з турбостратною структурою відносно низького ступеня упорядкування. Відповідно  $T_k$  впливає на утворення оксигенвмісних та інших комплексів сполук як на поверхні, так і у міжшарових структурах.

**7. За механічними властивостями** ВВ будемо класифікувати таким чином:

**1) за показником міцності** ВВ підрозділяються на *низькоміцні* (ЛТ) (міцність волокна під час розтягування  $\sigma_B < 0,6$  ГПа; модуль пружності волокна  $E_B=4-60$  ГПа); *середньої міцності* (МТ) ( $\sigma_B=0,6-1,5$  ГПа;  $E_B=30-240$  ГПа); *високміцні* (НТ) ( $\sigma_B > 2,35$  ГПа;  $E_B=190-280$  ГПа);

**2) за показником пружності** ВВ підрозділяються на *низькопружні* (ЛМ) ( $\sigma_B=0,2-1,2$  ГПа;  $E_B=20-140$  ГПа) та особливо *міцні високопружні* (НТ-НМ), які у свою чергу підрозділяються на *високмодульні* (НМ) – типу I ( $\sigma_B = 1,2-2,5$  ГПа;  $E_B = 300-850$  ГПа); *помірно пружні* (НМ) типу А ( $\sigma_B=2-3,5$  ГПа;  $E_B = 200-300$  ГПа); *високміцні* (НТ) типу II ( $\sigma_B = 2,35-6,95$  ГПа;  $E_B = 190-280$  ГПа); *високпружні, високміцні* (НМНТ) – типу III ( $\sigma_B \geq 2,35$  ГПа;  $E_B \geq 300$  ГПа).

## II. Властивості вуглецевих волокнистих матеріалів

Сучасні уявлення про структуру і властивості ВВМ і ВВ узагальнені у роботах М.Т. Азарової, Л. Браутмана, В.Я. Варшавського, Й. Ватанабе, Г.М. Гуняєва, Т. Ісікави, Л.І. Кальніна, Г.С. Каца, Е.Г. Кендала, Л.П. Кобца, А.А. Конкіна, Б.І. Молчанова, А. Нісімури, К.Е. Перепьолкіна, І. Розельмана, Н. Сібати, С. Сінамури, Г.О. Сіренка, Ю.М. Тарнапольського, Д. Тейбора, Е. Тіканісі, Х. Тіранісі, Д.Л. Шмідта, С.В. Шулепова та ін. [4-6, 16, 19, 21-30, 33, 34, 36, 42, 54-62]. Перевага фізико-механічних, теплофізичних, хімічних, електрофізичних та інших властивостей ВВ над скляними, арамідними, оксалонітними, аримідними, металевими, борними та іншими волокнами показана в роботах [4-6, 16, 19, 21, 25-30, 32, 34, 36, 42, 54-58, 61, 62].

**1. Механічні властивості.** Міцність ВВ типу НТ і НМ у 200-250 разів, а модуль пружності у 20-100 разів, перевищує відповідні показники блокового графіту. Серед жаростійких волокон ВВ мають найнижчу густину. Густина вуглецевих тканин коливається від 1400 до 1850 кг/м<sup>3</sup>, розривне навантаження – від 10 до 700 Н/см (по основи) і від 5 до 600 Н/см (по підтканню) [4, 5, 16, 33, 57]. Густина ВВ коливається від 1250 до 2200 кг/м<sup>3</sup> [4, 5, 36, 42, 56, 63]. Серед різних волокон ВВ мають найвижчу питому міцність (125-350 км), яку можна порівняти хіба що з питомою міцністю борних і скляних волокон, і максимальний питомий модуль пружності (150-450 км).

Гранична міцність скляних волокон досягається за 5 %-вої деформації, у той же час для ВВ ця властивість реалізується за 0,3-1,5 %-вої деформації [16]. Крім того, більшість високоміцних і високомодульних вуглецевих волокон не мають антифрикційних властивостей і чутливі до тертя та зношування.

Незважаючи на високу міцність під час розтягування, ВВ мають низьку міцність під час стиску [26]. У високомодульних вуглецевих волокнах під час стиску спостерігається розтріскування вздовж волокон, але це явище відсутнє у середньо- і низькомодульних ВВ [5]. Єдиним шляхом підвищення міцності під час стиску ВВ є збільшення діаметру волокон від 4-12 мкм до 15-25 мкм, але при діаметрі, більшому за 10-15 мкм, міцність під час розтягування різко знижується.

Відносна подовженість ВВ під час розтягування знаходиться в межах 0,3-8 % (меншим температурам кінцевої термообробки відповідає більша подовженість). ВВ мають велику радіальну і осьову гетерогенність і дуже чутливі до різного роду поверхневих і об'ємних дефектів, що відбивається на високих значеннях коефіцієнтів варіації механічних показників у жмуті, площі поперечного перерізу та довжині волокон. Ця гетерогенність пов'язана з неоднорідністю вихідних органічних волокон і додатково збільшується під час їх термообробки [28]. Властивості ВВ багато в чому залежать від коливання параметрів технологічного процесу і відрізняються для різних партій однієї марки як за середнім показником, так і за дисперсією [6, 33]. Розподіл міцності ВВ підпорядковується ймовірним законам Вейбулла і Гавса. Розподіл модуля пружності ВВ підпорядковується нормальному закону [5].

Міцність ВВ типу НМ і НТ різних марок коливається в межах від  $2,25 \pm 0,12$  до  $3,05 \pm 0,35$  ГПа, а модуль пружності – від  $210 \pm 15$  до  $415 \pm 35$  ГПа [7, 33]. Коливання механічних властивостей різних марок ВВ, які визначаються за однією методикою, знаходяться в межах від  $1,56 \pm 0,64$  до  $3,24 \pm 0,94$  ГПа (для міцності); від  $204 \pm 53$  до  $585 \pm 140$  ГПа (для модуля пружності); від  $0,36 \pm 0,12$  до  $1,4 \pm 0,2$  % (для відносного подовження під час розриву); від  $21,9 \pm 4,19$  до  $62,1 \pm 23,9$  мкм<sup>2</sup> (для площі поперечного перерізу) [63]. Коефіцієнти варіації міцності однієї партії ВВ знаходяться в межах 12-53 %, модуля пружності – 8-30 %, відносного подовження під час розриву – 14-39 %, площі поперечного перерізу – 9-40 % [6, 16, 23-27, 42].

Міцність і модуль пружності ВВ залежить від довжини і площі поперечного перерізу [23, 25]. Під час збільшення довжини ВВ від 5 до 50 мкм міцність зменшується на 33 %, від 5 до 100 мкм – на 50 % [28]. При зміні площі поперечного перерізу ВВ від 15-20 до 150-200 мкм<sup>2</sup> міцність зменшується від 4,5-4,9 до 0,6 ГПа, а модуль пружності – від 480 до 100 ГПа.

Методи механічних випробувань ВВ ще не відпрацьовані достатньою мірою і тому властивості тонких і крихких матеріалів, якими є ВВ, залежать від способу отримання зразків. Як правило, дослідження міцності ВВ проводять на базі 10 мм, але при зміні довжини ВВ від 1 до 70 мм міцність зменшується від  $3,89 \pm 1,2$  до  $1,86 \pm 0,69$  ГПа за коефіцієнтами варіацій від 26,3 до 39,1 % [42]. Враховуючи, що під час ковзання полімерних матеріалів деформується і зношується шар менший 100-200 мкм, то необхідно знати величини міцності і модуля пружності ВВ для бази, яка в першому наближенні дорівнює ефективній довжині волокна (10-20 величини середнього діаметру волокна, який дорівнює 4-12,5 мкм, тобто ефективна довжина волокна дорівнює 40-250 мкм). Екстраполяцією кривою:

$$\sigma_B = \exp[\psi(l)], \quad (1)$$

до  $l \rightarrow 0$  знайдено, що міцність ВВ дорівнює 7 ГПа [28]. У лабораторних умовах отримані ВВ із середньою міцністю 6,9 ГПа [7, 33], а при легуванні 0,2-0,3 % бору отримали ВВ з середнім 900 ГПа і максимальним 1070 ГПа модулем пружності [4].

Теоретичне значення міцності гексагональної гратки графіту дорівнює 120-135 ГПа, а модуля пружності – 943-1020 ГПа [36]. Гранично досяжна міцність такої шаруватої структури дорівнює 99-115 ГПа [36]. За даними [28], гранично досяжна міцність ВВ дорівнює  $22,47 \pm 1,47$  ГПа. Для монокристалів графіту отримані значення міцності 20-24,5 ГПа і модуля пружності 570-1000 ГПа [6, 36, 42].

Таким чином, якщо для ВВ практично досягнуто теоретичне значення модуля пружності, то значення міцності досягнуто тільки на 30 % гранично досяжної та 6-16 % теоретичних величин. У той же час для волокон іншої природи ці показники вже досягли теоретичного значення.

В односпрямованих карбопластиках більшою мірою реалізуються міцнісні (95%) і пружні (92%) властивості ВВ типу НТ, ніж типу НМ (40-70 % міцнісних і 94 % пружних властивостей) [16]. У [42] показано, що між міцностями (на базі 10 мм) ВВ і односпрямованим карбопластиком з цим же волокном, а також між відповідними коефіцієнтами варіації міцностей, кореляційний зв'язок слабкий [41]. Міцність композиту визначається квантилем розподілу міцності волокон, екстрапольованого на неефективну довжину [42]. Коефіцієнт Пуассона для ВВ дорівнює 0,25 [6, 33].

Пошук кореляційних зв'язків механічних властивостей композиту і армуючих вуглецевих волокон привело до таких висновків:

1. Спостерігається лінійна залежність міцності і пружних властивостей однонаправлених карбоволоконитів на основі епоксидного полімеру від властивостей армуючих вуглецевих волокон (табл. 1): а) із збільшенням міцності ( $\sigma_B$ ) і модуля пружності ( $E_B$ ) вуглецевих волокон збільшуються міцності

під час розтягування ( $\sigma_{рк}$ ), стиску ( $\sigma_{ск}$ ), згину ( $\sigma_{зк}$ ) і міжшарового зсуву ( $\tau_k$ ) та модулі пружності під час розтягування ( $E_{рк}$ ), стиску ( $E_{ск}$ ) і згину ( $E_{зк}$ ) композиту; б) із збільшенням модуля пружності ВВ ( $E_B$ ) зменшується міцність під час міжшарового зсуву композиту ( $\tau_k$ ), що пов'язано з поверхневими властивостями ВВ і їх адгезією до епоксидної полімерної матриці; в) між пружними властивостями ВВ і композиту існує більш тісний лінійний зв'язок, ніж між міцнісними властивостями (табл. 1).

2. Як правило, висока міцність і модуль пружності ВВ у композиті на основі ПТФЕ не реалізується. Для ПТФЕ-карбоволокнитів не знайдено надійного лінійного кореляційного зв'язку між фізико-механічними властивостями вуглецевих волокон і композитів (рис. 1 а). Але, разом з тим, можна зауважити, що із збільшенням модуля пружності ВВ, які термооброблені за  $T_k=1123-2773$  К і мають міцність під час розтягування  $\sigma_B=1,2-2,9$  ГПа

та модуль пружності під час розтягування  $E_B=185-385$  ГПа, модуль пружності під час згину композитів на їх основі знижується.

3. А із збільшенням міцності ВВ, які термооброблені за  $T_k=1773-2273$  К, міцність під час згину ПТФЕ-композитів зростає.

4. Більш тісний зв'язок існує між кінцевою температурою термообробки вуглецевих волокон і фізико-механічними властивостями композиту: модуль і міцність ПТФЕ-карбопластика під час згину знижується із збільшенням  $T_k$  волокна (рис. 1 б). Це пояснюється тим, що для вуглецевих волокон типу НТ реалізується більш сильний адгезійний зв'язок між поверхнею волокна і матрицею, ніж для графітованих волокон типу НМ. Тому, перші композити виявляють більш високі значення відносного подовження під час розриву, але для двох типів волокон цей показник нижчий, ніж для ненаповненого ПТФЕ.

Таблиця 1

Залежність міцності і пружних властивостей однонаправлених карбоволокнитів на основі епоксидного полімеру від властивостей армуючих вуглецевих волокон

Зв'язок	Коефіцієнт кореляції $r_{1,2}$			Рівняння зв'язку
	розрахунковий	критичний	ступінь лінійності	
$\sigma_{рк} \sim \sigma_B$	0,809	0,277	2,92	$\sigma_{рк} = -0,497 + 0,754\sigma_B$
$E_{рк} \sim E_B$	0,958	0,273	3,51	$E_{рк} = 12,99 + 0,481E_B$
$\sigma_{ск} \sim \sigma_B$	0,668	0,356	1,88	$\sigma_{ск} = 0,025 + 0,273\sigma_B$
$E_{ск} \sim E_B$	0,923	0,393	2,35	$E_{ск} = 10,17 + 0,487E_B$
$\sigma_{зк} \sim \sigma_B$	0,811	0,277	2,93	$\sigma_{зк} = -0,147 + 0,55\sigma_B$
$E_{зк} \sim E_B$	0,832	0,256	3,25	$E_{зк} = 33,581 + 0,381E_B$
$\tau_k \sim \sigma_B$	0,440	0,252	1,75	$\tau_k = 4,56 + 22,76\sigma_B$
$\tau_k \sim E_B$	-0,366	0,277	1,32	$\tau_k = 79,88 - 0,078E_B$

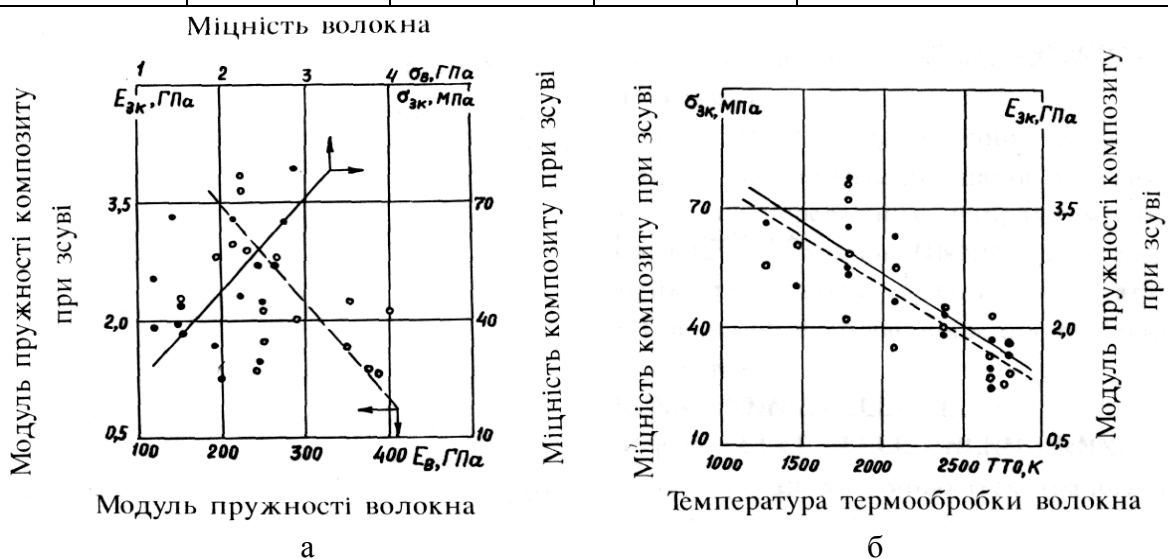


Рис. 1. Узагальнена залежність міцності (темні точки; суцільна лінія) і модуля пружності (порожні точки; рискована лінія) під час згину композиту на основі ПТФЕ від міцності і модуля пружності (а) і температури термообробки (б) вуглецевих волокон.

**2. Теплофізичні властивості.** З підвищенням  $T_K$  (ТТО) модуль пружності лінійно зростає, зазначаючи лінійний злам за  $T_K=2073$  К [6, 28]. Це явище пояснюється тим, що з підвищенням  $T_K$  (ТТО) збільшуються розміри кристалітів турбостратної структури і їх орієнтація вздовж основної вісі волокна [30].

З підвищенням  $T_K$  (ТТО) міцність вихідних волокон зменшується в 1,5-3 рази до температур 573-703 К, а потім зростає, досягаючи максимуму за 1473-1773 К [28, 31] або за 2073-2473 К [6], і далі: або лишається сталою, або знижується.

За теплостійкістю ВВ близькі до жаростійких блокових вуглецевих матеріалів (графіту, пірографіту, склоуглецю): у діапазоні температур 293-2273 К в інертній атмосфері міцність і модуль пружності ВВ залишаються високими [28].

Міцність вуглецевих волокон зростає з підвищенням температури випробувань до 773-1973 К, а потім різко знижується, але за 2273-2573 К величина міцності ВВ близька до міцності за 303-1073 К [19]. Відхилення від лінійної залежності  $\sigma_B=f(E_B)$  спостерігаються вже за 2073 К, тобто за температури початку квазіграфітації. Модуль пружності зменшується з підвищенням температури випробувань до 1473-1773 К і при подальшому підвищенні температури випробувань спостерігається різке його зниження [16].

Необоротне зміцнення ВВ з підвищенням температури (при практично незмінному модулі пружності) (для блокового графіту це явище оборотне) пояснюється зняттям внутрішніх напруг, які виникають під час термообробки вихідних органічних волокон [12]. Природа газового середовища мало впливає на характер деформування ВВ. До температури випробувань 1773-2073 К ВВ деформуються пружно і мають крихкий характер руйнування, а за 2073-2273 К і вище виявляється пластичність ВВ, змінюються поверхневі шари і механічні властивості стають залежними від газового середовища [12, 25].

Коефіцієнт лінійного термічного розширення (КЛТР) в інтервалі температур 200-400 К для квазіграфітованих за 2773 К волокон дорівнює від'ємній величині КЛТР  $(\alpha=-1,1\dots-0,6)\cdot 10^{-6}K^{-1}$ , що дуже близько до показника для блокового графіту, для графітованих за 2073-2173 К волокон  $(\alpha=-0,6\dots-0,5)\cdot 10^{-6}K^{-1}$ , для карбонізованих волокон  $(\alpha=-0,3\dots-0,2)\cdot 10^{-6}K^{-1}$  [36, 39]. Аморфний вуглець має у цьому інтервалі температур позитивний КЛТР, який дорівнює  $20\cdot 10^{-6}K^{-1}$ , а борні, скляні, кремнеземні і карбідокремнієві волокна мають КЛТР близький до величини  $(\alpha=0,55\dots 4,8)\cdot 10^{-6}K^{-1}$  [17, 40, 44, 49].

Середнє значення КЛТР вуглецевих волокон у широкому інтервалі температур має позитивне значення: для частинно-карбонізованих  $(5,5\cdot 10^{-6}K^{-1})$ , карбонізованих  $(3-13,5)\cdot 10^{-6}K^{-1}$ , графітованих  $3\cdot 10^{-6}K^{-1}$  [44, 49]. ВВ із різних вихідних органічних волокон також мають різні КЛТР: із ГЦ  $\alpha=1,0\cdot 10^{-6}K^{-1}$ ; із нафтового пеку  $\alpha=1,7\cdot 10^{-6}K^{-1}$ ; із ПАН  $\alpha=3,5\cdot 10^{-6}K^{-1}$

[44, 45]. Металізацією вуглецевих волокон можна зменшити від'ємний КЛТР [22, 37].

Питома теплоємність ВВ, вуглецевої тканини і вуглецевої повсті дорівнює  $C=0,71-0,74; 0,84-1,22$  і  $0,67$  кДж/(кгК) відповідно [9, 17, 42]. Теплопровідність ВВМ знаходиться в межах  $\lambda=0,84-83,5$  Вт/(мК). Графітовані волокна типу НМ за теплопровідністю близькі до металевих і борних волокон [17, 40, 43]. Для карбонізованих ВВ типу LM теплопровідність дорівнює  $\lambda=5,8-42$  Вт/(мК), для графітованих ВВ типу LM  $\lambda=38-70$  Вт/(мК) [44]. Теплопровідність вуглецевих тканин низька: карбонізованих –  $\lambda=0,08-0,16$  Вт/(мК), графітованих –  $\lambda=0,23-0,8$  Вт/(мК) [44, 49]. Температурний інтервал експлуатації ВВМ становить 25-1075 К.

**3. Поверхневі властивості.** Вуглецеві волокна з однаковими механічними властивостями можуть бути різні за поверхневими та антифрикційними властивостями. Опис поверхневих властивостей утруднений навіть для однієї марки ВВ. ВВ гідрофобні мають розвинуту мікропористу структуру [1]: великі пори мають розмір 2-4 нм, а ультрапори, які з'єднують великі, – не більше 0,4 нм [11]. Наявність на поверхні ВВ функціональних груп приводить до хемосорбції в ділянці малого тиску і ускладнює адсорбцію капілярною конденсацією в ділянці високого тиску. Підвищення  $T_K$  (ТТО), покриття ВВ піровуглецем знижує адсорбційну ємність і змочуваність вуглецевих волокон [1, 11]. Гігроскопічність ВВМ змінюється в межах 0,1-12%. Вода, азот, метанол у 200-300 разів сильніше сорбується вуглецевими волокнами, ніж бензен і криптон [11].

Питома поверхня вуглецевих тканин змінюється в межах 1-700 м<sup>2</sup>/г: для частинно-карбонізованих волокон цей показник дорівнює 1-50 м<sup>2</sup>/г, карбонізованих волокон – 20-700 м<sup>2</sup>/г, графітованих волокон – 1-5 м<sup>2</sup>/г [44, 49]. Питома поверхня спеціальних ВВ може досягати 1000-2000 м<sup>2</sup>/г. Питома поверхня ВВМ під час термоокиснення на повітрі збільшується від 0,4 до 69 м<sup>2</sup>/г при втраті маси до 8 %, при цьому граничний кут змочування знижується від 72 до 22...<sup>0</sup> [5]. Після фторування ВВ питома поверхня збільшується від 1,1 до 58 м<sup>2</sup>/г [13], а після активації ВВ водяною парою вона збільшується до 100 м<sup>2</sup>/г [30].

**4. Електрофізичні властивості.** Варіювання параметрів процесу термообробки дає можливість отримати ВВ з питомим електроопором від 10<sup>-4</sup> до 10<sup>16</sup> Омсм, тобто від матеріалів з майже металевою електропровідністю до напівпровідників та діелектриків [2, 9, 30, 31]. Питомий електричний опір вуглецевих тканин коливається від 0,3 до 10<sup>12</sup> Омсм. Графітовані ВВМ мають низьку перенапругу виділення водню, яка близька за величиною до перенапруги графіту і порівнювана з перенапругою заліза, нікелю і кобальту [5, 7, 9, 10, 14, 27, 33].

**5. Втомні властивості.** Наявність у ВВ шарової упаковки атомів карбону та малої еластичності волокон обумовлюють низьку стійкість ВВ до

повторно-змінних навантажень порівняно з арамідними і оксалонними волокнами [8, 15, 34, 42, 43]. Разом з тим, приводяться дані [2], що під час циклічних навантажень ВВ змінюються. Цей ефект пояснюється процесом локальної пластичної деформації і релаксації внутрішніх напружень. Нанесення на ВВ покриття з ПТФЕ приводить до підвищення міцності під час втомлення у десятки тисяч разів [3, 8].

**6. Термостійкість і хемостійкість.** Як і всі вуглецеві матеріали, ВВ за підвищених температур схильні до окиснення киснем повітря та іншими газовими оксидантами або деструкції в інертному середовищі. Згідно [17], температури початку окиснення ВВ дорівнюють  $\sim 675$  К на повітрі,  $\sim 973$  К у водяній парі,  $\sim 1173$  К в атмосфері  $\text{CO}_2$ . Максимальна температура експлуатації ВВ в атмосфері вологого повітря частинно-карбонізованих ВВ дорівнює 473-523 К, карбонізованих – 573-623 К, графітованих – 673-933 К [2, 28]. Стійкість до окиснення під час тривкої експлуатації значно підвищується під час нанесення на ВВ покриття з ПТФЕ [8]. Фторування ВВ знижує температуру початку окиснення у вологому повітрі та деструкцію в азоті на 150-200 К [13].

За хемостійкістю ВВ відносяться до найбільш інертних матеріалів: довготривала дія світла, погоди, води, 5-30 %-вих розчинів  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  за температури 295 К зменшує міцність ВВ не більше, як на 40% [8, 28]. Найбільший вплив на міцність ВВ спостерігається від дії 15-30 %-вих концентрацій  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . З підвищенням температури чутливість ВВ до сильних окисників зростає.

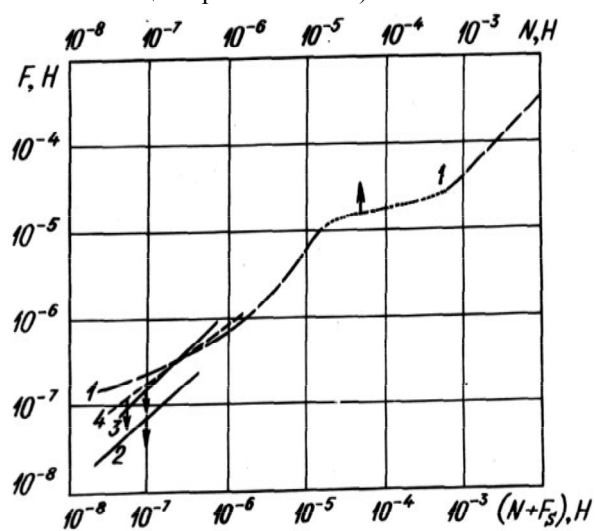
Термостійкість і хемостійкість ВВ залежать від  $T_k$  (ТТО), структури, стану поверхні, попередньої обробки та інших чинників. Найбільшу стійкість мають ВВ з більш досконалою структурою. ВВ, які отримані з ГЦ, більш стійкі і розкладаються під час термоокиснення з меншою швидкістю, ніж на основі ПАН [2].

**7. Радіаційна стійкість.** ВВ стійкі до випромінювання високих енергій і радіовипромінювання: після обробки  $\gamma$ -випромінюванням дозою 500 Мрад за 293-473 К на повітрі ВВ зберігають 76-88 % початкової міцності і модуля пружності [29, 31].

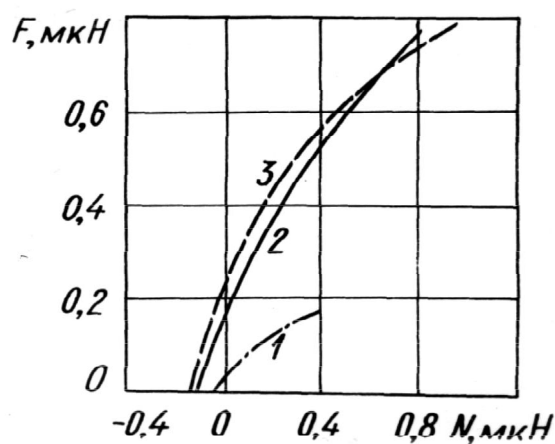
**8. Трибологічні властивості** вуглецевих волокон досліджені у роботі [64]. При малих навантаженнях за схемою «перехрещених циліндрів» (ВВ-ВВ) [64] спостерігається стрибкове тертя ВВ, при цьому сила статичного тертя ВВ непропорційно збільшується з підвищенням нормального навантаження від  $5 \cdot 10^{-8}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$  Н (рис. 2), при цьому коефіцієнт тертя дуже швидко зменшується від 7,0 до 0,8.

Стрибкове тертя ВВ авторами [62] пояснюється не нано- та мікроскоросткістю поверхні ВВ, а взаємодією локальних ділянок поверхонь волокна з високою поверхневою енергією. Доказом цього

висновку є такі явища, як безперервне збільшення сили статичного тертя із збільшенням нормального навантаження, стрибкове тертя кварцевих, скляних, сталевих та із аліфатичного поліаміду волокон по ВВ; значне збільшення контактної електричної опору на початку ковзання; збільшення коефіцієнта тертя у  $\sim 2$  рази після окиснення ВВ, що пов'язано з оголюванням країв кристалів з високою поверхневою енергією; збільшення коефіцієнта тертя у  $\sim 2$  рази при переході від графітованих до карбонізованих волокон; збільшення нормального тяжіння волокон і сили тертя під час проходження електричного струму (оскільки через високий електричний контактний опір у зоні контакту виникають високі температури, які підсилюють зв'язки площин кристалів ВВ).



а



б

Рис. 2. Залежність сили статичного тертя ( $F$ ) ВВ-ВВ від нормального навантаження ( $N$ ) (1) та від суми нормального навантаження ( $N$ ) та сили адгезії ( $F_s$ ) (2-4): 1,3 – графітоване за 2773 К ВВ (НМ), яке піддане оксидації в атмосфері вологого повітря за 773 К; 2 – теж саме (необроблене) вихідне ВВ; 4 – вихідне (необроблене) карбонізоване за 1773 К ВВ (НТ): а –  $N = 5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-2}$  Н; б –  $N = 0 - 1 \cdot 10^{-6}$  Н [64].

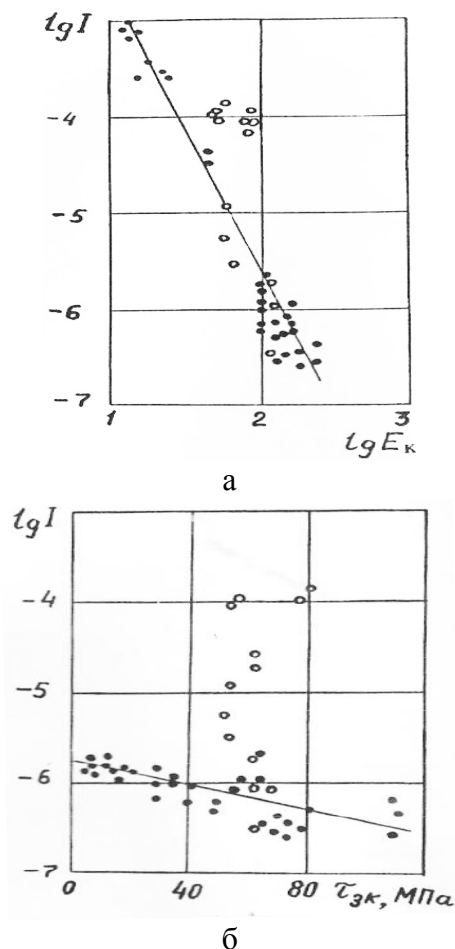


Рис. 3. Узагальнена залежність інтенсивності зношування односпрямованих [LL, LN, NN – орієнтація відносно поверхні тертя F (перша буква) та вектору швидкості  $\vec{V}$  (друга буква)] карбоволокнисту на основі ПТФЕ, епоксидної і епоксифенольної матриць+40-76об.% вуглецевих волокон типу НМНТ (темні точки) і СВ, волокон з нержавіючої сталі і ароматичного поліаміду (порожні точки) від модуля пружності (а) і міжшарового зсуву (б) композиту (L-паралельне та N-перпендикулярне спрямування ВВ щодо F і  $\vec{V}$ ).

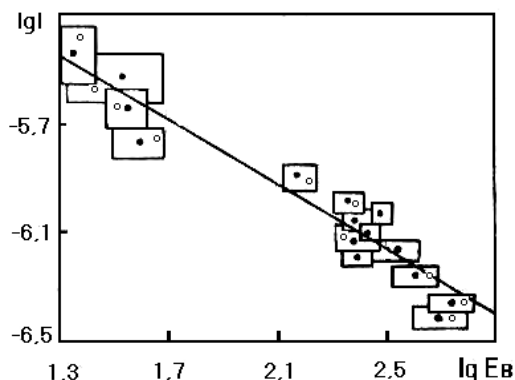


Рис. 4. Залежність інтенсивності зношування карбопластика на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2+20 об.% коротких вуглецевих волокон від модуля пружності волокна під час тертя по сталі 45 (НВ 4,3 ГПа;  $R_{a0}=0,25$  мкм) за умов: [I-I]; P=3 МПа; V=1,3 м/с; T=423 К; I=50 км.

Ймовірно, що при малих навантаженнях поверхневі шари легко пристосовуються до контакту. Це не впливає на зміну адгезійної міцності, але дуже впливає на площу контакту, яка при  $N=10^{-6}$ Н у 10 разів більша, ніж розрахункова. Під час пошуку узагальненого зв'язку питомої об'ємної інтенсивності зношування з механічними властивостями ВВ односпрямованих карбоволокнитів на основі ПТФЕ, епоксидної та епоксифенольної матриць, які містять ВВ, СВ, волокна з нержавіючої сталі та ароматичного поліаміду знайдено (рис. 3), що тільки між логарифмом інтенсивності зношування  $lgI$ (мм<sup>3</sup>/Нм) і логарифмом модуля пружності композиту  $lgE_k$ (ГПа) існує лінійний зв'язок [коефіцієнт кореляції  $r_{1,2}=-0,781$  при критичному значенні  $r_{кр}=0,303$  (число ступенів свободи  $f=42$  і рівень значущості = 0,05)]:

$$lgI=0,404-2,996 lgE_k, \quad (2)$$

де I у мм<sup>3</sup>/(Нм);  $E_k$  в ГПа.

Аналогічно за результатами [64] такий зв'язок знайдено для композиту з вуглецевими волокнами і орієнтацією волокон 0-90<sup>0</sup> у площині LOT. Менш міцний лінійний зв'язок  $r_{1,2}=-0,65$ ;  $r_{кр}=0,345$  ( $\alpha=0,05$ ;  $f=31$ ) існує між логарифмом інтенсивності зношування і міцністю під час міжшарового зсуву  $\tau_k$  односпрямованих карбоволокнитів армованих ВВ:

$$lgI=-5,779-6,49 \cdot 10^{-3} \tau_k, \quad (3)$$

де  $\tau_k$  у МПа.

Із збільшенням модуля пружності і міцності під час міжшарового зсуву зносостійкість зростає. Для термотривких полімерних матриць з будь-яким типом ВВ або низькомодульних волокон низької або середньої міцності і будь-якої полімерної матриці ці закономірності можуть бути іншими. Так, логарифм інтенсивності зношування композиту на основі ароматичного поліаміду і ВВ (з довжинами за законом Вейбулла  $n_b=25-250$ мкм) лінійно зменшується із збільшенням логарифму модуля пружності вуглецевих волокон (рис. 4), при цьому коефіцієнт кореляції між  $lgI$  і  $lgE_v$  дорівнює  $r_{1,2}=0,962$  [ $r_{кр}=0,514$  ( $\alpha=0,05$ ;  $f=31$ )], а рівняння зв'язку має вигляд:

$$lgI=-4,645-0,614 lgE_v, \quad (4)$$

де  $i$  в мм<sup>3</sup>/Нм;  $E_v$  в ГПа. Таким чином, визначальними у трибологічних властивостях композиту є властивості вуглецевих волокон.

При навантаженнях  $N \geq 10^{-3}$ Н коефіцієнт статичного тертя майже не залежить від нормального навантаження і дорівнює 0,05 [50]. Згідно даних роботи [36], коефіцієнт тертя вуглецевих і скляних волокон дорівнюють 0,25 і 0,8 відповідно під час випробувань за однакових умов.

### III. Огрунтування вибору вуглецевих волокон для дослідження

Цей вибір обгрунтований на основі узагальненої характеристики порівняльних оцінок властиво-

стей неорганічних, органічних, металевих та іншої природи волокон, приведених в табл. 2 [4, 6, 16, 19, 21-30, 33, 36, 42, 54-58, 61, 62]: вуглецеві волокна є абсолютним лідером за  $T_{x \max}=3973$  К

(1 місце),  $\sigma_{v \max}=6,9$  ГПа (2 місце),  $E_{v \max}=850$  ГПа (1 місце), поступаючись ( $\epsilon_v=0,3-6,7$  %) лише органічним волокнам ( $\epsilon_v=1-180$  %).

Таблиця 2

Порівняльна характеристика порівняльних оцінок властивостей неорганічних, органічних, вуглецевих та металевих волокон [2, 4, 8, 11, 16-20, 27-33, 35, 38, 46-54, 56, 57]

Волокна	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Діаметр волокна або нитки ( $d_v$ ), мкм	Температура топлення, перегину, розкладу або хімічних перетворень ( $T_x$ ), К	Подовження під час розтягу ( $\epsilon_v$ ), %	Міцність під час розтягу ( $\sigma_v$ ), ГПа	Модуль пружності під час розтягу ( $E_v$ ), ГПа
<b>I. Неорганічні та металеві:</b>						
Вуглецеве	1250-2200	4-25	3873-3973	0,3-6,7	0,04-6,9	4-850
Скляне	2500-2770	3-100	973-1173	1-4	1,4-5,6	60-112
Кварцове	2200	35	1933	-	2,1-8,4	70-110
Кремнеземне	2600	0,8-40	1923-2029	2	2,8-4,2	70-74
Азбестове	2400-3300	-	1466-1724	1-2	0,7-3,5	189
Борне*	2200-3000	50-200	2323-2573	0,2-1	2,4-4	370-448
Боркарбідне*	2350-2700	10,5-100	2723	-	2,2-4	400-492
Кремнекарбідне*	2770-4090	76-150	2573-3100	0,3-0,5	2,1-4,2	386-500
Борнітридне	1900	7	3253	-	1,4	89-91
Титанату калію	3600	0,2-1,0	1644	0,6	0,16	28
Оксиду алюмінію	3150-4000	1-250	2273-2327	-	2,1-2,6	175-500
Оксиду цирконію	4840-6270	0,25-25	2863-2950	-	0,4-2,7	350-470
Титанове	4500	-	1941	-	1,5-2,0	120
Стальне	7700-7900	13-100	1570-1700	-	3,6-4,2	180-204
Вольфрамове	19200-19400	12-250	3673	2,2-4,5	1,6-4,2	400-414
Молібденове	12000	15-500	2893	1,0-2,4	1,54-2,25	365
Базальтове	2300-3070	0,2-350	1410-1720	-	0,1-2,6	70-92
Берилієве	1800-1830	100-250	1553	-	1,3	250
<b>II. Органічні:</b>						
Поліетиленове	910-960	100-500	378-449	5,0-80	0,14-0,62	2-15
Поліпропіленове	910	100-500	428-446	10-90	0,27-0,65	2-13
Аліфатичного поліаміду	1140	-	468-489	13-75	0,41-0,86	3,2-3,6
Політетрафторетиленове	22000	-	600	10-25	0,22-0,55	1,2-3,3
Полівінілхлоридне	1380-1470	-	403-443	15-180	0,11-0,51	2,7-5
Полівінілспиртове	1260-1320	12,8-400	498-503	3-27	0,12-1,0	3-60
Поліакрилонітрильне	1170	-	590	11-60	0,21-0,56	1,3-7,4
Гідратцелюлозне	1520-1550	-	563-603	5-28	0,32-1,5	25-60
Полефірне	1380	-	508-528	8-30	0,4-1,4	2-25
Ароматичного поліаміду**	1300-1460	-	673-803	1,20	0,5-1,42	6-85
Арамідне волокно (арамідне кевлар)	1440-1460	39	573-673	1-5	2,2-3,9	60-160
Полюоксадіазольне «оксалон»	-	-	670	4-8	0,55-0,86	30-54
Поліімідне***	1300-1450	-	973	6-8	0,62-2,0	9-20

\* На вольфрамових і вуглецевих волокнах – підкладках; \*\* фенілон, терлон, сільфон – Т, номекс, кодекс, дюрет; \*\*\* арімід, ПМ та інші.



## Література

1. Ю.П. Адлер, Введение в планирование эксперимента (Металлургия, Москва, 1969).
2. Ю.П. Адлер, Ю.В. Грановский, Обзор прикладных работ по планированию эксперимента (Изд-во МГУ, Москва, 1967).
3. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский, Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий (Наука, Москва, 1976).
4. А.И. Бабер, Н.В. Ковалева, Г.А. Мишина, Л.П. Семенова, Хим. Волокна, (1), 54 (1977).
5. М.Т. Азарова, Т.Н. Козиорова, В.О. Горбачева, Углеродные волокна и композиционные материалы на их основе (НИИТЭХИМ, Москва, 1977).
6. В.М. Андреев, Свинец: Краткая химическая энциклопедия (Химия, Москва, 1965).
7. Г.А. Сиренко, Антифрикционная самосмазывающийся материал: А.с.110292 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L27/18 /, №2211791, Заявл. 18.11.76.
8. Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник, Г.М. Сорокин, Л.М. Кириченко, В.И. Яшук, Антифрикционный материал: А.с. 1635523 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L27/18 /, №4607772, Заявл. 26.09.88.
9. Г.А. Сиренко, И.И. Новиков, В.Д. Герасимов, В.П. Свицерский, Н.Д. Журавлев, Д.С. Фондаминский, Антифрикционный самосмазывающаяся композиция «Графелон-4ДПТ»: А.с. 1526252(СССР), МКИ С08L77/00; С08D5/16 /, №2106074, Заявл. 18.02.75.
10. Г.А. Сиренко, Г.М. Сорокин, В.Ф. Вельбой, С.Н. Тараненко, С.С. Кононюк, Антифрикционная композиция графелон - 47: А.с. 1322664 (СССР), МКИ С08L77/10/, №3972560, Заявл. 25.10.85.
11. Г.А. Сиренко, Г.М. Сорокин, С.Н. Тараненко, Антифрикционная композиция: А.с. 1400040(СССР), МКИ С08L77/08; С08J5/16 /, №4050632, Заявл. 7.04.86.
12. В.М. Антропов, А.Н. Титов, Л.С. Красавин, Физика твердого тела, 38 (4), 1288 (1996).
13. И.И. Аргатов, Ю.А. Фалин, Трение и износ, 29 (2), 111 (2008).
14. С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров, Оптимизация эксперимента в химии и химической технологи (Высш. шк., Москва, 1978).
15. Ю.М. Бабицкий, П.М. Гринштейн, М.Г. Мильвидский, Изв. АН СССР. Сер. неорганические материалы, 21 (5), 739 (1985).
16. Л.В. Базюк, Г.О. Сиренко, О.В. Шийчук, Вісник Прикарпат. нац. ун-ту ім. В.Стефаника. Серія Хімія, Вип. VI, 36 (2008).
17. Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, В.І. Кириченко, М.Б. Складанюк, Вісник Хмельницького. нац. ун-ту. Серія «Технічні науки», (3), 258 (2012).
18. Дж. Бендат, А. Пирсол, Измерение и анализ случайных процессов (Мир, Москва, 1974).
19. А.Ф. Бермант, Краткий курс математического анализа (Физматиздат, Москва, 1963).
20. Ф.П. Боуден, Д. Тейбор, Трение и смазка твердых тел (Машиностроение, Москва, 1968).
21. Э.А. Буланов, Трение и износ, 27 (2), 132 (2006).
22. Е.Р. Брейтуэйт, Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия (Химия, Москва, 1967).
23. В.З. Бродский, Введение в факторное планирование эксперимента (Наука, Москва, 1976).
24. Г.А. Будницкий, К.Е. Перепелкин, Химические волокна, (2), 5 (1990).
25. К.П. Бунин, А.А. Баранов, Графитизация: БСЭ, 7, 261 (1972).
26. И.А. Булгак, А.С. Скоропанов, НИИ физхимпроблем Беларус. госуд. ун-та, Инф. л. (Минск, 1986).
27. А.И. Буря, А.Д. Деркач, В.И. Шемавнев, Трение и износ, 27 (1), 98 (2006).
28. А.В. Буш, Р.Д. Гибсон, Г.П. Кио, Проблемы трения и смазки, 101 (Сер. F, 1), 16 (1979).
29. А.И. Бурга, В.А. Дубкова, А.В. Кобета, Международ. Симпозиум «Трение фрикционных материалов» (Ярославль, 1991), с. 45.
30. В.З. Вайнштейн, Т.И. Трояновская, Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы (Машиностроение, Москва, 1968).
31. В.Я. Варшавский, Химия и технология высокомолекулярных соединений: Итоги науки и техники (ВИНИТИ, Москва, 1977), с. 161.
32. Ю.Н. Васильев, Трение и износ, 4 (3), 483 (1983).
33. Ю.Н. Васильев, В.А. Фугель, Проблемы трения и изнашивания, (8), 122 (1975).
34. Ю.Н. Васильев, Конструкционные материалы на основе графита (Металлургия, Москва, 1969).
35. И.Э. Виноградова, Противоизносные присадки к маслам (Химия, Москва, 1972).
36. Г.А. Сиренко, В.П. Свицерский, И.И. Новиков, В.Л. Захаренко, И.И. Ищенко, Трение и износ, 7 (1), 136 (1986).
37. А.С. Фиалков, В.А. Михайлова, Н.В. Полякова, Е.Д. Гурвич, Механика полимеров, (3), 533 (1973).
38. Л.П. Кобец, Д.К. Хакимова, Л.А. Голикова, Н.В. Полякова, Механика полимеров, (5), 1036 (1976).
39. А.В. Куранов, В.Г. Плещев, А.Н. Титов, Н.В. Баранов, Л.С. Красивин, Физика твердого тела, 42 (11), 2029 (2000).

40. Б.Д. Воронков, В.Г. Шадрин, Применение избирательного переноса в узлах трения химического оборудования. В кн.: Применение избирательного переноса в узлах трения машин (Изд. ВИСМ Госстандарта, СССР, 1976, Т. 1).
41. Н.Р. Галль, Е.В. Рутьков, А.Я. Тонтугоде, Физика и техника полупроводников, 36 (3), (2002).
42. Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский, А.А. Поляков, Избирательный перенос у узлах трения (Транспорт, Москва, 1969).
43. Г.А. Гороховский, Полимеры в технологии обработки металлов (Наукова думка, Київ, 1975).
44. С.С. Гриденко, Г.Н. Филимонов, М.М. Снитковский, Конференция «Физико-химическая механика-контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия» (КНИГА, Киев, 1973), с. 65.
45. Р.В. Гриневич, В.В. Цасюк, А.С. Смирнов, Специализированные машины трения. Применение синтетических материалов (Карта Молдованяскэ, Кишинев, 1975).
46. Н.Б. Демкин, Контактное шероховатых поверхностей (Наука, Москва, 1970).
47. В.І. Жлуктенко, С.І. Наконечний, С.С. Савіна, Теорія ймовірностей і математична статистика: навч.-метод. посібник: У 2-х ч., Ч. II.
48. А.М. Зиятдинов, Физика твердого тела, 42 (7), (2000).
49. І.Д. Іванюта, В.І. Рибалка, І.А. Рудоміно-Дусятська, Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики: навч. посібник (Слово, Київ, 2003).
50. В.В. Іващук, Фізика і хімія твердого тіла, 5 (2), 382 (2004).
51. В.И. Ивнов-Омский, Т.К. Звонарева, Г.С. Фролова, Физика и техника полупроводников, 34 (12), (2000).
52. В.И. Ивнов-Омский, Э.А. Сморгонская, Физика и техника полупроводников, 32 (8), (1998).
53. В.И. Ивнов-Омский, Э.А. Сморгонская, Физика твердого тела, 41 (5), (1999).
54. В.И. Ивнов-Омский, Г.С. Фролова, Прикладной журнал технической физики, 26 (14), (2000).
55. Д.Н. Гаркунов, Ю.С. Симакова, Избирательный перенос при трении (Наука, Москва, 1975).
56. А.И. Бабер, Л.Л. Дембург, А.В. Киселев и др., Семинар МДНТП (Москва, 1972), с. 252.
57. А.Г. Стародубов, М.А. Медвецкий, А.М. Шикин, Г.В. Прудникова, В.К. Адамчук, Физика твердого тела, 44 (4), (2002).
58. Н.Р. Галль, Е.В. Рутьков, А.Я. Тонтугоде, М.М. Усуфов, Журнал технической физики, 69 (9), (1999).
59. Т. Исикава, Хемэн, 8 (9), 543 (1970).
60. Т. Исикава, Х. Тэраниси, Нихон фукуо дзайре гаккайси, 2 (2), 65 (1976).
61. Г.Е. Мостовой, Н.Н. Дергунов, Ю.Н. Ануфриев, Механика полимеров, (4), 626 (1977).
62. Л.П. Кобец, М.А. Чубарова, Д.К. Хакимова и др., Механика композитных материалов, (1), 2 (1981).
63. Journels curfeennes des composites, Composites, 25 (5), 63 (1986).
64. I.C. Roselman, D. Tabor, J. Phys. D. Appl. Phys., 9 (17), 2517 (1976).

**Сіренко Геннадій Олександрович** – заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, академік Академії технологічних наук України, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії.

**Солтис Любов Михайлівна** – кандидат хімічних наук, член-кореспондент Академії технологічних наук України, викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії.

**Складанюк Марія Богданівна** – кандидат фізико-математичних наук, старший лаборант кафедри неорганічної та фізичної хімії.