
Огляди. Рецензії

Владислав Свідерський, Ольга Федоришин

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ОСНОВ І ВЛАСТИВОСТЕЙ АНТИФРИКЦІЙНИХ КАРБОПЛАСТИКІВ. 1. ВУГЛЕЦЕВІ ВОЛОКНА

1. Термінологія

Вуглецеві волокна в літературі часто називають "графітовими", "карбовоними", "вугільними", "вуглецевими". Терміни "вуглецеві волокна" /ВВ/ і "вуглецевий волокнистий матеріал" /ВВМ/ є науково і технічно коректними і надалі будуть використовуватися в даному огляді.

Відносно композиційних полімерних матеріалів на основі вуглецевих волокон і ВВМ будемо дотримуватися загальноновизнаного узагальненого терміна "карбопластик". Цим же терміном позначимо матеріали з хаотичним розміщенням коротких волокон у шарі і в просторі.

Терміном "карбоволокнит" позначимо матеріали з односпрямованими волокнами, які одержані пресуванням або методом навивки. Терміном "карботекстолит" позначимо матеріали на основі вуглецевої тканини.

2. Класифікація вуглецевих волокнистих матеріалів

До цього часу класифікація ВВМ не розроблена. На підставі матеріалів [2, с.5; 3, с.161; 9, с.543; 10, с.65; 21, с.204; 22, с.88; 23, с.430; 24, с.1005; 25, с.547; 26, с.5; 27, с.217; 28, с.259; 29, с.18; 30, с.632; 31, с.5; 35, с.5; 36, с.529; 40, с.5; 55, с.3; 61, с.29; 62, с.3; 63, с.5; 64, с.65] будемо розрізняти ВВМ за такими ознаками: вихідною речовиною, текстильною формою, призначенням, формою поперечного перерізу, вмістом вуглецю, кінцевою температурою термообробки /КТТ/, фізико-механічними властивостями.

За вихідною речовиною. ВВМ виготовляють піролітичним перетворенням хімічних і природних волокон, лігніну, кам'яновугільної смоли, нафтового пеку, фенольної смоли, циклізованих полібутадієнів і інших речовин [27, с.217; 28, с.259; 29, с.18; 30, с.632; 31, с.5]. Частіше використовують ВВМ, які виготовлені на основі волокон із гідратцелюлози (ГЦ),

поліакрілонітрилу (ПАН), сополімерів поліакрілонітрилу і гідратцелюлози (СПАН) та нафтового пеку (НП).

За текстильною формою. УВМ виготовляють різної текстильної форми: волокна, трикотаж, шнури, тасьма, фетр, папір, пряжа, повсть, тканина, рівниця, сітка, картон, мата тощо[10, с.65; 36, с.529; 64, с.65].

За призначенням. Виходячи з механічних і спеціальних властивостей, УВМ класифікуються на конструкційні (загального призначення і для армування пластмас), теплозахисні, електрофізичні, сорбційно-активні, текстильні тощо[64, с.65]. Для антифрикційних цілей УВМ спеціально не виготовляються.

За формою поперечного перерізу. Кругла і бобовидна форми поперечного перерізу характерні для ВВ на основі ПАН, а покряяна форма- на основі ГЦ[7, с.5; 33, с.5; 50, с.5]

Особливим видом ВВ є шарувата неоднорідна за перерізом форма. Гомогенна шаруватість ВВ утворюється внаслідок перетворень в структурі вихідних волокон при технологічному процесі. Такі ВВ мають більш-менш густий і орієнтований поверхневий шар і відносно пухкий і неорієнтований стрижень. До гетерогенних шаруватих ВВ відносяться волокна, на поверхню яких нанесено шари з матеріалів, що відрізняються від матеріалу основи.

За вмістом вуглецю. За вмістом вуглецю ВВМ розділяють на матеріали типу I, які містять 54-90% вуглецю, типу 2 - 90-98%, типу 3- більш, як 98 % [66, с.42]. Низькомодульні тканини містять 54 - 99,9 % вуглецю, 0,1 - 28 % золи, 0 - 4,5 % водню, 0 - 35 % кисню, 0 - 3,1 % азоту, 0,05 - 12 % вологи[8, с.56; 18, с.52; 19, с.47; 66, с.42].

За температурою кінцевої термообробки (ККТ). За ККТ вуглецеві волокнисті матеріали підрозділяють на частково карбонізовані (473 - 823 К), які містять до 65 % вуглецю, карбонізовані (1073 - 2073 К), які містять до 98 % вуглецю, і графітовані (2073 - 3473 К), які містять до 99,9 % вуглецю[14, с.53; 32, с.5; 66, с.42].

Температурною границею карбонізованих і графітованих УВМ прийнято вважати 2073 К, виходячи з того, що при КТТ= 2073 - 2173 К спостерігаються ознаки квазіграфітації: структура ВВ наближається до тривимірного упорядкування - турбустратної структури високої міри упорядкування - і мікрофібрилярності.

За механічними властивостями ВВ будемо класифікувати таким чином. За показником міцності ВВМ підрозділяються на низькоміцні ЛГ (міцність волокна при розтягуванні $\sigma_B > 0,6$ ГПа; модуль пружності волокна $E_B = 4 - 60$ ГПа); середньої міцності МТ ($\sigma_B = 0,6 - 1,5$ ГПа; $E_B = 30 - 240$ ГПа); високоміцні НТ ($\sigma_B > 2,35$ ГПа; $E_B = 190 - 280$ ГПа). За показником пружності ВВМ

підрозділяються на низькопружні ($E_B = 20 - 140$ ГПа; $\sigma_B = 0,2 - 1,2$ ГПа) та особливо міцні високорпружні, які у свою чергу підрозділяються на високомодульні НМ – типу I ($E_B = 300 - 850$ ГПа; $\sigma_B = 1,2 - 2,5$ ГПа); помірнопружні НМ – типу А ($E_B = 200-300$ ГПа; $\sigma_B = 2 - 3,5$ ГПа); високоміцні НТ – типу II ($E_B = 190 - 280$ ГПа; $\sigma_B = 2,35 - 6,95$ ГПа); високопружні високоміцні НМНТ – типу III ($E_B \geq 300$ ГПа; $\sigma_B \geq 2,35$ ГПа).

3. Властивості вуглецевих волокнистих матеріалів

Сучасні уявлення про структуру і властивості ВВ узагальнені в роботах М.Т. Азарової, Л. Браутмана, В.Я. Варшавського, Й. Ваганабе, Г.М. Гуняєва, Т. Ісікави, І.Л. Кальніна, Г.С. Каца, Е. Г. Кендала, Л.П. Кобца, А.А. Конкіна, Б.І. Молчанова, А. Нісімури, К.Е. Перепьолькіна, І. Розельмана, Н. Сібати, С. Сімамури, Г.О. Сіренка, Ю.М. Тарна-польського, Д. Тейбора, Е. Тіканісі, Х. Тіранісі, Д.Л. Шмідта, С.В. Шу-лепова та ін. [1, с.54; 2, с.5; 3, с.161; 4, с.533; 5, с.37; 6, с.1036; 7, с.5; 8, с.56; 9, с.543; 10, с.65; 11, с.149; 15, с.5; 17, с.5; 21, с.204; 22, с.88; 23, с.430; 24, с.1005; 25, с.547; 26, с.5; 27, с.217; 28, с.259; 29, с.18; 30, с.632; 31, с.5; 33, с.5; 35, с.5; 36, с.529; 37, с.736; 38, с.134; 39, с.73; 40, с.5; 41, с.350; 42, с.187; 43, с.255; 46, с.195; 47, с.5; 48, с.5; 50, с.5; 52, с.492; 53, с.65; 54, с.541; 55, с.3; 61, с.29; 62, с.3; 63, с.5; 64, с.65; 65, с.11; 66, с.42; 67, с.2517]. Перевага фізико-механічних, теплофізичних, хімічних, електрофізичних та інших властивостей ВВ над скляними, арамідними, оксалоновими, арімідними, металевими, борними та іншими волокнами показана в роботах [1, с.54; 2, с.5; 3, с.161; 5, с.37; 7, с.5; 8, с.56; 11, с.149; 12, с.626; 14, с.52; 15, с.5; 16, с.5; 17, с.5; 20, с.113; 21, с.204; 26, с.5; 27, с.217; 28, с.259; 29, с.18; 30, с.632; 31, с.5; 33, с.5; 35, с.5; 37, с.736; 38, с.134; 39, с.73; 40, с.5; 41, с.350; 42, с.187; 43, с.255; 46, с.195; 47, с.5; 52, с.492; 53, с.65; 54, с.541; 55, с.3; 61, с.29; 62, с.3; 63, с.5; 64, с.65; 65, с.11; 66, с.42; 67, с.2517].

Механічні властивості. Міцність ВВ типу НТ і НМ в 200-500 разів, а модель пружності в 20-100 разів перевищує відповідні показники блокового графіту. Серед жаростійких волокон ВВ мають найнижчу густину.

Густина вуглецевих тканин коливається від 1400 до 1850 кг/м³, розривне навантаження – від 10 до 700 Н/см (по основі) і від 5 до 600 Н/см (по підтканню) [2, с.5; 3, с.161; 9, с.543; 47, с.5; 65, с.11]. Густина вуглецевих волокон коливається від 1250 до 2200 кг/м³ [2, с.5; 3, с.161; 47, с.5; 62, с.3; 64, с.64; 67, с.2517].

Серед різних волокон ВВ мають найвищу 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 при 5%-вій деформації, в той же час для ВВ ця властивість реалізується при 0,3-1,5%-вій деформації [16, с.5]. Крім того, більшість високоміцних і високомодульних невуглецевих волокон не мають антифрикційних властивостей і чутливі до зношування.

Незважаючи на високу міцність при розтягуванні, ВВ мають низьку міцність на стискання [26, с.5]. У високомодульних вуглецевих волокон при стисканні спостерігається розтріскування вздовж волокон, але воно відсутнє у середньо- і низькомодульних ВВ [3, с.101]. Єдиним шляхом підвищення міцності при стисканні ВВ є збільшення волокон від 4-12 мкм до 15-25 мкм, але при діаметрі більшому 10-15 мкм міцність при розтягуванні різко знижується.

Відносна подовженість ВВ при розтягуванні знаходиться в межах 0,3-8% (меншим температурам 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 і довжині волокон. Ця гетерогенність пов'язана з неоднорідністю вихідних волокон і додатково збільшується при термообробці [28, с.259]. Властивості ВВ багато в чому залежать від коливання параметрів технологічного процесу і відрізняється для різних партій однієї марки як за середнім показником, так і за дисперсією [7, с.5; 33, с.5]. Розподіл міцності ВВ підпорядковується ймовірним законам Вейбулла [44, с.34; 45, с.963] і Гаусса [9, с.543; 31, с.5]. Розподіл модуля пружності ВВ підпорядковується нормальному закону [9, с.543].

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 ± 15 до 415 ± 35 ГПа [7, с.5; 33, с.5]. 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 ± 53 до 585 ± 140 ГПа для модуля пружності, від $0,36 \pm 0,12$ до $1,4 \pm 0,2\%$ для відносного подовження при розтягуванні і від $21,9 \pm 4,19$ до $62,1 \pm 23,9$ мкм² для площі поперечного перерізу [61, с.29].

Коефіцієнти варіації міцності однієї партії ВВ знаходяться в межах 12-53%, модуля пружності – 8-30%, відносного подовження

при розриві – 14-39%, площі поперечного перерізу – 9-40%[7, с.5; 9, с.543; 23, с.430; 24, с.1005; 25, с.547, 33, с.5; 44, с.34].

Міцність і модуль пружності ВВ залежить від довжини і площі поперечного перерізу[23, с.430, 25, с.547]. При збільшенні довжини ВВ від 5 до 50 мкм міцність зменшується на 33%. Від 5 до 100 мкм – на 50%[28, с.259]. При зміні площі поперечного перерізу ВВ від 15-20 до 150-200 мкм² 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 при коефіцієнтах варіацій від 26,3 до 39,1[44, с.34]. Враховуючи, що при ковзанні 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 діаметра 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, с.259]. У лабораторних умовах отримані ВВ з середньою міцністю 6,9 ГПа[7, с.5; 33, с.5], а при легуванні 0,2-0,3 відсотками бора отримали ВВ з середнім 900 ГПа і максимальним 1070 ГПа модулем пружності[4, с.533].

Теоретичне значення міцності гексагональної ґратки графіту дорівнює 120-135 ГПа, а модуля пружності – 943 – 1020 ГПа[39, с.73]. Гранично досяжна міцність такої шаруватої структури дорівнює 99-115 ГПа[39, с.73]. За даними[24, с.1005], гранично досяжна міцність ВВ дорівнює $22,47 \pm 1,47$ ГПа. Для монокристалів графіту отримані значення міцності 20-24,5 ГПа і модуля пружності 570-100 ГПа[9, с.543; 39, с.73, 55, с.3].

Таким чином, якщо для ВВ практично досягнуто теоретично значення модуля пружності, то значення міцності досягнуто тільки 30% гранично досяжної і 6-16% теоретичних величин. У той же час для інших волокон ці показники вже досягли теоретичної величини.

В односпрямованих карбонпластиках більшою мірою реалізуються міцнісні (95%) і пружні (92%) властивості ВВ типу ПТ, ніж типу НМ (40-70% міцнісних і 94% пружних властивостей)[16, с.5]. У[44, с.34] 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[45, с.963]. Міцність композиту визначається квантилем розподілу міцності волокон, екстрапольованого на неефективну довжину[44, с.34].

Коефіцієнт Пуассона для ВВ дорівнює 0,25[7, с.5, 33, с.5].

Теплофізичні властивості. З підвищенням ККТ модуль пружності лінійно зростає, зазначаючи лінійний злам при 2070 К[6, с.1036; 28, с.259]. Це явище пояснюється тим, що з підвищенням ККТ збільшуються розміри кристалітів і їх орієнтація вздовж основної осі волокна[30, с.632].

З підвищенням ККТ міцність вихідних волокон зменшується в 1,5-3 рази до температур 570-700 К, а потім зростає, досягаючи максимуму при 1470-1770 К[28, с.259; 31, с.5] або при 2070-2470 К[6, с.1036], і далі або лишається сталою, або знижується. За теплостійкістю ВВ близькі до жаростійких блокових вуглецевих матеріалів (графіту, пірографіту, склоуглецю): в діапазоні температур 290-2270 К в інертній атмосфері міцність і модуль пружності ВВ залишаються високими[28, с.259].

Міцність вуглецевих волокон зростає з підвищенням температури до 770-1970 К, а потім різко знижується, але при 2270-2570 К величина міцності ВВ близька до міцності при 300-1070 К[12, с.626]. Відхилення від лінійної залежності $\sigma_B - T_B$ спостерігаються вже при 2070 К, тобто при температурі початку графітації. Модуль пружності зменшується з підвищенням температури до 1470-1770 К і при подальшому підвищенні температури спостерігається різке його зниження[12, с.626].

Необоротне зміцнення ВВ з підвищенням температури при практично незмінному модулі пружності (для блокового графіту це явище оборотне) пояснюється зняттям внутрішніх напружень, які виникають під час термообробки вихідних органічних волокон[12, с.626].

Різне газове середовище мало впливає на характер деформування ВВ. До 1770-2070 К ВВ деформуються пружно і мають крихкий характер руйнування. При 2070-2270 і вище виявляється пластичність ВВ змичуються поверхневі шари і механічні властивості стають залежними від газового середовища[12, с.626; 25, с.547].

Коефіцієнт лінійного термічного розширення (КЛТР) в інтервалі температур 200-400 К для графітованих при 2770 К волокон дорівнює $(-1,1 \dots -0,6) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, що дуже близько до показника для блокового графіту, для графітованих при 2070-2170 К волокон $(-0,6 \dots -0,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для карбонізованих волокон $(-0,3 \dots -0,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

[38, с.134; 41, с.350]. Аморфний вуглець має в цьому інтервалі температур позитивний КЛТР, який дорівнює $20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а борні скляні, кремніземні і карбідкремні волокна мають КЛТР близький до величини $(0,55 \dots 4,8) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [17, с.5; 43, с.255; 55, с.3, 66, с.42].

Середнє значення КЛТР вуглецевих волокон у широкому інтервалі температур має позитивне значення: для частково карбонізованих $(5,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1})$, карбонізованих $(3-13,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, графітованих $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [55, с.3; 66, с.42]. ВВ із різних вихідних волокон також мають різні КЛТР: для ГЦ $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для нафтового пеку $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для ПАН $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [55, с.3; 56, с.66]. Металізацією вуглецевих волокон можна зменшити від'ємний КЛТР [22, с.88; 38, с.134].

Питома теплоємність ВВ, вуглецевої тканини і повітря дорівнює 0,71-0,74; 0,84-1,22 і 0,67 кДж/кгК відповідно [9, с.543; 17, с.5; 47, с.5]. Теплопровідність ВВМ знаходиться в межах 0,84-83,5 Вт/м.К. Графітовані волокна типу НМ за теплопровідністю близькі до металевих і борних волокон [17, с.5; 43, с.255; 51, с.5]. Для карбонізованих ВВ типу ІМ теплопровідність дорівнює 5,8-42 Вт/м.К, для графітованих ВВ типу LM 38-70 Вт/м.К [55, с.3]. Теплопровідність вуглецевих тканин низька: карбонізованих – 0,08-0,16 Вт/м.К, графітованих – 0,23-0,8 Вт/м.К [55, с.3; 66, с.42].

Поверхневі властивості. Вуглецеві волокна з однаковими механічними властивостями можуть мати різні поверхневі і антифрикційні властивості. Опис поверхневих властивостей утруднений навіть для однієї марки ВВ.

ВВ гідрофобні, мають розвинуту мікропористу структуру [1, с.54]: великі пори мають розмір 2-4 нм, а ультрапори, які з'єднують великі, - не більше 0,4 нм [11, с.149]. Наявність на поверхні ВВ функціональних груп приводить до хемосорбції в області малого тиску і ускладнює адсорбцію капілярною конденсацією в області високого тиску. Підвищення КТТ, покриття ВВ піровуглецем знижує адсорбційну ємність і змочуваність вуглецевих волокон [1, с.54; 11, с.149].

Гігроскопічність ВВМ міняється в межах 0,1-12%. Вода, азот, метиловий спирт в 200-300 разів сильніше сорбується вуглецевими волокнами, ніж бензол і криптон [11, с.149].

Питома поверхня вуглецевих тканин змінюється в межах 1-700 $\text{m}^2/\text{г}$: для частково карбонізованих волокон цей показник дорівнює 1-50 $\text{m}^2/\text{г}$, карбонізованих волокон – 20-700 $\text{m}^2/\text{г}$, графітованих волокон – 1-5 $\text{m}^2/\text{г}$ [55, с.3; 66, с.42]. Питома поверхня ВВМ при термоокисленні на повітрі збільшується від 0,4 до 69 $\text{m}^2/\text{г}$ при втраті маси до 8%, при цьому граничний кут змочування знижується від 72 до 22° [5, с.37]. Після фторування ВВ питома поверхня збільшується

від 1,1 до 58 м²/г[13, с.2], а після активації ВВ водяною парою вона збільшується до 100м²/г[30, с.632].

Електрофізичні властивості. Варіювання параметрів процесу термообробки дає можливість отримати ВВ з питомим електроопором від 10⁻¹ до 10¹⁶ Ом.см, тобто від матеріалів з майже металевою електропровідністю до напівпровідників та ізоляторів[2, с.5; 9, с.543; 30, с.632; 31, с.5]. Питомий електричний опір вуглецевих тканин коливається від 0,3 до 10¹² Ом.см.

Утомлені властивості. Наявність у ВВ шарової упаковки атомів вуглецю і малої еластичності волокон обумовлюють низьку стійкість ВВМ до повторно змінних навантажень порівняно з арамідними і оксалонітовими волокнами[8, с.56; 15, с.5; 34, с.253; 47, с.5; 51, с.5]. Разом з тим приводяться дані[2, с.5], що при циклічному навантаженні ВВ зміннюються. Цей ефект пояснюється процесом локальної пластичної деформації і релаксації внутрішніх напружень.

Нанесення на ВВМ політетрафторетилену приводить до підвищення міцності при втомленні в десятки тисяч разів[3, с.161, 8, с.56].

Термостійкість і хемостійкість. Як і всі вуглецеві матеріали, ВВМ при підвищених температурах схильні до окислення киснем повітря і іншими газовими окислювачами або деструкції в інертній атмосфері. Згідно[17, с.5], температури початку окислення ВВ дорівнюють – 675 К на повітрі, – 970 К у водяній парі, – 1170 К в атмосфері СО₂.

Максимальна температура експлуатації ВВМ в атмосфері повітря для частково карбонізованих ВВ дорівнює 470-520 К, для карбонізованих – 570-620 К, для графітованих – 670-930[2, с.5, 28, с.259].

Стойкість до окислення при тривкій експлуатації значно підвищується при обробці ВВМ політетрафторетиленом[8, с.56]. Фторування ВВ знижує температуру початку окислення на повітрі і деструкцію в азоті на 150-200 К[13, с.2].

За хемостійкістю ВВМ відносяться до найбільш інертних матеріалів: довготривала дія світла, погоди, води, 5-30%-вих розчинів НСl, Н₂SO₄, HNO₃, KOH, H₃PO₄ при температурі 295 К зменшує міцність ВВ не більше, як на 40%[8, с.56; 28, с.259]. Найбільший вплив на міцність ВВ спостерігається від дії 15-30%-вих концентрацій H₃PO₄. З підвищенням температури чутливість ВВ до сильних окисників зростає.

Термостійкість і хемостійкість ВВМ залежать від КТТ, структури, стану поверхні, попередньої обробки та інших факторів. Найбільшу стійкість мають ВВ з більш досконалою структурою ВВ,

які отримані із ГЦ, більш стійкі і розкладаються при окислюванні з меншою швидкістю, ніж на основі ПАЦ[2, с.5].

Електрофізичні властивості. Графітовані ВВ мають низьке перенапруження виділення водню, яке близьке за величиною до перенапруження графіту і порівнюване з перенапруженням заліза, нікелю і кобальту[5, с.37; 7, с.5; 9, с.543; 14, с.52; 27, с.217; 33, с.5].

Радіаційна стійкість. ВВ стійкі до випромінювання високих енергій і радіовипромінювання: після обробки γ -випромінюванням дозою 500 Мрад при 293-473 К на повітрі ВВ зберігають 76-88% початкової міцності і модуля пружності[29, с.18; 31, с.5].

Антифрикційні властивості вуглецевих волокон досліджені в роботах[48, с.5; 49, с.176, 67, с.2517]. При малих навантаженнях за схемою перехрещених циліндрів[67, с.2517] спостерігається стрибкоподібне тертя ВВ, сила статичного тертя ВВ непропорційно збільшується з підвищенням нормального навантаження від $5 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ Н. При цьому коефіцієнт тертя дуже швидко зменшується від 7,0 до 0,8.

Стрибкоподібне тертя ВВ авторами[67, с.2517] пояснюється не мікросореткістю 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, стрибкоподібне тертя кварцевих, скляних, сталевих і аліфатичного поліаміду волокон по ВВ; значне збільшення контактного електричного опору на початку ковзання; збільшення коефіцієнта тертя в ~ 2 рази після окислення волокон (тому що при цьому оголюються краї кристалів з високою поверхневою енергією); збільшення коефіцієнта тертя в ~ 2 рази при переході від графітованих до карбопізованих волокон, збільшення нормального тяжіння волокон і сили тертя при проходженні електричного струму (оскільки через високий електричний контактний опір у зоні контакту виникають високі температури, які підсилюють зв'язки площин кристалітів).

Імовірно, 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 $N = 10^{-9}$ Н у 10 разів більша, ніж розрахункова. В області навантажень $N \geq 10^{-1}$ Н коефіцієнт статичного тертя майже не залежить від нормального навантаження і дорівнює 0,05[67, с.2517].

Згідно даних роботи[37, с.736], коефіцієнт тертя вуглецевих і скляних волокон дорівнює 0,25 і 0,8 відповідно.

1. Адсорбционные свойства углеродистых волокинистых материалов/ А.И. Бабер, Н.В. Ковалева, Г.А. Мишина, Л.П. Семенова// Хим. волокна. - 1977. - №1. - С.54.

2. Азарова М.Т. и др. Углеродные волокна и композиционные материалы на их основе/ М.Т. Азарова, Т.Н. Козиорова, В.О. Горбачева – М.: НИИТЭХИМ, 1977. – 37 с.
3. Варшавский В.Я. Композиционные материалы на основе углеродных волокон// Химия и технология высокомолекулярных соединений: Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1977. – Т.9. – С.161.
4. Влияние бора на формирование структуры высокомолекулярных углеродных волокон/ А.С. Фиалков, В.А. Михайлова, Н.В. Полякова, Е.Д. Гурвич// Механика полимеров. – 1973. - №3. – С.533.
5. Влияние свойств поверхностей углеродных волокон на физико-механические характеристики карбопластиков/ О.А. Новикова, В.П. Сергеев, В.Ф. Литвинов и др.// Пласт. массы. – 1980. - №11. – С.37.
6. Влияние температуры термической обработки на структуру и свойства углеродных волокон/ Л.П. Кобец, Д.К. Хакимова, Л.А. Голикова, Н.В. Полякова// Механика полимеров. – 1976. - №5. – С. 1036.
7. Волокнистые композиционные материалы/ Пер. с англ. Г.С. Петелиной, И.Л. Светловой; Под ред. С.З. Бокштейна. – М.: Мир, 1967. – 284 с.
8. Графитированная ткань/ В.Г. Морозов, Н.М. Черненко, А.Т. Каверов, Г.А. Сиренко// Применение синтетических материалов. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1975. – С.56
9. Исикава Т. Углеродные волокна// Хемэн. – 1970. – Т.8. – №9. – С.543.
10. Исикава Т., Тэраниси Х. Композиционные материалы, упрочненные углеродными волокнами// Нихон фукуо дзайре гаккайси – 1976. – Т.2. - №2. – С. 65
11. Исследование адсорбционных свойств углеродных волокон/ А.И. Бабер, Л.Л. Дембург, А.В. Киселев и др.// Химия твердого топлива. – 1971. - №2. – С. 149.
12. Исследование физико-механических углеродных волокон при повышенных температурах/ Г.Е. Мостовой, Н.Н. Дергунов, Ю.Н. Работнов, Ю.П. Ануфриев// Механика полимеров. – 1977. - №4. – С. 626.
13. Исследование фторированных углеродных волокон/ Л.П. Ко-бец, М. А. Чубарова, Д.К. Хакимова и др.// Механика композитных материалов. – 1981. - №1. – С. 2
14. Каверов А.Т., Морозов В.Г., Паталах И.И. Углеродные волокнистые материалы и углепластики//

- Конструкционные углеграфитовые материалы в цветной металлургии/ Под общ. ред. В.П. Соведова, Г.А. Соккера. – М.: Цветметинформация, 1970, - С. 52.
- 15 Карбоцепные синтетические волокна/ Под ред. Е.Е. Перенел-кина – М.: Химия, 1973 – 589 с.
 16. Карпинос Д.М., Олсйник В.И. Полимеры и композиционные материалы на их основе в технике. – Киев: Наукова думка, 1981 – 180 с.
 17. Каррол-Порчинский Ц.З. Материалы будущего/ Пер. с англ. под ред Н.В. Михайлова. – М.: Химия, 1966. – 239 с.
 - 18 К вопросу об озучении процесса превращения углеродных волокон при высоких температурах/ Н.М. Черненко, В.Г. Морозов, А.Т. Каверов, С.Д. Федосеев// Применение синтетических материалов. – Кишинев: Картя Молдавенияскэ, 1975. – С. 52.
 - 19 К вопросу о зольности углеродных волокон/ Н.М. Черненко, В.Г. Морозов, А.Т. Каверов, С.Д. Федосеев// Применение синтетических материалов. Кишинев Картя Молдавенияскэ, 1975. – С. 47
 20. Кириченко В.И., Сиренко Г.А., Кириченко Л.М. Получение и работоспособность антифрикционных материалов с медным наполнителем// Вопросы химии и химической технологии. – 1991. - Вып. 94 – С. 113.
 21. Кобец Л.П., Гунаев Г.М. Карбоволокниты// Пластики конструкционного назначения /реактопласты// Под ред. Е.Б. Тростянской. – М.: Химия, 1974. – С. 204.
 22. Кобец Л.П., Гунаев Г.М., Терентьева Л.М. Свойства металлизированных углеродных волокон и армированных ими пластиков// Авиационные материалы. – 1977 - №2 – С. 88
 23. Кобец Л.П. Исследование стабильности физико-механических свойств углеродных волокон// Механика полимеров. – 1975. - №3. – С. 430.
 - 24 Кобец Л.П. Исследование стабильности физико-механических свойств углеродных волокон// Механика полимеров – 1975. - №6. – С. 1005.
- Кобец Л.П., Мостовой Г.Е., Тимошина Л.Н. К вопросу о термостабильности и механических свойствах углеродных волокон// Механика композитных материалов – 1982. - №3. – С. 547.
- 25 С. 547.
 26. Композиционные материалы: В 8т./ Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Машиностроение, 1978. – Т.3: Применение

- композиционных материалов в технике/ Под ред. Б. Нотона; Пер. с англ. Б.Р. Горобец, Т.В. Девятко. – 1978. – 511 с.
27. Конкин А.А. Жаростойкие углеродные волокна// Термостойкие и негорючие волокна. М.: Химия, 1978. – С.217.
28. Конкин А.А., Коннова Н.Ф. Механические и физико-химические свойства углеродных волокон// Журн. Всесоюз хим. общества им. Д.И. Менделеева. – 1978. – Т.23. - №3. - С.259.
29. Конкин А.А. Свойства и области применения углеродных волокон// Тез. докл. I Всесоюз. конф. по композиционным полимерным материалам и их применению в народном хозяйстве, 1-3 окт 1980 г. – Ташкент, 1980. – Т.1. – С.18.
30. Конкин А.А., Коннова Н.Ф. Углеродные волокна// Журн. Всесоюз хим. общества им. Д.И. Менделеева – 1972 Т.17. - №6. – С.632.
31. Конкин А.А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. – М.: Химия, 1974. – 376 с
32. Конструкционные материалы и изделия на основе углерода Каталог-справочник/ Сост.: М.А. Авдеенко и др – М.: Металлургия, 1970 – 64 с.
33. Конструкционные материалы: В 8т/ Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Машиностроение, 1978. - Т.4: Композиционные материалы с металлической матрицей/ Под ред. К. Крейдера; Пер. с англ. под ред. К.И. Портного 1978. – 503 с.
34. Кудрявцев Г.И., Жмаева И.В. Органические волокна армирующие материалы// Журн. Всесоюз хим. общества им. Д.И. Менделеева. – 1978. – Т.23. - №3 – С.253.
35. Молчанов Б.И. и др. Композиционные материалы на основе углеродных волокон и полимерной матрицы/ Б.И. Молчанов, А.В. Захаров, С.В. Котомкин, - М.: НИИТЭХИМ, 1979. – 55 с.
36. Нисимура А., Сибата Н. Ткани из углеродного волокна и характерные свойства пластиков, армированных тканями// Кеке пурасуттикусу. – 1973. – Т. 19. - №12. – С.529.
37. Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справочник пособие/ Под ред. Г.С. Каца, Д.В. Милевски; Пер. с англ. С.В. Бухарова, С.Г. Кулик и др.; Под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1981. – 736 с.

Перепелкин К.Е., Геллер А.Б., Варшавский В.Я. Исследования термического расширения модифицированных углеродных

- 38 волокон// Механика композитных материалов. – 1981 - №1. – С. 134.
39. Перепелкин К.Е. Сравнительная оценка теоретической, предельно достижимой прочности и жесткости ориентированных слоистых структур// Физико-Хим. механика материалов. – 1972. - №2. – С. 73.
- 40 Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. – М.: Химия, 1985. – 208 с.
41. Перепелкин К.Е., Геллер А.Б. Температурные деформации углеродных волокон// Механика композитных материалов. – 1980. - №2. – С. 350.
42. Перов Б.В. Термопласты, наполненные волокнами// Термопласты конструкционного назначения/ Под ред. Е.Б. Тростянской. – М.: Химия, 1975. – С. 187.
- 43 Портной К.И. и др. Структура и свойства композиционных материалов/ К.И. Портной, С.Е. Салибеков, В.М. Чубаров. – М.: Машиностроение, 1979. – 255 с.
44. Разрушение однонаправленных углепластиков и реализация в них прочностных свойств волокон/ В.П. Тамуж, М.Т. Азарова, В.И. Бондаренко и др.// Механика композитных материалов – 1982. – №1. – С. 34.
45. Реализация свойств углеродоволокнистых наполнителей в композите/ Ю.Г. Корабельников, В.М. Бондаренко, А.П. Ши-ряев и др.// Механика композиционных материалов. – 1980. - №6. С. 963.
46. Сиренко Г.А. Антифрикционные карбопластики. – К.: Техніка, 1985. – 195 с.
47. Сиренко Г.А. и др. Антифрикционные термостойкие полимеры/ Г.А. Сиренко, В.П. Свидерский, В.Д. Герасимов, В.З. Никонов. – К.: Техника, 1978. – 246 с.
48. Сиренко Г.О. Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термостійких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. ...доктора техн. наук: 05. 16. 06. – К.: Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ, 1997. – 431 с.
- 49 Сиренко Г.А. Трение и износ углеродных волокон и углепластиков// Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. «Триботехника и антифрикционное материаловедение» - Новочеркасск: РИО Новочерк. Политех. Ин-та, 1980. - С. 176.

50. Современные композиционные материалы/ Под ред. Л. Браут-мана, Р. Крока; Пер. с англ. Г.С. Петелиной, В.Н. Грибкова и др.; Под ред. И.Л. Светлова. – М.: Мир, 1970. – 672 с.
51. Соколов Л.Б. и др. Термостойкие ароматические полиамиды/ Л.Б. Соколов, В.Д. Герасимов, В.М. Савинов, Б.К. Беляков. – М.: Химия, 1975. – 256 с.
52. Сопротивление сдвига композитов на основе вискеризованных волокон/ Г.М. Гунаев, И.Г. Жигун, Т.Г. Сорина, В.А. Якушин// Механика полимеров. – 1973. – №3. – С. 492.
53. Способы получения и свойства углеродных волокон/ В.Е. Ко-тина, А.А. Конкин, В.О. Горбачева, Н. Ф. Ерофеева// Хим. волокна. – 1969. – №6. – С. 65.
54. Тарнопольский Ю.М. Современные тенденции развития волокнистых композитов// Механика полимеров. – 1972. – №3. – С.541.
55. Тверская Л.С., Кореньков Г.Л. Углеродные волокна// Хим. промышленность за рубежом: Обзорная информация М.: НИИТЭХИМ, 1972. – Вып.1 – С.3.
56. Термостойкие волокна арамид ПМ// Хим. волокна. – 1969 – №5. – С.66.
57. Термостойкие волокна фенилон// Хим. волокна. – 1968. – №6. – С.72.
58. Термостойкое полиамидное волокно сульфон-Т// Хим. волокна. – 1969 – №4. – С.78.
59. Термостойкое полиамидное волокно терлон// Хим. волокна. – 1972. – №6. – С.20.
60. Термостойкое полиоксадиазольное волокно оксалон// Хим. волокна. – 1971. – № 2. – С.64.
61. Тиканиси Кунио. Волокнистые материалы для армирования пластмасс. Углеродное волокно// Коге дзайре. – 1981. – Т.29, №5. – С.29.
62. Углеродные волокна и их применение/ К. Фудзимура, М. Хая-си, М. Хипо и др.// Сумитомо кагаку. – 1981. – №2. – С.3.
63. Углеродные волокна/ С Симимура, А Синдо, К. Коцука и др.; Под ред. С. Симамуры. Пер. с япон. Ю.М. Товмасына. – М.: Мир, 1987. – 304 с.
64. Углеродные волокнистые материалы/ А.А. Конкин, М.Т. Аза-рова, Н.С. Волкова и др.// Хим. волокна. – 1977. – №3. – С.65.

- 65 Фридман Л.И., Морозова А.А., Перлин В.А. Получение, свойства и применение углеродных волокнистых адсорбентов// Хим. волокна. – 1977. - №1. -- С.11
66. Shmidt D.L. Plastics rainforced by carbon fibers// Chemical Eng. Progress. – 1962. – Vol.10. – P.42.
- 67 Roselman I.C., Tabor D. The friction of carbon fibers// J. Phys. D Appl Phys. – 1976 – Vol9, N17. – P 2517.

Svidersky V.P., Fedorischin O.I. Analysis review of science and engineering on characteristics of antifriction fiber- carbon reinforced plastics.1 Carbon fibers.

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, rediation-resistant, antifriction-resistant and different specific characteristics of carbon fibers are studied.Litr. 67.