

Г.О. Сіренко, Ю.Д. Пахомов

Антифрикційні властивості карбоволокнитів та карботекстолітів (огляд)

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна, e-mail: orijant@gmail.com*

У роботі зроблений огляд за результатами досліджень впливу орієнтаційних ефектів на антифрикційні властивості карбопластика та механізму зношування односпрямованих карбопластиків. Анізотропія властивостей однонаправлених волокнитів і текстолітів має місце при всіх схемах досліджень.

Ключові слова: карбонові волокна, інтенсивність зношування, композиційний полімерний матеріал, схеми армування шаруватих композитів.

Стаття постуила до редакції 30.08.2013; прийнята до друку 15.12.2013.

Вступ

1. Схеми армування шаруватих композитів та їх контактування зі спряженими поверхнями.

1.1. Для шаруватих композитів необхідне введення чотирьох літер: перша і друга літери позначають орієнтацію шару волокон відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно; третя і четверта – орієнтацію волокна шару відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно [1-4].

Так, сполучення індексів **RRRR** характеризує схему армування композиту з короткими волокнами, які хаотично розташовані в просторі. Такий композит можна виготовити, якщо до зразка не прикладати спрямоване зусилля формування [1-4].

1.2. Шаруваті композити з хаотичним розташуванням коротких або довгих волокон у шарі можна виготовити також при спрямованому зусиллі формування відносно шарів. Наприклад, при пресуванні композицій короткі волокна розташовуються хаотично в шарі, який перпендикулярний зусиллю пресування. Такі схеми реалізуються при армуванні матриці вуглецевим або синтетичним папером.

Для таких композитів можливі три схеми армування (тут літера **R** вказує на випадковий кут нахилу волокон відносно поверхні тертя і вектора швидкості) [1-4]:

LLLR – шари волокон спрямовані паралельно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**), а самі волокна шару – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і не мають певної спрямованості до вектора швидкості (**R**);

NNRR – шари волокон спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**N**), а

самі волокна хаотично розташовані відносно поверхні тертя (**R**) і вектора швидкості (**R**);

NLRR – шари волокон спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і паралельно вектору швидкості (**L**), але самі волокна не мають певної орієнтації відносно поверхні тертя (**R**) і вектора швидкості (**R**).

1.3. Для односпрямованих шаруватих композитів, які виготовляють із стрічок, можливі такі схеми армування [1-4]:

LLLL – шари волокон стрічки спрямовані паралельно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**), а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**);

LLLT – шари волокон стрічки спрямовані паралельно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**), а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і прямовисно вектору швидкості (**T**);

NLLL – шари волокон стрічки спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і паралельно вектору швидкості (**L**), а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**);

NNLT – шари волокон стрічки спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**N**), а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і прямовисно вектору швидкості (**T**);

NNNN – шари волокон стрічки спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**N**), а самі волокна – прямовисно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**N**);

NLNN – шари волокон стрічки спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і паралельно вектору швидкості (**L**), а самі волокна – прямовисно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**N**).

1.4. Для шаруватих композитів на тканинній основі (текстолітів) необхідно введення шести літер для позначення схем армування: перша і друга літери позначають орієнтацію шару тканини відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно; третя і четверта літери – орієнтацію волокна основи тканини відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно; п'ята і шоста літери – орієнтацію волокна підткання відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно. Таким чином, позначення схем армування для текстолітів читаються так [1-4]:

NNLT(NT) – шари тканини спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**N**), волокна основи тканини – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і прямою висно вектору швидкості (**T**), а волокна підткання – прямою висно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**T**);

NLLL(NT) – шари тканини спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і паралельно вектору швидкості (**L**), волокна основи тканини – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**), а волокна підткання – прямою висно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**T**);

NNNN(LT) – шари тканини спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**N**), волокна основи тканини – прямою висно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**N**), а волокна підткання – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і прямою висно вектору швидкості (**T**);

NLNN(LL) – шари тканини спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (**N**) і паралельно вектору швидкості (**L**), волокна основи тканини – прямою висно поверхні тертя (**N**) і вектору швидкості (**N**), а волокна підткання – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**);

LLLL(LL) – шари тканини спрямовані паралельно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**), волокна основи тканини – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і прямою висно вектору швидкості (**T**), а волокна підткання – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**);

LLLL(LT) – шари тканини спрямовані паралельно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**), волокна основи тканини – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і вектору швидкості (**L**), а волокна підткання – рівнобіжно поверхні тертя (**L**) і прямою висно вектору швидкості (**T**).

I. Вплив орієнтаційних ефектів на антифрикційні властивості карбопластика

Автори [5-7] пояснюють відмінності у зносостійкості полімерів, наповнених вуглецевими волокнистими матеріалами (ВВМ), які містять вуглецеві волокна типу високоміцних (НТ) та високомодульних (НМ) тим, що графітовані волокна НМ мають самозмашувальні властивості. Графітовані волокна діють як резервуар вуглецю, який під час тертя та зношування легко відокремлюється від поверхні

волокна незалежно від їх орієнтації відносно металеві суміжної поверхні тертя і бере участь у механізмі мащення [8, 9].

Під час дослідження антифрикційних властивостей карбопластиків авторами [5, 7, 10] використані різні схеми контакту полімерний зразок – металеве контртіло: «площина-площина», «циліндри навхрест», «циліндр-площина», «циліндр-циліндр», «вал-напів-вкладка», «сфера на площині», «голка-диск» або «голка-кільце» тощо. Зміна схеми контакту приводить до збільшення інтенсивності зношування на один порядок [5, 7]. Використання різних схем контакту та умов випробувань було виправдано, бо автори [6, 7, 11] прагнули максимально наблизити умови досліджень до реальних умов роботи реальних вузлів тертя. Але під час аналізу результатів досліджень виникають суттєві труднощі, особливо під час порівняння результатів за оцінкою зносостійкості матеріалів з однонаправленими волокнами та шарами тканини відносно поверхні тертя і напрямку ковзання.

Встановлено [10], що інтенсивність зношування карбопластиків суттєво залежить від орієнтації волокон і шарів тканини відносно поверхні тертя і вектора швидкості ковзання.

У роботі [12] подані матеріали, що детально описують вуглецево-волокнисті композити, у тому числі на основі полімерної, металеві та вуглецевої матриць та гібридні композити. Також у даному дослідженні схематично розглянуто вплив технологічної обробки, властивості та застосування кожного типу матеріалу.

Анізотропія властивостей однонаправлених волоконитів і текстолітів має місце за всіма орієнтаційними схемами досліджень. Для більшості з них зберігається орієнтаційне співвідношення за коефіцієнтом тертя та інтенсивністю зношування. Але для певної частини досліджень зміна схеми випробувань карбопластиків приводить до зміни орієнтаційних співвідношень, при цьому важливу роль грає кількість волокон в композиті та в контактних шарах матеріалу [10-22].

У цих дослідженнях не врахована орієнтація волокон основи і підткання тканини, стрічки, не врахована орієнтація волокон тканини відносно поверхні тертя та вектора швидкості ковзання, відсутні дані, які дозволяють вибрати оптимальну схему армування.

Єдиного погляду на вплив температури, часу (шляху) тертя, нормального та питомого навантаження на зразок тертя та швидкості ковзання (зсуву, поступу, обертання, коливання) на орієнтаційне співвідношення карбопластиків за зносостійкістю та коефіцієнтом тертя не виявлено [23]. Так, за даними [11] анізотропія будови зразка тертя найбільш різко виявляється у початковому періоді ковзання. І, навпаки, за даними [21] із збільшенням шляху (часу) тертя анізотропія армування проявляється більш суттєво.

У роботі [24] досліджувався вплив осьового розтягування зразків на такі показники односпрямованого вуглецевого волокна армованого полімеру, що входять до складу систем ламінату, як об'ємний

вміст волокна, однорідність волокна, обсяг порожнин та зміни цих показників за товщиною ламінату.

У роботі [25] досліджувався вплив високих контактних тисків на поверхню динамічного контакту пари карбопластика та двох різних за твердістю алюмінієвих стопів. Було встановлено, що інтенсивність зношування композиційних матеріалів залежить від кривини поверхні та орієнтації армуючих волокон карбопластика, при цьому у роботі зазначається, що контактний тиск має більший вплив на зношування композиту, коли напрямок вектора швидкості ковзання є паралельним орієнтації армуючого волокна в композиті у порівнянні з випадком, коли волокна в площині контакту перпендикулярні напрямку вектора швидкості ковзання.

Під час дослідження антифрикційних властивостей односпрямованих карбопластиків вибрані відносно малі нормальні навантаження на зразок (від 1,5 до 20 Н), що не дозволяє зробити повний аналіз впливу навантаження на зносостійкість зразків карбопластиків [11]. Використання під час тертя та зношування навантажень на зразок у широкому діапазоні дозволило би виявити вплив орієнтації волокон та шарів тканин на антифрикційні властивості карбопластиків. Вплив навантаження на інтенсивність зношування під час постійного і змінного руху більш суттєвий, ніж на коефіцієнт тертя. Анізотропія розташування волокон у композиті виявляється під час малих питомих навантажень [11], а за даними [26] збільшення навантаження веде до різкого зростання зносу і суттєвого збільшення впливу орієнтаційних ефектів на зносостійкість. За даними [11] зміна величини навантаження не приводить до порушення орієнтаційних співвідношень.

У роботі [27] досліджена залежність інтенсивності зношування композитів від орієнтації армуючих вуглецевих волокон по відношенню до напрямку вектора швидкості ковзання. Було експериментально визначено, що серед трьох напрямків орієнтації вуглецевих волокон (0° ; 45° ; 90°) волокна з орієнтацією за 45° показали найкращі результати зносостійкості. За 0° ; 90° ; 45° орієнтації, показники були такими: 0,3; 0,2; 0,15. Відповідно це свідчить про те, що орієнтація вуглецевого волокна в композиті за 45° є найбільш зносостійкою.

Збільшення зносу карбопластиків із зростанням швидкості ковзання автори [28] пояснюють зростанням температури фрикційного контакту і, відповідно, руйнацією адгезійних зв'язків волокно-матриця у полімерному композиті.

Метою дослідження [29] було вивчення змін у мікроструктурі односпрямованого композиту вуглець/вуглець (C/C) під час витягування за кімнатної та високих температур. Були зроблені розрахунки напруження зсуву, яка виникає на міжфазній межі вуглецеве волокно – матриця під час усадки полімерної матриці за процесом її піролізу до стану вуглецю.

Суттєвим недоліком багатьох проведених досліджень є недотримання постійного теплового поля в процесах тертя та зношування. Підвищення температури в зоні контакту за рахунок тепла тертя приводить до неможливості порівняння результатів експе-

риментів різних дослідників. Температура вносила суттєві зміни у величини зносу і коефіцієнти тертя карбопластиків. Різниця цих результатів також пов'язана з різними схемами та умовами досліджень.

Під час зростання концентрації волокон типу НТ до 50 об.% вплив анізотропії карбопластика на зносостійкість карбопластика проявляється в меншій мірі [5, 26]. Знайдено, що для композитів з волокнами типу НТ зростання об'ємної частки вуглецевих волокон збільшує зносостійкість, а для композитів із волокнами типу НМ спостерігається зворотня залежність [11] або зносостійкість мало змінюється [14].

II. Механізм зношування односпрямованих карбопластиків

Механізм зношування карбопластиків пояснюється [30] з позиції руйнування адгезійних зв'язків «волокно-матриця», яке має місце для волокон з малим подовженням під час розтягу, пружно деформованими та орієнтованими у напрямі **NN**. Але ця теорія не пояснює орієнтаційних ефектів впливу на зносостійкість і коефіцієнта тертя **LL** і **LT** – напрямків армування.

Механізм зношування однонаправлених карбопластиків пояснюють також зароджуванням розколин у глибині поверхневого шару, їх переміщенням по поверхні і відшаруванням пластинчатих частинок під дією нормальних і тангенціальних сил [31]. Тут теорія зношування металів відшаруванням [32] розповсюджена на результати зношування карбопластиків.

Дослідження [33] присвячено ортогональній обробці односпрямованого вуглецевого волокна, яким був армований полімерний композит. В основі даної роботи – експериментальні дослідження та чисельне прогнозування якості технологічної операції під час ортогональної обробки різноорієнтованого волокна. В роботі [33] представлені результати експериментальних досліджень, що стосуються прогнозування розшарування композиту. Ці результати є важливими для прогнозування терміну служби композитного матеріалу.

Теоретична модель, що описується в роботі [34], була розроблена, щоби пояснити механізм видалення матеріалу, утвореного під час абразивного зношування полімерних композиційних матеріалів, що армовані скловолокном. Автор [34] зазначив, що більша частина зовнішньої поверхні композиту, включно з експериментально зробленими вигинами на ній, бере участь у зношуванні. Ймовірнісну модель поведінки композиційного матеріалу під час зношування було побудовано на основі експериментальних даних. За допомогою даної моделі було визначено ймовірності розриву зв'язку на межі матриця – волокно та розраховано міжфазні порушення на межі волокно – матриця.

Композити на основі термореактивних смол і ВВ типу НТ і НМ чутливі до високих локальних навантажень і високих швидкостей деформацій, які викли-

кають крихкий злам матриці і волокон [35]. Процес низького тертя та зношування карбопластиків пояснюють [36] ефектом рівнонапруженого стану контакту, переносячи ідею [37] утворення роликів кочення з відокремлених плоских частинок із базисної поверхні графіту під час зношування на карбоволокнистих. Ця ідея експериментально не підтверджена, крім того, волоконна форма вуглецю має турбостратну структуру, яка відрізняється від кристалічної структури блочного графіту. У роботі [38] механізм тертя та зношування графіту пояснюють ефектом фізичної адсорбції конденсуючих речовин на базисній поверхні графіту, концентрації цих молекул у точках фрикційного контакту та роз'єднання його у певних точках контакту шорстких поверхонь.

Автори [39] доводять, що на залежність зношування карбопластиків на основі термореактивних смол і 30-50 об.% ВВ типу НТ і НМ від температури мало впливає природа контртіла і його шорсткість поверхні, а зношування визначається хімічною активністю вуглецевих волокон і станом поверхні тертя.

У роботі [40] містяться результати випробування композитних матеріалів, що армовані волокном, та описано методи випробування їх на зношування за різноманітними системами, розглядаються мікроеханічні дослідження розшарування композитів і мікроеханічні статистичні моделі композиту під час зношування при сталій і змінній механічній нарузі.

На сьогодні існує обмежена кількість робіт, що присвячена вивченню впливу природи і шорсткості спряженої поверхні на антифрикційні властивості орієнтованих карбопластиків. Так, автори [28] прийшли до висновку, що початковий процес зношування карбопластиків визначається шорсткістю спряженої поверхні, причому для карбопластиків, армованих вуглецевими волокнами типу НТ, знос на порядок вищий, ніж для волокон типу НМ. Із збільшенням шляху тертя інтенсивність зношування і шорсткість спряженої поверхні зменшуються. У роботі [41] показано, що проміжна контактна плівка збільшує зношування крихких і зменшує зношування пластичних полімерів.

У роботі [42] досліджений механізм зношування деталей з різних типів металу (алюміній, сталь, латунь, титан) під час тертя в контактній площині – площині, з епоксидними композитами, що армовані вуглецевим волокном, скловолокном та арамідним волокном. Було встановлено, що зміна армуючого матеріалу впливає на механізм зношування. Так, уламки скловолокна та вуглецевого волокна з епоксидного композиту у вигляді порошку діють як абразивний матеріал і збільшують тертя, на відміну від м'яких уламків арамідного волокна. Встановлено, що абразивна дія уламків, у вигляді порошку, є більш шкідливою для спряжених поверхонь м'якого металу (алюміній, латунь) у порівнянні зі сталлю та титаном.

Кореляції між зносом, швидкістю та інтенсивністю зношування і коефіцієнтом тертя однонаправлених карбопластиків не виявлено [15, 32]. Знайдено, що зносостійкість карбопластиків залежить від модуля пружності, міцності під час розтягування, міжшарової міцності композитів [26]. У роботі [17] не

знайдено кореляції між інтенсивністю зношування та твердістю, міцністю та відносною деформацією під час розтягування.

Адгезія проміжної контактної плівки залежить від абразивності ВВ до спряженої металевої поверхні [43]. Композити з карбонізованими волокнами типу НТ або не утворюють на контртілах проміжних контактних плівок, або такі плівки носять нерегулярний характер. Тому, за короткий час тертя ВВ змінюють шорсткість спряженої поверхні до оптимальної за рахунок її зношування і поліровки [5, 44]. Навпаки, зношування композитів з графітованими ВВ типу НМ, які менш абразивні, ніж ВВ типу НТ [45], у значній мірі залежить від вихідної шорсткості спряжених поверхонь. Шорсткість поверхні металічного контртіла є домінуючим чинником у визначенні ступеня зношування карбопластиків не тільки на початку, але й у кінці процесу тертя, шорсткість поверхні контртіла створюється самим композитом [46].

У роботі [47] негативно оцінюють утворення рівної шорсткої поверхні контртіла від абразивної дії ВВ. Досліджено [48], що вода і водні розчини чинять опір утворенню проміжної контактної плівки на спряжених поверхнях, у той же час ці плівки утворюються з органічних рідин і продуктів зношування матриці. Шорсткість і природа спряженої поверхні визначають зношування карбопластиків у рідинах, причому вплив шорсткості металевого контртіла на це зношування більший в органічних рідинах, ніж у воді і водних розчинах та при терті без мащення, що пов'язують з корозійними процесами.

У роботах [3, 4] детально описані схеми армування зразків карбопластиків та карбоволокнитів і карботекстолітів, контактування їх із суміжними металевими поверхнями тертя. У роботах [3, 4] досліджено вплив схем армування волокнистими вуглецевими матеріалами полімерних композитів та схем контактування зразків таких композитів з поверхнею металевого контртіла на інтенсивність зношування пари тертя та на зміну параметрів мікрошорсткості металевої поверхні. Показано, що топографія поверхні металевого контртіла змінюється в процесі тертя карбопластиків з орієнтованими волокнами, але розподіл висот та кривин вершин мікронерівностей поверхні тертя значно віддалений від гавсовського розподілу і наближений до релеєвського.

Висновки

1. Інтенсивність зношування карбопластиків суттєво залежить від орієнтації вуглецевих волокон, шарів тканини та текстильної форми вуглецевих волокнистих матеріалів відносно поверхні тертя і вектору швидкості ковзання. Анізотропія властивостей однонаправлених волокнитів і текстолітів має місце за всіма схемами досліджень. Для більшості з них зберігається орієнтаційне співвідношення за коефіцієнтом тертя і зносу. У цих дослідженнях не врахована орієнтація волокон основи і підткання тканини або стрічки відносно поверхні тертя та швидкості

ковзання, відсутні дані, які дозволяють вибрати оптимальну схему армування карбокомпозиту.

2. Процеси зношування карбопластиків залежать від шляху (часу) тертя, навантаження і швидкості ковзання. Єдиного погляду на вплив часу (шляху) тертя на орієнтаційне співвідношення за зносостійкістю та коефіцієнтом тертя не виявлено. Суттєвим недоліком багатьох проведених досліджень є недотримання постійного теплового поля в процесі тертя. Підвищення температури в зоні контакту за рахунок тепла тертя приводить до неможливості порівняння результатів експериментів різних авторів. Температура вносить суттєві зміни у величини зносу і коефіцієнти тертя карбопластиків. Різниця цих результатів також пов'язана з різними схемами та умовами досліджень, при цьому невраховані величини і напрямки шорсткості контактних поверхонь відносно орієнтації волокон і вектора швидкості, різними

формами зразків та нестационарності теплового поля поверхні тертя.

3. Механізм зношування карбопластиків пояснюється з позицій: руйнування адгезійних зв'язків «волокно-матриця» в композиті, зароджуванням розколин та тріщин у глибині поверхневого шару, їх переміщенням по поверхні і відшаруванням пластинчастих частинок графітованих волокон під дією нормальних і тангенціальних сил, ефектом рівнонапруженого стану контакту, ефектом фізичної адсорбції конденсуючих речовин на базисній поверхні графіту, концентрації цих молекул у точках фрикційного контакту.

Сіренко Г.О. – академік Академії технологічних наук України, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії;
Пахомов Ю.Д. – аспірант кафедри неорганічної та фізичної хімії.

- [1] G.O. Sirenko, V.P. Sviders'kij, L.Ja. Midak, O.S. Drobot, Problemi tribologii 2, 63 (2004).
- [2] G.O. Sirenko, L.Ja. Midak, V.P. Sviders'kij, O.S. Drobot, L.V. Karavanovich, Fizika i himija tverdogo tila 6(2), 317 (2005).
- [3] L.M. Soltis, G.O. Sirenko, L.Ja. Midak, Visnik Prikar. nac. un-tu im. Vasilja Stefanika. Serija Himija HI, 95 (2011).
- [4] G.O. Sirenko, L.Ja. Midak, L.M. Soltis, Ju.D. Pahomov, Matematichni metodi v himii i biologii 1(2), 55 (2013).
- [5] J.P. Giltrow, J.K. Lancaster, Wear 16(5), 359 (1970).
- [6] L. Eliezer, C.H. Romage, H.G. Rylander, R.H. Flowers, M.F. Amateau, Wear 49(1), 119 (1978).
- [7] T. Tsukizoe, N. Ohmae, Tribol. International 8(4), 171 (1975).
- [8] I.C. Roselman, D. Tabor, J. Phys. D. Appl. Phys. 9(17), 2517 (1976).
- [9] J.K. Lancaster, Tribology International 12(2), 65 (1979).
- [10] J.P. Giltrow, J.K. Lancaster, Nature 214(5093), 1106 (1967).
- [11] T. Tsukizoe, N. Ohmae, Industrial Lubrication and Tribology 28(1), 19 (1976).
- [12] D.L. Deborah, Carbon fiber composites (Washington, 1994).
- [13] T. Tsukizoe, N. Ohmae, Proc. Intern. Conf. on Wear of Materials (St. Luis, Amer. Soc. Mech. Eng, 1977), r. 518.
- [14] T. Tsukizoe, N. Ohmae, Trans. ACME, 99 Ser. F(4), 401 (1977).
- [15] J.C. Roberts, ASLE Trans 28(4), 503 (1985).
- [16] E. Minford, K. Premo, Wear 102(3), 253 (1985).
- [17] L. Chang, K.E. Tempelmeyer, P.K. Davis, Composites 16(2), 90, 127 (1985).
- [18] E. Filzer, W. Fritz, A. Gkogkidis, Sprech-soal 119(6), 463 (1986).
- [19] M. Antonicelli, J. Lepage, D. Paulmier, Microsc. Aspects Adhes. and Lubr. Proc, 34 Int. Meet. Soc. Chim. Physique (Amsterdam, 1981, 1982), r. 617.
- [20] J.K. Lancaster, British J. Appl. Phys. (J. Phys. D.), Ser. 2, 1(5), 549 (1968).
- [21] Z. Elizer, V.D. Kxanna, M.F. Amateau, Wear 51(3), 169 (1978).
- [22] N. Ohmae, K. Kobayashi, T. Tsukizoe, Wear 29(3), 345 (1974).
- [23] Tabasu Tsukizoe, Nobuo Ohmae, Frict. and Wear Polym. Compos 205 (1986).
- [24] J.J. Ricca, R.M. Jurta, Quantitative microstructural analysis of unidirectional carbon fiber reinforced polymer composites. Microstructural Characterization of composite cross section. Chap. 1, Defense technical information center, 40 (1990).
- [25] A. Al-Mayah, K. Soudki, A. Plumtree, ASTM International 14, 166 (2003).
- [26] J. Metals and Mater. 2(5), 285 (1968).
- [27] K. Friedrich, A.K. Schlarb, Tribology of polymeric nanocomposites (Elsevier, 2008).
- [28] D. Play, M. Godet, Colloques Internationaux du C. N. R. S., Polimeres et Lubrification (233), 413 (1975).
- [29] R. Zaldivar, Failure modes of a unidirectional ultra-high-modulus carbon-fiber / carbon-matrix. Aerospace corporation el segundo ca technology operations 16 (1998).
- [30] E. Rabinowicz, Friction and wear of materials (Willey, New York, 1965).
- [31] Nak-Ho Sung, Nam P. Suh, Wear 53(1), 129 (1979).

- [32] N.P. Suh, *Wear* 5(A), 5 (1974).
- [33] G. Chennakesaveiu, Orthogonal machining of unidirectional carbon fiber reinforced polymer composites. Department of mechanical engineering, 80 (2010).
- [34] B. Majumdar, N. Chand, S. Neogi, Probabilistic model of three body abrasive wear mechanism in FRP Composite. *Macromolecules new frontiers. Macro'98* (1998).
- [35] Scott Betts, John Dackow, Frank Murray, *ASLE Proc. 2nd Int. Conf. Solid. Lubr. (Denver Colo., Park Ridge, 1978)*, Chap 111, r. 195.
- [36] A.A. Kut'kov, A.V. Borodaj, S.N. Andreev, *Trenie, iznos i smazka* 295, 100 (1974).
- [37] J. Spreadborough, *Wear* 5(1), 18 (1962).
- [38] N.F. Hahalin, V.G. Vasil'ev, V.K. Fandeeva, L.A. Rusanova i dr. *Vlijanie grafita na svojstva antifrikcionnyh jepoksidnyh kompozicij. Sintez, svojstva i metody issledovanija reakcionosposobnyh oligomerov* (Moskva, Himija, 1985).
- [39] J.P. Giltrow, *ASLE Trans* 16(2), 83 (1973).
- [40] B. Harris, *Fatigue in composites. CRC Press LLC* (2003).
- [41] J.K. Lancaster, *Proc. Inst. Mech., Engrs. – 7th Tribogy Group Convention (Gothenburg, Sweden, 1969)*, Shap 12.
- [42] O. Jacobs, K. Friedrich, K. Schulte, *ASTM special technical publication* 43(4), 81 (1992).
- [43] T.S. Colling, *Composites* 5(3), 42 (1974).
- [44] J.P. Giltrow, J.K. Lancaster, *Soc. Chem.Ind. – 3rd Conf. on Industrial Carbons and Graphite (London, 1970)*, r. 483.
- [45] J.P. Giltrow, J.K. Lancaster, *International Conference on Carbon Fibres, Their Composites and Applications (Plastics Institute, London, 1971)*, Shap. 31, p. 251.
- [46] A.E. Hollander, J.K. Lancaster, *Wear* 25(2), 155 (1973).
- [47] J.K. Lancaster, *ASLE Proc. 2nd Int. Conf. Solid. Lubr. (Denver. Colo, Park Ridge, 1978)*, p. 176.
J.K. Lancaster, *Wear* 20(3), 315 (1972).

H.O. Sirenko, Yu.D. Pakhomov

Antifriction Properties of Carbon Fibers and Carbon Textiles (Review)

*Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str.,
Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, , e-mail: orijant@gmail.com*

By results of researches of influence orientational effects on the antifriction properties of carboplastic and mechanism of wear of unidirectional carboplastics have been made a review. Anisotropy of properties of unidirectional fibers and textiles occurs in all schemes of research.

Keywords: carbon fibers, the intensity of wear, composite polymer material, reinforcing of layered composites schemes.