

# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

## ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

### ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ В'ЯЖУЧИХ

**БУРЯ Олександр Іванович** – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

**СРЬОМІНА Катерина Андріївна** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Науково – дослідної частини кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

**ЛИСЕНКО Олександр Борисович** – доктор фізико – математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

**КОНЧИЦЬ Андрій Андрійович** – доктор фізико – математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України.

**МОРОЗОВ Олександр Федорович** – доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник Науково – дослідної частини Національного університету біоресурсів і природокористування України.

#### РЕФЕРАТ

Кам'янське – 2019

**Актуальність роботи.** Стратегія розвитку світової хімічної промисловості в третьому тисячолітті характеризується бурхливим ростом індустрії полімерних матеріалів (ПМ), основними напрямками якої являється покращення якості полімерів та методів їхньої переробки, створення нових пластиків, а також розширення областей їхнього застосування.

Основними виробниками композиційних матеріалів (КМ) в світі є Китай (28%), США (22%) і Європейський Союз (14%). Приваблива перспектива світового і вітчизняного попиту на КМ підтверджується, наприклад, даними Міжнародного союзу з теоретичної та прикладної хімії: обсяг світового ринку КМ за 2017 рік склав 14,9 млн. т. із прибутком для виробників більш як 25 млрд. доларів США. Зокрема, в Японії з 2013 року інноваційно-технологічний розвиток є однією з ключових областей, що визначає головні завдання уряду і всіх його відомств щодо створення сприятливих умов для економічного зростання і соціального прогресу. Аналогічні комплексні цільові програми розроблено і в США, Китаї та Росії. Їхньою метою є отримання КМ економічних з точки зору виробництва і витрат сировинних ресурсів, які мають необхідну міцність та інші функціональні властивості для використання в автомобіле- і літакобудуванні, промисловості та житловому будівництві, в якості конструкційних матеріалів, які не забруднюють навколишнє середовище, безпечні, не токсичні і т.д.

За виробництвом композитів Україна поки що не входить у світі до країн лідерів, але має всі інноваційні розробки і технологічні підстави різко змінити своє місце у цьому рейтингу. Розвиток сучасних галузей вітчизняної промисловості, нових технологій і техніки вимагає створення нових поколінь конструкційних і композиційних матеріалів і підтверджує актуальність даної роботи. На Україні, в поточному сторіччі, неможливо обійтись без розробки та впровадження нових типів КМ на основі термопластичних в'язучих. Це потребує проведення систематичних науково-дослідницьких та технологічних робіт, спрямованих на:

- забезпечення КМ підвищеними зносо-, тепло- і термостійкістю;
- використання потенційних можливостей КМ з наявних видів ПМ шляхом їхньої модифікації, наповнення або армування різноманітними наповнювачами (Нп);
- створення виробів з КМ шляхом оптимізації їх технологічних параметрів та виявлення умов, при яких компоненти КМ при сумісній роботі у виробі здатні надати синергетичного ефекту.

**Метою представленої роботи** є розробка науково-технічних основ створення та впровадження високоефективних і надійних конструкцій і виробів з полімерних композитів нового покоління на основі термопластичних в'язучих, які перевершують зарубіжні аналоги за техніко-економічними показниками і можуть бути використані при модернізації машин і механізмів, у тому числі й спецтехніки. Для досягнення означеної мети необхідно вирішити цілу низку наукових, технологічних та впроваджувальних задач. Зокрема:

- визначити оптимальний склад КМ та дослідити їхні теплофізичні, фізико-механічні та трибологічні властивості;
- виконати комплексні дослідження впливу хімічного складу та ступеня наповнення на надмолекулярну структуру і характеристики КМ;

- встановити особливості процесів зношування конструкцій і виробів з розроблених КМ на основі термостійкого поліаміду;
- виконати аналіз ефективності розроблених технологій промислового виробництва конструкцій і виробів з КМ;
- сформулювати технологічні вимоги до триботехнічних матеріалів для вузлів тертя машин та механізмів, у тому числі й для спецтехніки;
- здійснити дослідно-експериментальне та промислове впровадження високоефективних і надійних конструкцій та виробів з полімерних композитних матеріалів (ПКМ) нового покоління на основі термопластичних в'язучих.

**Об'єктом досліджень** є ПКМ на основі термопластичних в'язучих та високоефективні та надійні конструкції і вироби з КМ нового покоління.

**Предметом досліджень** – оптимізація властивостей нових КМ на основі термопластичних в'язучих та технологічних параметрів впровадження високоефективних і надійних конструкцій і виробів з КМ нового покоління.

**Методи досліджень.** Під час досліджень було застосовано методи математичного моделювання, лабораторних та експериментальних випробувань триботехнічних і фізико-механічних характеристик КМ, методи сучасної прикладної термодинаміки, технологічне конструювання.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше виявлено основні закономірності впливу вмісту, природи, міцності, модуля пружності, температури термічної обробки волокна на характеристики армованих пластиків. Показано, що найбільше зниження інтенсивності лінійного зношування і коефіцієнту тертя досягається при збільшенні розривної міцності армуючих органічних волокон до 40 гс/текс (для плавких термопластів) і 60 гс/текс (для термостійких полімерів). Знайдено, що для досягнення оптимального комплексу триботехнічних та фізико-механічних характеристик вміст армуючого волокна буде тим менший, чим ближче за природою до в'язучого воно знаходиться.

2. Вперше показані особливості взаємодії вуглецевих волокон (ВВ), що містять металеві нанoelementи (Me-ВВ), з полімерною матрицею, що дозволило створити вуглепластики (ВП) підвищеної зносостійкості, міцності, вогнестійкості. За впливом на покращення перелічених властивостей волокна розміщуються у наступний ряд: Mg-ВВ, Al-ВВ, Zn-ВВ, Sn-ВВ, Fe-ВВ, Cu-ВВ, Pb-ВВ.

3. Вперше показано, що в металополімерах метали суттєво впливають на міжмолекулярні водневі зв'язки амідних і кінцевих аміногруп полімеру, а також на взаємодію з  $\pi$ -електронами бензольних кілець, карбамідних і ангідридних груп, викликаючи появу іммонієвої структури і цис-орієнтацію молекул. Встановлено вплив фізичних й хімічних зв'язків між металевими частками та в'язучим на процеси структуроутворення розроблених КМ в залежності від природи та концентрації Нп, що дозволяє цілеспрямовано регулювати характеристики матеріалів.

4. Вперше досліджено кореляцію між механічними й парамагнітними характеристиками. Показано, що виявлене збільшення ширини ліній ЕПР у КМ у порівнянні з Нп відображає взаємодію підсистем полімер/Нп. Для Нп  $C_{60}$ ,  $C_{70}$ , фулеренової черні та сажі виявлено значний ефект відкачування зразків

( $T_{\text{відк.}}=293\div 473\text{ K}$ ) який корелює з інтенсивністю та формою ліній ЕПР, обумовлений взаємодією парамагнітних дефектів з молекулярним киснем. При цьому взаємодія підсистем полімер/Нп призводить до перетікання кисню з об'єму полімеру до кисень-дефіцитних станів нановуглецевого Нп. У порошках терморозширеного графіту (ТРГ) вперше спостерігався ефект НВЧ-поглинання, сила якого залежить від орієнтації часток ТРГ та середньої густини насипних об'ємних зразків.

**Практична значимість** одержаних результатів:

1. Створені новий метод армування, що забезпечує повний хаотичний розподіл волокна в полімерній матриці, та ряд КМ на основі аліфатичних та ароматичних поліамідів та різноманітних Нп – шаруватих, металічних, волокнистих – різних розмірів (від 5 мм до декількох нм) та форми (частки, волокна).

2. Вперше проведено системні дослідження впливу таких Нп, як шаруваті змащувачі, метали, наночастки, на триботехнічні характеристики композитів на основі ароматичних поліамідів. Знайдено, що максимальний ефект модифікації спостерігається при концентрації шаруватих змащувачів (графіт, дисульфід молібдену, нітрид бору, фторопласт Ф-4) 20 – 30 мас.%, металів (Al, бронза, Cu, Ni, Ti) 15 – 20 мас.%, наночасток (алмази, нанотрубки, фулерени) в кількості 2 – 3 мас.%. За ефективністю впливу на покращення трибологічних властивостей Нп розташовуються у наступні ряди:

графіт > фторопласт Ф-4 > дисульфід молібдену > нітрид бору;  
Ni > Al > Ti > бронза > Cu;

3. Встановлено, що ВП, армовані Me-BB, можуть бути нейтральними чи біологічно активними при їхньому використанні у різноманітних середовищах. Пригнічення чи стимуляція росту бактерій або еукаріотичних водоростей залежить як від складу КМ, так і від фізіологічного стану культури. Отримані дані дозволяють визначити найбільш оптимальний варіант складу композиту для їх застосування в різних областях науки, техніки і виробництві: від авіакосмічних (міжпланетні кораблі Фобос 1, Фобос 2), до медицини та спортивентарю.

4. Вперше отримано наукові знання стосовно електронних, феро- та парамагнітних властивостей передових ПКМ на основі фенілону С-2 та поліметилметаакрилату з нановуглецевими Нп. На атомно-молекулярному рівні описано властивості широкого класу нановуглецевих систем та КМ за їх участю, а також механізми взаємодії полімерної матриці з Нп.

**Науково-технічні результати. Технологія приготування композицій.** Одна з проблем отримання ПКМ – це правильна методика введення Нп. Основні способи отримання термопластичних КМ наступні: кабельний, екструзійний та в електромагнітному оберտальному полі. Найкращий розподіл волокна в полімерній матриці досягається в останньому випадку, у зв'язку з чим нами був розроблений спеціальний технологічний процес (рис. 1), що забезпечує рівномірний розподіл різаного волокна довжиною 2 – 3 мм в порошкоподібній матриці, заснований на змішуванні компонентів нерівноосними феромагнітними частками (відношення довжини до діаметру  $l/d=4\div 5$ ) в оберտальному електромагнітному полі (електромагнітна індукція становить 0,08 – 0,12 Тл). Час змішування складає 10 – 420 с.

Як видно з табл. 1, найкращі експлуатаційні характеристики досягаються при армуванні термопластів в обертальному електромагнітному полі. З використанням даного методу нами розроблено більше 60 марок органо- та вуглепластиків.

Таблиця 1. Порівняльні характеристики вуглепластиків на основі поліаміду-6, отриманих різними методами

Спосіб отримання вуглепластиків	$I_h \cdot 10^{-8}$	$f$	$T, K$	$pv, MPa \cdot m/c$
Зміщення компонентів в електромагнітному полі	0,2	0,21	324	2,0
Кабельний метод	0,73	0,23	327	1,8
2-х шнековий екструдер	0,87	0,24	339	1,5

де  $I_h$  – інтенсивність лінійного зношування;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $T$  – температура в зоні контакту;  $pv$  – фактор, що розраховується як добуток швидкості ковзання та навантаження.

Композити наповнені шаруватими змащувачами. Наповнення ароматичних поліамідів твердими шаруватими змащувачами призводить до зменшення коефіцієнта тертя й інтенсивності зношування КМ.

Таблиця 2. Вплив шаруватих змащувачів при оптимальному вмісті на механічні та трибологічні властивості композитів на основі фенілону

Вміст наповнювача, мас. %	Фенілон марки П					Фенілон марки С				
	$HB, MPa$	$\sigma_n, MPa$	$A, кДж/м^2$	$f$	$I_h, 10^{-8}$	$HB, MPa$	$\sigma_n, MPa$	$A, кДж/м^2$	$f$	$I_h, 10^{-8}$
Графіт	360	250	21	0,19	0,90	328	205	37	0,20	0,42
MoS <sub>2</sub>	360	260	22	0,25	5,8	350	200	33	0,25	4,5
BN	334	239	12	0,25	9	318	189	35	0,26	2,9
Ф-4	320	264	12	0,29	0,9	250	204	31	0,32	0,5

де  $HB$  – твердість;  $\sigma_n$  та  $A$  – межа плинності та робота руйнування при стисненні.

При цьому, присадкою, що забезпечує оптимальні триботехнічні характеристики, є графіт (табл. 2). За ефективністю впливу на покращення трибологічних властивостей шаруваті Нп розташовуються в ряд: графіт, фторопласт Ф-4, дисульфід молібдену, нітрид бору.

Металополімери. Метали суттєво впливають на міжмолекулярні водневі зв'язки амідних і кінцевих аміногруп полімеру, а також на взаємодію з  $\pi$ -електронами бензольних кілець, карбамідних і ангідридних груп, викликаючи появу іммонієвої структури і цис-орієнтацію полімерних молекул. Встановлено вплив фізичних й хімічних зв'язків між металевими частками та в'язучим на процеси структуроутворення розроблених КМ в залежності від природи та концентрації Нп, що дозволяє отримати ПКМ з покращеним комплексом фізико-механічних та трибологічних властивостей. За інтенсивністю впливу на зносостійкість метали розташовуються в ряд: нікель, алюміній, титан, бронза, мідь. При цьому, введення Ni покращує зносостійкість полімеру у 11 разів.

Органопластики (ОП). При створенні ОП вибір органічного волокна визначався, з одного боку, його міцнісними властивостями, з іншого – хімічною

спорідненістю до полімерної матриці.

Вивчення впливу міцності армуючих волокон на триботехнічні характеристики ОП на основі поліамідів (табл. 3) показало, що найбільше зниження інтенсивності лінійного зношування і коефіцієнта тертя досягається при збільшенні розривної міцності до 40 гс/текс (для плавких термопластів) і 60 гс/текс (для термостійких полімерів). Подальше збільшення міцності волокон практично не впливає на трибологічні властивості ОП. При цьому, для досягнення оптимального комплексу триботехнічних та фізико-механічних характеристик вміст армуючого волокна буде тим менший, чим ближче за природою до в'язучого воно знаходиться. За ефективністю впливу на покращення експлуатаційних характеристик армуючі волокна можна розташувати ряд: Русар-С, Терлон, Внівлон, Арімід-Т, Лола, Сульфон-Т, Оксалон.

Таблиця 3. Триботехнічні характеристики органопластиків на основі поліаміду-6

Армуюче волокно	Вміст мас.,%	Інтенсивність зношування, $10^{-8}$	Температура в зоні контакту, К	Коефіцієнт тертя
немає	-	81,80	413	0,67
Арімід-Т	30	0,42	416	0,57
Внівлон	45	0,28	358	0,38
Лола	15	1,10	397	0,60
Оксалон	45	1,61	395	0,68
Сульфон-Т	30	1,25	380	0,47
Терлон	45	0,20	346	0,23

Вуглепластики. Для створення ВП на основі фенілонів використовували поліакрилонітрильні – (ПАН) і гідратцелюлозні – ГЦ вуглецеві волокна. Дослідження трибологічних властивостей (табл. 4, 5) свідчить, що наявність продуктів зношування в зоні тертя впливає на зношування ВП на короткому проміжку шляху тертя ( $l = 6$  км), приблизно рівному шляху, на якому спостерігається стабілізація коефіцієнта тертя ВП. Дані порівняльних випробувань дають підставу вважати, що найкращою зносостійкістю володіє ВП на основі поліметафеніленізофталаміду (фенілон П).

Таблиця 4. Вплив полімерного в'язучого на зношування вуглепластиків, мг

фенілон П	фенілон С-1	фенілон С-2	Продукти зношування
1,5	2,6	2,2	не прибирались
1,2	2,0	1,8	прибирались

Таблиця 5. Різниця значень зношування вуглепластиків ( $\Delta m_1 - \Delta m_2$ )

в залежності від шляху тертя

$l$ , км	2	4	6	8	10
$\Delta m_1 - \Delta m_2$ , мг	0,11	0,19	0,25	0,25	0,25

З табл. 6 видно, що на зношування ВП найбільш сильно впливає зростання модуля пружності волокна до 300 МПа, подальше його збільшенні (у  $\approx 2$  рази) змінює зношування незначно, а міцність та еластичність при цьому знижуються.

Таблиця 6. Фізико-механічні характеристики вуглепластиків

Характеристики вуглепластиків	Волокно (модуль пружності), ГПа			
	гідратцелюлозні		поліакрилонітрильні	
	Углен-9 (15÷18)	Грален-2 (30÷45)	Евлон (100÷140)	Конкор-1 (150÷220)
Твердість за Бринелем, МПа	273,5	273,9	259,1	269,1
Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>	26,8	25,8	30,5	23,1
Інтенсивність зношування, 10 <sup>-8</sup>	0,20	0,31	0,81	0,30
Коефіцієнт тертя*	0,23	0,25	0,33	0,23

\*Примітка. Триботехнічні характеристики визначали при  $p=1$  МПа та  $v=1$  м/с.

Малонаповнені композити на основі фенілону. Модифікування фенілону тугоплавкими нітридокремнієвими наповнювачами в ультрадисперсному стані з високорозвиненою поверхнею можна розглядати як процес, що сприяє структурній перебудові в самому полімері в присутності наповнювача. Встановлено, що для досягнення оптимального комплексу властивостей кількість наповнювача не повинна перевищувати 5 мас.%, причому  $\beta$ -сіалон більш істотно впливає на покращення фізико-механічних властивостей та зносостійкості, а оксинітрид – на покращення теплофізичних характеристик та зниження коефіцієнта тертя.

Електронні та магнітні властивості нановуглецевих матеріалів та їх полімерних композитів. Вивчено електронні властивості вихідних полімерів, особливістю яких є наявність дефектних станів у полімерних ланцюжках, а також суперпарамагнітних наночастинок оксидів заліза у фенілоні технологічного походження. З'ясовано електронні властивості порошкоподібних мікрота наноструктурованих наповнювачів, а саме: фулеренів  $C_{60}$  і  $C_{70}$ ; фулеренової черні та сажі; наноалмазів детонаційного походження та ультрадисперсних алмазів; вуглецевих волокон, металізованих Ni і Cu; багатостінних вуглецевих нанотрубок типу "Тауніт"; графіту та терморозширеного графіту; шунгіту; наночастинок магнетиту ( $Fe_2O_3$ ). Встановлено, що їх електронні властивості можна класифікувати за параметрами складу, структури та характеристик дефектних станів. Крім того, на електронні властивості нановуглецевих наповнювачів істотно впливає їх взаємодія з киснем повітря.

Композити другого та третього покоління. Перспективним напрямком поліпшення властивостей КМ є створення на їх основі КМ другого покоління з використанням гібридних в'язучих або гібридних Нп. Наприклад, використання гібридного Нп, що включає до свого складу ультрадисперсний оксинітрид кремній-ітрію (ОКІ) і ВВ забезпечує КМ високі фізико-механічні властивості. КМ на основі фенілону, що містять гібридний Нп складу: ОКІ (1 мас.%) + ВВ, з поверхнею, модифікованою аміногрупами (17 мас.%) завдяки високим трибологічними властивостями можуть експлуатуватися в умовах тертя без змащення при  $pv < 8$  МПа м/с. При використанні суміші металовмісних ВВ, наприклад фосфоровмісне (7-25 мас.%) та фосфоросвінецьвмісне (10-15 мас.%) ВВ, відбувається зростання кисневого індексу до 83%, твердості до 340 МПа, зносостійкості до  $0,26 \cdot 10^{-8}$  та зниження коефіцієнту тертя з 0,27 до 0,09 до 0,09-0,11.

Модифікація ВВ аміно- та хлоргрупами призводить до покращення

всього комплексу експлуатаційних характеристик ВП на основі фенілону. Так, використання для армування модифікованого ВВ збільшує термостійкість фенілону на 15-268 град. Для підвищення термостійкості фенілону краще використовувати ВВ модифіковане аміно-групами, що пов'язано з тим, що NH<sub>2</sub>-групи, взаємодіючи з ароматичним циклом, посилюють жорсткість ланки полімеру за рахунок створення трьохмірної сітчастої структури. При цьому, в ідентичних умовах ВП у 4-21 рази більш зносостійкі та можуть ефективно експлуатуватися в умовах тертя без змащення при  $pv \leq 5,2$  МПа·м/с.

**Впровадження результатів роботи.** Ефективність нових ПКМ на основі термопластичних в'язучих була підтверджена експлуатацією їх в ущільнюючих елементах; підшипниках ковзання та шестернях; в сферичних шарнірах; безшумних тормозних колодках; деталях транспортувальних механізмів; у космічній техніці та літакобудуванні. У даний час фактичний ефект та обсяги впровадження КМ досягається шляхом широкого впровадження та використання розроблених авторами технічних умов (ТУ 6-06-31-423-83; ТУ 6-06-31-424-83; ТУ 0493679-21-85) з виробництва розроблених КМ, а також антифрикційних матеріалів на основі аліфатичних і ароматичного поліамідів в Дніпрі, Житомирі, Запоріжжі, Києві, Мелітополі, Сумах та ін. (Україна), Світлогорську ПО «Хімволокно», (Білорусь), Пекіні «Beijing orient king-tech Co., Ltd», Харбіні «Harbin TongDa Industrial Environment Protection Automation Co., Ltd» (Китай) та ін.



**Машини (металургійної, сільськогосподарської, переробної промисловості, транспорту).** У промисловості існує постійний попит на розроблені КМ, наприклад, деталі з ВП пройшли промислову перевірку у вузлах тертя трубопрокатних пілігримових станів і за 13 місяців проявили себе у 6-7 разів краще, ніж серійні бронзові підшипники; експериментальні підшипники, встановлені у вузлі тертя перших приводних роликів, біля робочої кліті стану (найбільш жорсткі температурні умови) пропрацювали 7 місяців, що перевищує строк служби бронзових у 5-6 разів; втулки, встановлені на пластинчаті ланцюги шлеперу (Маріупольський дослідно-експериментальний завод), без зауважень пропрацювали 2600-3000 г.

Доведено ефективність використання розроблених ВП у сільськогосподарському машинобудуванні для заміни деталей металевих сплавів, зокрема, у зернозбиральних комбайнах (напівпідшипник граблин соломонабивача, підбирача, соломотрясу, променя мотовила жатки; вічко шнека жатки), гичкота корнезбиральних машинах (підшипник ковзання підтримуючих роликів поздовжнього, поперечного та вивантажувального транспортерів; втулка запобіжної муфти системи приводу поздовжнього транспортера і транспортера очищувача; підшипник ковзання активних вилок копача) та дощувальних агрегатах ДДА-100 МА (сопло короткоструйних насадок водопровідних труб; втулка ущільнення приводу) та ін.



Прикладом використання розроблених КМ у сфері пасажирського транспорту може бути заміна бронзових втулок шкворня переднього моста тролейбусів на композитні. За результатами випробувань встановлено, що термін служби втулок з вуглепластика УПА-6-40 в середньому у 1,2-1,6 рази більше, а вартість у 2- 2,3 рази нижче порівняно з бронзовими. Це свідчить про економічну доцільність впровадження втулок з композитів у тролейбусних депо України.

Втулки з розроблених КМ були встановлені у підвіску спеціального колісного шасі армійського тягача МЗКТ-79221, на заміну бронзових аналогів. Це забезпечило можливість роботи без змащування, надійність управління і автономне функціонування в будь-яку пору року при температурі навколишнього середовища від 233 до 323 К, що свідчить про економічність і ергономічність впровадження даних матеріалів. В результаті дорожніх випробувань (пробіг склав понад 2200 км) встановлено, що помітного зазору між віссю і втулкою не виявлено, в той час як у аналогів він змінювався від 0,1 до 0,4 мм. Шарикопідшипники (кулі Ø 25,4+02) з розроблених ВП, були відправлені також на Житомирський бронетанковий завод для проведення випробувань у поворотному пристрої башти бронетранспортера і можливості заміни серійних деталей. Експериментальні деталі з ВП успішно пройшли 4 цикли стендових заводських випробувань, що дозволило їх рекомендувати для подальшого впровадження.

#### **Приладобудування (пневматичної автоматизації, медичне, космічне).**

Одним із об'єктів успішного застосування КМ являється використання їх у механізмі запирання ливарних машин. Завдяки полімерним композитним втулкам шарнір, розташований між плитами механізму запирання, має здатність релаксувати у місцях впливу критичних навантажень, внаслідок чого зусилля запирання інструменту рівномірно розподіляється на всі шарніри механізму запирання, а пара тертя «композит - сталь» добре працює в умовах тертя без змащення. Волокна, в яких реалізований хімічний зв'язок на межі поділу фаз ВВ – в'язуче, дозволяють розробити ВП перспективний для використання в якості полірувальника в технології полірування оптичних деталей. Дослідження біологічної сумісності ВП, армованих Me-BB (P, P-Pb, P-Fe, Sn, Al, Pb, Cu, Fe, Zn) показало, що вони можуть бути нейтральними, подавляти чи стимулювати ріст бактерій, що залежить від їх складу та фізіологічного стану культури. На розроблені КМ існує постійний попит у різних областях приладобудування: від авіакосмічних (міжпланетні кораблі Фобос 1, Фобос 2), до медицини.

**Оціночний економічний ефект** від відкритого нормативного стандартного використання розроблених авторами роботи КМ відповідно до ТУ 6-06-31-423-83; ТУ 6-06-31-424-83; ТУ 0493679-21-85 в машинах (металургійної, текстильної, сільськогосподарської, переробної промисловості, транспорту, целюлозно-паперового виробництва), приладобудуванні (оптичне, медичне, пневматичної автоматизації), оборонної сфери України (армійські тягачі, бронетранспортери) розрахований за офіційними статистичними даними України за період 2000 – 2018 років сумарно становить один млрд. дев'ять млн. вісімсот тис. грн.

Кількість публікацій: 20 монографій, 700 статей. За базою даних Scopus загальне число посилань на публікації авторів складає 128, h – індекс 5; відповідно до бази даних Google Scholar загальна кількість посилань – 742, h – індекс 11. Новизна та корисність технічних рішень захищена 19 патентами.

### **Основні висновки:**

1. Розроблено спосіб отримання прес-композицій, що складаються з термопласту та дисперсних чи волокнистих Нп в обертальному електромагнітному полі. Встановлено, що в якості робочого тіла слід використовувати нерівноосні феромагнітні частки з параметром  $l/d=4-5$ ; об'єм феромагнітних часток повинен бути в межах 0,04-0,05 від обсягу електромагнітного поля; величина електромагнітної індукції обертального електромагнітного поля повинна бути в межах 0,08-0,12 Тл; максимальний час змішування залежить від механічних характеристик Нп і не повинен перевищувати 270-380 с. З використанням розробленої технології отримані антифрикційні КМ на основі термостійких поліамідів, поліімідів, поліфенілхіноксалінів, рідкокристалічних поліамідів. Зазначені матеріали можуть з успіхом експлуатуватися в режимі сухого тертя ( $pv < 6$ ), при змащуванні водою ( $pv \leq 14$ ) і мастилом ( $pv \leq 30$  МПа·м/с).

2. Запропонована методика прогнозування інтенсивності лінійного зношування як функції умов випробувань (навантаження та швидкість ковзання). Ця методика заснована на використанні структурних характеристик і є універсальною характеристикою для описання процесу зношування, оскільки навіть у своєму найпростішому вигляді надає гарної відповідності експерименту, що свідчить про стійкість полімерної матриці до деформації зсуву.

3. Доведено, що електронні, феро- та парамагнітні властивості досліджених нановуглецевих КМ на основі ФС-2 та ПММА визначаються наявністю дефектних станів у полімерних ланцюжках, суперпарамагнітних наночасток – домішок оксидів металів, та локалізованих і делокалізованих електронних станів нановуглецевих Нп. Крім того, характеристики КМ залежать від особливостей взаємодії матриці з Нп та композиту загалом з оточуючим молекулярним киснем.

4. Результати роботи використовували при розробці технічних умов на «Композицію антифрикційну на основі поліаміду-6», «Композицію антифрикційну на основі поліаміду-12», «Антифрикційний матеріал Дніпролон марок 537УГ, 555УГГ, 573УГ, 5010 УГ» та «Матеріал антифрикційний Дніпролон». Розроблені за ТУ підшипники ковзання з розроблених композитів на основі термопластів пройшли широкі стендові, польові та промислові випробування в умовах ряду господарств України, та показали доцільність їх використання у різноманітних вузлах тертя машин та механізмів. Показано, що розроблені матеріали перевершують зарубіжні («Бізон» (Польща), «John Decke» (США)) та вітчизняні (бронза, бабіт, металокераміка, масляніт, тощо) аналоги. Економічний ефект від впровадження деяких розробок сягає більше одного млрд. п'ятнадцяти млн. семисот тис. грн.

(підпис) О.І. Буря

(підпис) К.А. Єр'оміна

(підпис) О.Б. Лисенко

(підпис) А.А. Кончиць

(підпис) О.Ф. Морозов