

УДК 621.893:678.073

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.176845

## Аналіз трибологічної ефективності рухомих спряжень "полімерно-композитні матеріали – сталь"

В. В. Аулін, О. Д. Деркач, Д. О. Макаренко, А. В. Гриньків, А. О. Панков, А. А. Тихий

*Проведено аналіз трибологічної ефективності спряжень "полімерних-композитних матеріалів – сталь". Оскільки неправильно підібрані матеріали з точки зору трибології дають значні експлуатаційні витрати. Тому вибір марки полімерно-композитних матеріалів для використання у конструкціях вузлів та деталей машин є завданням суттєвого підвищення їх технічного рівня.*

*Випробування зразків з полімерно-композиційних матеріалів на відносну абразивну стійкість в спряженні зі зразками сталі 45 дало можливість встановити, що найменше значення вагового зношування має матеріал Nylon 66. Найближчими за значеннями відносної абразивної стійкості з досліджуваних матеріалів до Nylon 66 має матеріал ПА-6-210КС, зі значеннями в 1,65 разів меншими. В експлуатації машин при наявності абразивного зношування доцільно використовувати спряження матеріалів "Nylon 66 – сталь 45" та "ПА-6-210КС – сталь 45". Результати триботехнічних досліджень без мащення на машині тертя СМЦ-2 спряжень "полімерно-композитний матеріал – сталь 45" дають можливість встановити, що найменше зношування має зразок з матеріалу УПА-6-30 – 0.00083 г. Найближчим до нього за зносостійкістю є зразок матеріалу PAG/6.6 R196-GF30, що в 6.1 раз більший за ваговим зносом. Зразок з матеріалу сталь 45 в спряженні зі зразком матеріалу УПА-6-30 має найнижче значення вагового зносу 0,00005 г. При цьому найнижче значення коефіцієнту тертя має спряження матеріалів "сталь 45 – УПА-6-30" – 0.163. Процес припрацювання найшвидше досягається з матеріалом УПА-6-30 після 20 хв. зі значенням температури в зоні тертя  $348 \pm 2$  К*

*Представлені дослідження необхідні для обґрунтування подальшої експлуатації та підбору полімерно-композиційних матеріалів для спряжень, що працюють у важких умовах. Дані дослідження представляють інтерес для виробників сільськогосподарської і кар'єрної техніки та різних транспортних машин*

*Ключові слова: полімерно-композитний матеріал, вагове зношування, сталь 45, спряження зразків, коефіцієнт тертя, відносна абразивна стійкість*

### 1. Вступ

Результати експлуатації сільськогосподарських машин в агрохолдингах різних виробників свідчать, що їх заявлена продуктивність значно відрізняється від реальної [1]. Виявлено також ряд значних конструктивних недоліків формування рухомих спряжень деталей. Основною причиною низької надійності машин і механізмів є використання у рухомих з'єднаннях деталей трибоспряжень матеріалу типу "сталь-сталь", які мають низький рівень трибологічної ефектив-

ності. Належний рівень їх працездатності забезпечують технічним обслуговуванням, передусім мащенням кожні 40...50 годин роботи. Невиконання цих вимог призводить до потрапляння абразиву в трибоспряження деталей й швидкому їх зношуванню в процесі експлуатації.

Забезпечення належного технічного стану рухомих з'єднань деталей машин обумовлюється, у першу чергу, високими їх триботехнічними характеристиками, тобто належним рівнем трибологічної ефективності.

В науково-технічній літературі про використання матеріалів для важко навантажених спряжень деталей зазначається, що в машинобудуванні найбільш перспективними з них для відповідних умов роботи в сільськогосподарському та транспортному виробництві є полімерно-композитні матеріали. На сьогодні недостатньо досліджено фізико-механічні та трибологічні властивості полімерно-композитних матеріалів для обґрунтованого впровадження їх в рухомі з'єднання деталей машин.

Для розв'язання завдань, пов'язаних із розробкою і дослідженням властивостей нових матеріалів цієї групи у рухомих спряжень деталей машин, є необхідність у доведенні експериментальної доцільності їх застосування з трибофізичної точки зору.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Використання полімерних композитів в різних галузях можливе через їх задовільні фізико-технічні характеристики. За експериментальними даними розроблено фізико-математичні моделі технологічної обробки композитного матеріалу [1]. Але в ній не розглянуто з триботехнічної точки зору вплив робочого середовища під час обробки на зміну фізико-хімічних властивостей робочих поверхонь матеріалів. Основними на даний час добавками до полімерних композитів є фулеренові наповнювачі. Вивчено вплив добавки фулеренової сажі в зоні тертя з робочою оливою на певні триботехнічні характеристики робочих поверхонь зразків трибосистеми "сталь – сталь" [2]. Однак автори не розглядали зміни характеристики трибосистем "сталь – полімерний матеріал".

Експериментально встановлено, що в полімерних композитах присутні ефекти масштабу наповнювачів, що характеризує покращену механічну поведінку армованих полімерних композитів, оскільки розміри частинок або волокон наповнювачів зазвичай знаходяться в мікрометричному діапазоні [3]. Тому варто додатково вивчити трибологічні характеристики композитів в спряженні з сталевими зразками з різними видами наповнювачів. Відповідні експерименти на армованих частинками полімерних композитах показали збільшення жорсткості при зменшенні розміру частинок наповнювача при його відповідному об'ємному вмісті [4]. Натомість не виявлено зміну характеристик та властивостей робочих поверхонь полімерних композитів в режимах сухого тертя. Формування високої зносостійкості та відповідних поверхневих характеристик металевих робочих поверхонь зразків можливо з додаванням композиційних добавок в робочу оливу [5]. В своєму дослідженні автори не досліджували вплив даних добавок в присутності абразивних частинок. Використання зносостійких та неактивних поверхневих шарів матеріалів трибоспряжень деталей дає можливість збі-

льшити термін експлуатації як окремих деталей, так і робочого середовища [6]. Але характеристики відносної абразивної стійкості досліджуваних елементів трибоспряжень не було виявлено. Для вивчення можливого зв'язку між розмірними ефектами в чистих полімерах і полімерних композитах було проведено серію досліджень [7]. Розмірні ефекти в композитах бажано розглядати виходячи з трибологічної точки зору, що дає можливість підібрати спряження матеріалів для конкретних умов експлуатації. На основі теорії пружності сформовано скінченно-елементний підхід до розв'язання завдань врахування ступеню деформації для прогнозування механічної поведінки композиційних матеріалів [8]. Автори не розглянули питання впливу зміни вмісту наповнювачів в композитному покритті та їх фізико-механічних характеристик на зміну ефективності рухомих спряжень матеріалів деталей під час експлуатації. Експериментальні результати, що відображають значні зміни полів температури і модуля пружності композитів та зафіксоване варіювання цих характеристик у напрямку кращих результатів зі зменшенням діаметра волокна наповнювача [9]. Бажано було б додатково розглянути ефективність готових композитів з цими наповнювачами в режимах рухомої контактної взаємодії, що змінює температурні режими. Результати ефективності використання мікророзмірних наповнювачів в полімерних армованих композитах з механічної точки зору [10] дає можливість їх використання при значних нормальних навантаженнях. Водночас, автори не уточнили зміну цих характеристик при навантаженнях на рухомі спряження даного виду матеріалів. Формування композиційних покриттів дає можливість збільшити зносостійкість спряжень деталей. Встановлено, що сформовані композиційні покриття створюють пружний шар, що знижує ступінь деформування в матеріалі деталей [11]. Бажано встановити закономірності впливу температурного поля на трибологічні характеристики рухомих спряжень деталей з композиційним покриттям. Проведене експериментальне дослідження коерцитивної сили робочих поверхонь деталей підтвердило зменшення накопичення руйнуючих напружень в приповерхневих шарах матеріалу деталі. Встановлено, що деякі полімери проявляють низькі термічні властивості, які можуть бути поліпшені шляхом додавання наноматеріалів графітових та графенових добавок [12]. Авторами не виявлені оптимальні умови їх використання. Вплив абразивних частинок на робочі поверхні спряжених деталей, створюють умови збільшення температурного режиму та умов шаржування твердих частинок [13]. Натомість, авторами не встановлено вплив розміру частинок зношування на стан полімерних матеріалів. Використання полімерних композитів дає можливість збільшити зносостійкість робочих поверхонь. На основі експериментальних досліджень розроблено модель для прогнозування механічної поведінки і реакції на пошкодження плоских зразків композитних матеріалів [14]. В той же час, авторами не виявлено закономірності впливу нормальних та тангенціальних напружень на зношування композитних матеріалів і їх покриттів.

Використовуючи наночастинки, можна отримати підвищення фізичних властивостей навіть при незначній кількості видів та вмісту добавок [15]. Тому важливо додатково розглянути закономірності трибофізичного впливу під час формування рухомих спряжень машин. Використання полімерів знайшло ши-

роке впровадження в керуючих органах посівної техніки, оскільки матеріали володіють незначною вагою і стійкі до корозії [16]. Додатково потрібно розглянути вплив абразивних частинок в робочій зоні тертя цих елементів. Збільшення функціональності композитів дає можливість використовувати різні наповнювачі та матриці на основі кераміки та силоксанових смол для отримання композиційних матеріалів на основі полікристалічного вуглецю [17]. Разом з тим, автори не встановили трибологічні характеристики даного виду матеріалу в різних спряженнях матеріалів. Використання методів сканування та аналізу розмірів частинок наповнювачів під час синтезу композитного матеріалу, дає можливість створити матеріал з заданими фізико-хімічними властивостями [18]. Авторами було розроблено композитні матеріали на основі хімічних технологій. Бажано було їх згрупувати за впливом неорганічних, органічних та біологічних порошків, використаних в якості наповнювача з поліакриламідом, на окремі властивості композитів. Полімерні композити використовуються для різних цілей в якості заміни металевих матеріалів, таких як сталь та чавун, завдяки їх підвищеній міцності при малій питомій вазі [19]. В роботі слід було встановити відносну абразивну стійкість досліджуваного композиту, щоб уточнити умови його використання. На основі досліджень реологічних характеристик, полів напруження і деформацій робочих органів з полімерними покриттями обґрунтовані нові методи вдосконалення механізму обробки технологічного середовища [20]. Разом з тим авторам не вдалося описати механізм зношування даного покриття за присутності вільних абразивних частинок. Низькі значення коефіцієнта тертя виявлені при визначенні впливу матриці з вмістом 10 % арамідних волокон на трибологічні властивості композитів [21]. Крім значених даних дослідження бажано було б провести із зразками сталі в режимі сухого тертя. Використання зносостійких полімерів слугує важливою нішою для проведення трибологічних досліджень на зміну характеристик композитів. Збільшення зносостійкості виявлено при використанні акрилонітрил бутадієн стиролі оксиду алюмінію [22]. Необхідно встановити температурні режими під час тертя в режимах сухого мащення. Виконання відпалу мідних проводів лазерним променем дає можливість виявити композиційні включення в основній матриці [23]. Автори не проводили дослідження триботехнічних характеристик опромінених зразків. Впровадження зеленої трибології сприяє розвитку біокомпозитів, що дає змогу використовувати природній матеріал з використанням вторинного матеріалу [24]. Бажано б було виконати порівняльний аналіз експериментальних результатів з промисловими композитами. Використовуючи методи внутрішнього тертя та оптичної мікроскопії виявлено композиційні включення після впливу лазерного променя, що дає можливість змінити фізичні властивості основного матеріалу [25]. Авторами не встановлено основні трибологічні характеристики отриманого матеріалу. Створення композитів на основі феритів та епоксидної смоли дає змогу змінити властивості матеріалу, такі як електропровідність та зносостійкість [26]. Також потрібно було розглянути можливості даного матеріалу в режимах роботи значної запиленості та абразивності. Значний вплив на зношування елементів і деталей ливарних машин під час формування полімерного композиту здійснює його матриця та наповню-

вач [27], що необхідно враховувати під час виробничого процесу. Крім цього, автори не розглядали і зміну технічних параметрів процесу лиття полімерного композиту на зношування деталей обладнання. Моделювання умов та параметрів під час формування композитів необхідно розглядати на основі методики "білої скриньки". Використання та опис даної методики сформовано для процесу транспортування [28], з деякими доопрацюванням її можливо адаптувати для автоматизації розрахунків технологічного процесу формування полімерних композитів. Останнім часом полімерні нанокompозити використовуються для виготовлення компонентів різних трибосистем [29]. Представленим коротким оглядом використання полімерних матеріалів для трибосистем машин не встановлено основні рекомендації їх використання в реальних режимах експлуатації. Впровадження композитів широко розповсюджене для елементів, вузлів і деталей в авіабудуванні, автомобілебудуванні та ін. галузях, оскільки ці матеріали володіють достатнім співвідношенням міцності та ваги, термічною стабільністю та хорошою стійкістю до окислення і корозії [30]. В той час не виявлено закономірності абразивної стійкості та ступінь припрацьованості досліджуваних композитів.

Для збільшення якості проведення експериментів, пов'язаних з формуванням композиту, автори провели мікромеханічне моделювання волокнисто-армованих композитів для визначення пружних властивостей гомогенізованого матеріалу [31]. Разом з тим, не враховано додаткові вихідні параметри такі як триботехнічні характеристики модельованого матеріалу. Формування рівномірного наповнювача полімерного композиту можливо за рахунок використання тканин на основі вуглецевих волокон в епоксидній матриці [32]. Дана композиція ефективна для використання в температурно-навантажених малорухливих трибоспряженнях, натомість автори не розглянули її можливості під час граничних режимів мащення з значною швидкістю тертя. Агрегат трансмісії має значний вплив на надійність транспортного засобу, оскільки його деталі працюють в знакозмінному навантаженні і зазвичай в діапазоні великих навантажень, що спричиняє швидкому виходу з ладу окремих деталей, виготовлених з композитних матеріалів [33]. Це можливо здійснити за рахунок впровадження окремих композиційних деталей, однак автори не розглянули полімерно-композитний вид матеріалу для забезпечення експлуатаційної надійності агрегату. Формування значної міцності полімерних композитів можливо з додаванням подрібненої яєчної шкарлупи в поліефіри [34]. Необхідним було б, визначити оптимальні концентрації цих добавок та максимальні значення триботехнічних характеристик досліджуваного композиту. Гарними трибологічними властивостями в якості наповнювача володіє базальт. Він забезпечує відмінними фізико-механічними властивостями, такими як твердість, міцність на стиск, колір і блиск полімерного композиту [35]. В той час, не досліджено вплив його вмісту на значення абразивної стійкості з сталевими зразками. Використовуючи програмний продукт HuprChem та метод квантово-хімічного моделювання, були проведені дослідження міжмолекулярних взаємодій між епокси-аміновою сіткою і оксидами різної хімічної природи  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $CaO$  [36], що дало змогу встановити значну їх хімічну стійкість. В той час автори не визначили

значення їх трибологічної ефективності в спряженні з металами. Збільшення безпеки на автомобільному транспорті можливо за рахунок використання композиційного матеріалу, що дає можливість підвищити рівень тріщиностійкості деталей та збільшити надійність досліджуваних трибосистем [37]. Автори не провели аналіз спроможності композитів на основі ультрадисперсних порошків вуглецю, для вирішення експериментального завдання. Експериментальне виявлення та оцінка теплових властивостей полімерних композитів з графеном може бути досягнута на основі диференціальних скануючих калориметричних тестів [38], що дає змогу уточнити умови експлуатації для даного виду композиту. Разом з тим, автори не враховували додатковий підігрів композиту під час протікання процесу тертя. При виборі необхідного композиту потрібно знати його характеристику зносостійкості в залежності від навантаження і швидкості ковзання. Було проведено дослідження для наступних типів матеріалів: сульфід поліфенілен+скловолокна (9:1) та сульфід поліфенілен+вуглецеве волокно+графіт (8:1:1) [39]. Виявлено, що дані матеріали є придатні для трибосистем з рідинним мащенням. Доцільним було провести дослідження на абразивну стійкість в режимах сухого мащення. Для забезпечення гарними характеристиками міцності та питомої ваги використовують композиційні сендвіч панелі [40], що є актуальним для ракетобудування та авіабудування. Дані матеріали легкі та витримують значні осьові навантаження. Авторам слід було виявити вплив даних композиційних конструкцій в трибологічних спряженнях, що може бути актуальним в машинобудуванні.

Переваги застосування полімерно-композитних матеріалів у порівнянні з традиційними металевими матеріалами є: виключення ефекту "кліну" – завдяки особливим трибологічним і міцнісним властивостями матеріалу, виявлений ефект перенесення, мінімальний знос металевих суміжних деталей трибоспряження.

Використання полімерно-композитних матеріалів є безумовно перспективним шляхом підвищення довговічності рухомих з'єднань деталей машин. Тому доцільним є для певних груп деталей виконати трибологічні дослідження на ефективність їх використання в жорстких умовах експлуатації, що можуть бути змодельовані в лабораторних умовах.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження є експериментальне визначення трибологічної ефективності спряжень сталевих і полімерно-композитних матеріалів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести дослідження спряжень матеріалів "сталь 45-полімерно-композитний матеріал" на відносну абразивну стійкість;
- визначити триботехнічні характеристики спряжень матеріалів "сталь 45-полімерно-композитний матеріал" на машині тертя СМЦ-2;
- з'ясувати вплив спряжених полімерно-композитних матеріалів на робочі поверхні сталевих матеріалів при терті на основі їх металографічних досліджень.

#### 4. Матеріали та методи трибологічних дослідження спряжень зразків "полімерно-композитних матеріалів – сталь"

Дослідження проводили на зразках, виготовлених з сталі 45 та полімерно-композитних матеріалів (ПКМ). Було взято шість марок високомолекулярних сполук з матеріалів, що мали зовнішній вигляд гранул чи кульок (рис. 1).

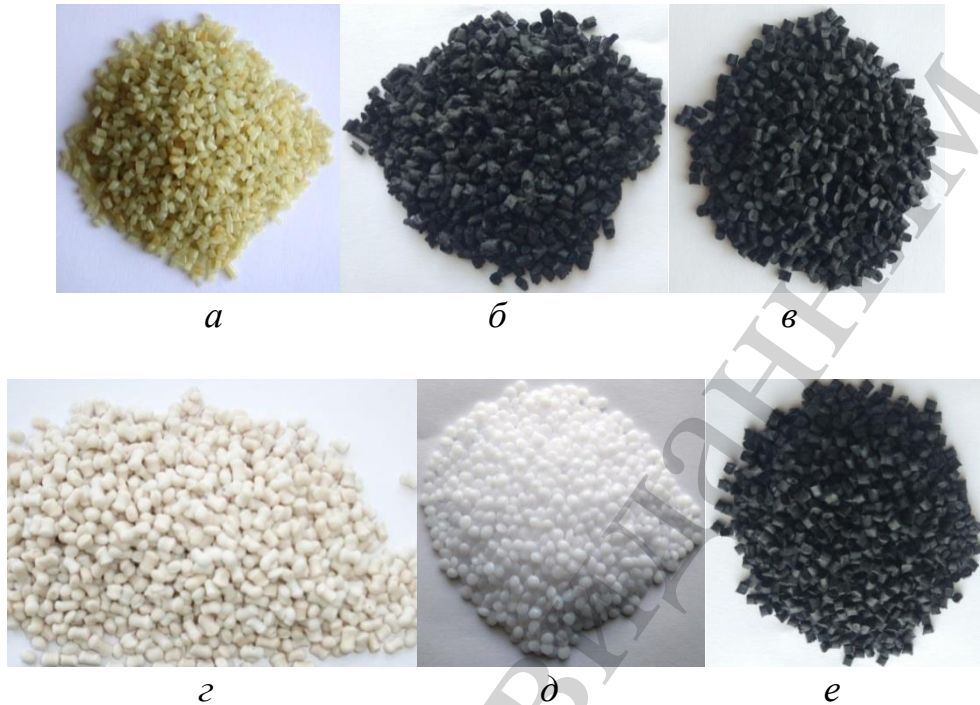


Рис. 1. Загальний вигляд гранул ПКМ обраних для експериментальних досліджень: *a* – Nylon 66; *б* – ПА-6-210КС; *в* – ПА6/6.6 R196-GF30; *г* – Kocetal GF705; *д* – Kocetal K300; *е* – УПА-6-30

Проведено умовне кодування обраних для дослідження матеріалів групи полімерів: Nylon 66 – № 1, ПА-6-210КС – № 2, ПА6/6.6 R196-GF30 – № 3; групи Kocetal: Kocetal GF705 – № 4, Kocetal K300 – № 5, УПА-6-30 – № 6.

Аналізуючи ці матеріали, можна зазначити: Nylon 66 є ненаповненим аналогом вітчизняного виробництва "Поліамід-6,6". ПА-6-210КС – склонаповнений полімерний композит на основі поліаміду 6. ПА6/6.6 R196-GF30 – полімерний композит на основі поліамідів 6 та 6,6 з додаванням скловолокна чорного кольору, можлива наявність технічного вуглецю. Kocetal GF705 та Kocetal K300 – група коцеталів з додаванням скловолокна. УПА-6-30 – вуглепластик на основі поліаміду 6 з додаванням гідратцелюлозного вуглецевого волокна марки "Урал-24ТМ".

Виготовлення зразків з полімерно-композитних матеріалів здійснювали методом лиття під тиском на ливарній машині ПЛ-32 (рис. 2), яка реалізовує необхідні технологічні операції виготовлення готових виробів. Перед завантаженням в машину матеріали мали вигляд циліндричних гранул довжиною 2...4 мм, і діаметром 2 мм.



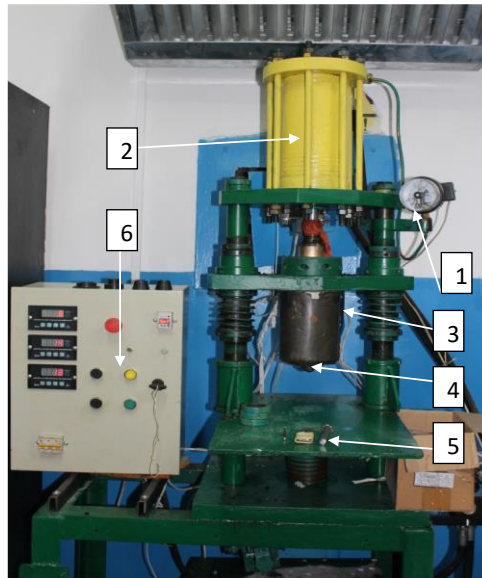


Рис. 2. Ливарна машина ПЛ-32: 1 – манометр; 2 – гідроциліндр; 3 – нагрівальна камера; 4 – сопло; 5 – платформа; 6 – пульт керування

Технологія виготовлення експериментальних зразків і деталей полягала в наступному. Вихідний матеріал засипали в нагрівальну камеру 4, що мала температуру розплаву матеріалу (підбір виконувався експериментальним шляхом). Температуру в нагрівальній камері контролювали за допомогою термопари. Контроль тиску лиття здійснювали за допомогою манометра 1, який встановлено в гідроциліндрі 2. Управління виконували з шафи керування 6. Задану температуру підтримували в межах  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Відливання розплаву матеріалу у прес-форму, що розміщується на платформі 5 здійснювали через сопло 4 з діаметром отвору 4 мм.

Виготовлені зразки для дослідження на абразивну стійкість мали лінійні розміри  $53 \times 29 \times 7$  мм, що відповідало ГОСТ 23.208-79 (рис. 3).

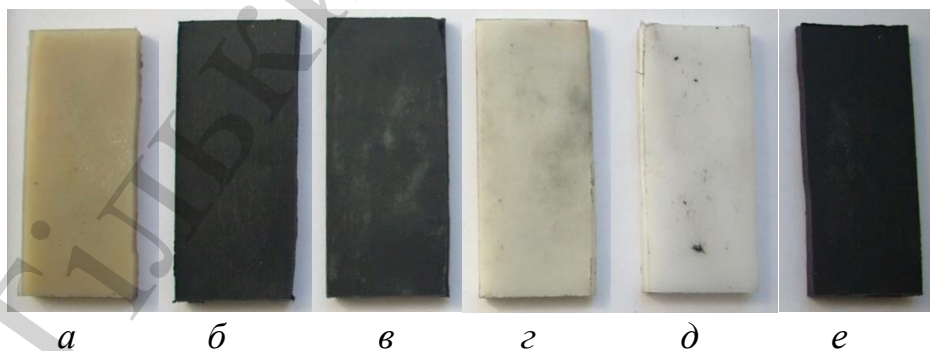


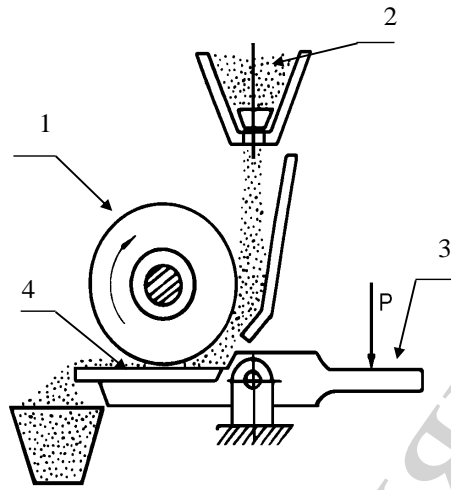
Рис. 3. Загальний вигляд зразків для визначення абразивної стійкості: *a* – № 1; *б* – № 2; *в* – № 3; *г* – № 4; *д* – № 5; *е* – № 6

Дослідження зразків на абразивну стійкість проводили на спеціально підготовленому лабораторному устаткуванні (рис. 4), встановленому на базі машини тертя СМЦ-2.





а



б

Рис. 4. Машина тертя СМЦ-2 з устаткуванням для реалізації процесу абразивного зношування: а – вид загальний; б – схема устаткування: 1 – гумовий ролик; 2 – абразивний матеріал; 3 – механізм створення навантаження; 4 – зразок матеріалу, що досліджується

Сутність методу дослідження матеріалів на абразивну стійкість полягала у тому, що за однакових умов проводили примусове зношування досліджуваного і еталонного зразків. Зношування здійснювали за допомогою абразивного нежорстко закріпленого матеріалу (електрокорунд № 16-Н, ГОСТ 3643-71), який подавався в зону тертя і притискався до зразка гумовим роликом, що обертається (рис. 4, б).

Перед випробуванням абразив просушували до відносної вологості не більше 0,16 %. Припрацювання ролика проводили методом тертя по поверхні шліфувального паперу типу 2 (ГОСТ 6456-75) із зернистістю № 8П (ГОСТ 3647-71), закріпленого у зразку-утримувачі на плоскій сталевій пластині. Після припрацювання ролик промивали в бензині. Умови випробування наступні: навантаження  $N$  (44 Н); частота обертання ролика,  $\omega$  (1,0 об/с). Характеристики гумового ролика: діаметр  $d$  (0,05 м); ширина  $a$  ( $15 \pm 0,1$ ); твердість за ГОСТ 263-75 за шкалою Шору  $A$  (78...85); відносне остаточне подовження, % (15...20).

Вагову величину зносу зразків визначали шляхом зважування на аналітичних терезах ВЛР-200(НГФ1), мінімально допустиме значення 0,05 мг.

Відносну зносостійкість досліджуваного матеріалу обчислювали за формулою:

$$K_u = \frac{U_e \cdot \rho_d \cdot n_d}{U_d \cdot \rho_e \cdot n_e}, \quad (1)$$

де  $U_e$ ,  $U_d$  – знос еталонного і досліджуваного зразків, кг;  $\rho_e$ ,  $\rho_d$  – густина еталонного і досліджуваного матеріалів, кг/м<sup>3</sup>;  $n_e$ ,  $n_d$  – кількість обертів ролика при випробуваннях еталонного і досліджуваного зразків;.

Густина зразків  $\rho$  визначали методом гідростатичного зважування за ГОСТ 15139-69.

Для порівняння відносної абразивної стійкості зразків ПКМ, що досліджуються одночасно, обрано еталонний матеріал Nylon 66, абсолютну величину зносу якого взято за одиницю.

Триботехнічні характеристики матеріалів деталей рухомих з'єднань з ПКМ при терті беззмащення визначали на машині тертя СМЦ-2 (рис. 5, а) за методикою наведеною в роботі [2]. Показники потенціометра КСП-2 (рис. 5, б), для вимірюваної величини крутного моменту і визначення коефіцієнту тертя, фіксували на спеціальному діаграмному папері ГОСТ 7826-75. Випробування здійснювали за схемою "диск-колодка". Зразки з ПКМ мали однорідну структуру циліндричної форми висотою 15 мм і діаметром 10 мм, а радіус спряженого сталевого зразка становив  $r=0,025$  м.



Рис. 5. Вигляд машини для дослідження зразків на тертя та зношування та її пульт керування з потенціометром КСП-2: а – загальний вигляд машини тертя СМЦ-2; б – пульт керування СМЦ-2 з потенціометром КСП-2

Перед початком кожного з випробувань зразки притирали. Це необхідно для того щоб поверхні тертя зразків мали паралельну форму і площа контакту становила не менше 85 %.

Коефіцієнт тертя ковзання визначали за формулою:

$$f = \frac{M_{kr}}{N \cdot \Delta}, \quad (2)$$

де  $M_{kr}$  – крутний момент, що виникає на диску, Н·м;  $N$  – навантаження на зразок, Н;  $\Delta$  – крок паперу, м. Для всіх дослідів останній параметр становив,  $\Delta=0,0025$  м.

Температуру в зоні тертя вимірювали за допомогою хромель-алюмелевої електронної терморпарі "Termometer 301 Type K" (Китай). Отвір для вимірю-

вання температури виконували на глибину, що дорівнює половині діаметру зразка, і на відстані 1 мм від поверхні тертя.

Площа контакту трибоспряження "диск-колодка" складала 2 см<sup>2</sup>. Режим дослідження наступний: питомий тиск на зразок  $p=0,5$  МПа, лінійна швидкість ковзання  $v=0,785$  м/с. Процес притирання відбувався за режимів: максимальний питомий тиск  $p=0,25$  МПа, швидкість ковзання  $v=0,785$  м/с. Вважали, що процес притирання закінчено при досягненні площі контакту колодки зі спряженим зразком 85 % від площі проекції.

Для відтворення жорстких умов експлуатації матеріалів рухомих з'єднань зразків проведено дослідження триботехнічних характеристик на машині тертя СМЦ-2 за таким режимом: лінійна швидкість ковзання  $v=0,785$  м/с; питомий тиск на зразок  $p=1,0$  МПа.

Металографічні дослідження робочих поверхонь в рухомих з'єднаннях зразків здійснювали за допомогою мікроскопу МБИ-6 (рис. 6).



Рис. 6. Оптичний мікроскоп МБИ-6: 1 – блок живлення, 2 – окулярний вузол, 3 – стіл для досліджуваних зразків

Зображення досліджуваних локальних областей зони тертя за допомогою спеціалізованої окулярної цифрової камери передавали на ПК для аналізу та фіксації результатів у вигляді цифрового фотознімку. Металографічні дослідження проводили з максимальним збільшенням до  $\times 400$  разів. Шорсткість поверхні спряжених зразків перед випробуванням становила не більше  $R_a \leq 0,63$  мкм. Сформована методика дає можливість за експериментальними результатами оцінити трибологічну ефективність спряжень матеріалів сталь 45 та досліджуваних ПКМ.

### **5. Результати дослідження трибологічної ефективності рухомих спряжень "полімерно-композитні матеріали – сталь"**

Після проведення досліджень на відносну абразивну стійкість ПКМ, зразки мали загальний вигляд представлений на рис. 8, а експериментальні значення наведені в табл. 1.

Значення зразків з ПКМ за критерієм відносної абразивної стійкості представлено на рис. 9.

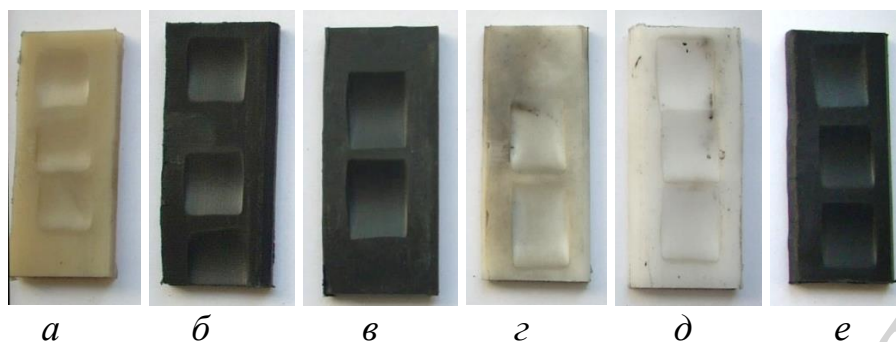


Рис. 8. Загальний вигляд зразків з полімерно-композитних матеріалів після досліджень на абразивне зношування: а – № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4; д – № 5; е – № 6

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень зразків ПКМ на абразивну стійкість (тривалість випробувань 10 хв.)

Шифр ПКМ	Середній масовий знос, г	Щільність, кг/м <sup>3</sup>
№ 1	0.1624	1125
№ 2	0.2400	1340
№ 3	0.2870	1350
№ 4	0.7488	1603
№ 5	0.4200	1365
№ 6	0.3005	1206

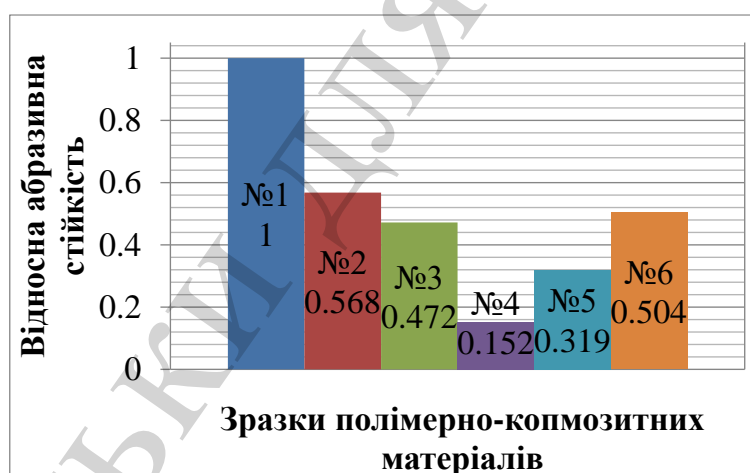


Рис. 9. Результати ранжування експериментальних досліджень зразків з ПКМ за критерієм відносної абразивної стійкості

Можна бачити, що полімери і композити на основі поліамідів (№ 1–3, 6) мають більш високу зносостійкість, ніж полімери групи Kocetal (зразки № 4, 5).

Результати триботехнічних досліджень на знос в умовах тертя без змащування трибоспряжень з ПКМ наведені на рис. 10.

Одним із основних критеріїв при дослідженні роботи спряження "полімерний композит-сталь" є величина зносу спряженого з ПКМ сталевого зразка (рис. 11).

Визначення коефіцієнта тертя  $f_{mp}$  в спряженнях зразків показало, що його значення знаходиться в межах 0,163...0,491 (рис. 12).

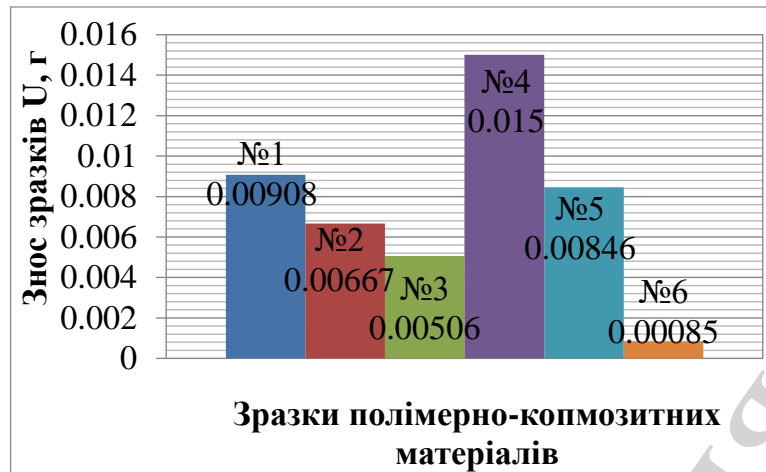


Рис. 10. Величина вагового зносу полімерних зразків при терті без змащування по сталі 45 (умови дослідів:  $p=0,5$  МПа,  $v=0,785$  м/с)

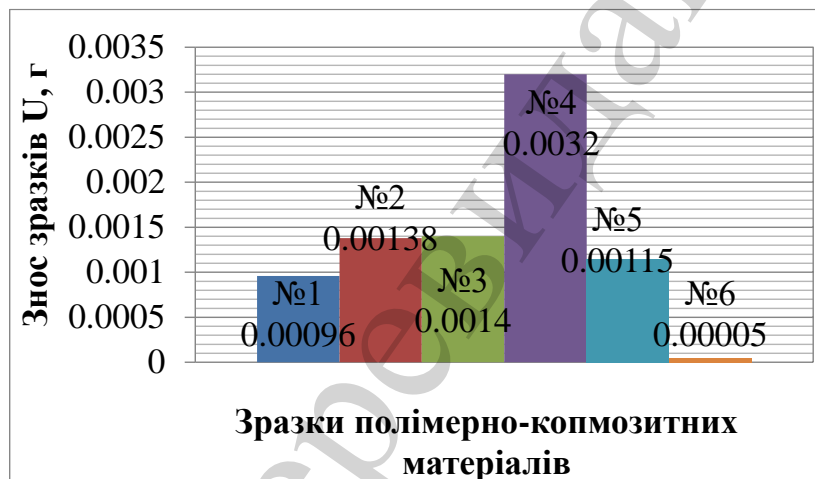


Рис. 11. Величина вагового зносу сталевого спряженого зразка при терті без змащування із полімерними зразками (умови дослідів:  $p=0.5$  МПа,  $v=0.785$  м/с)

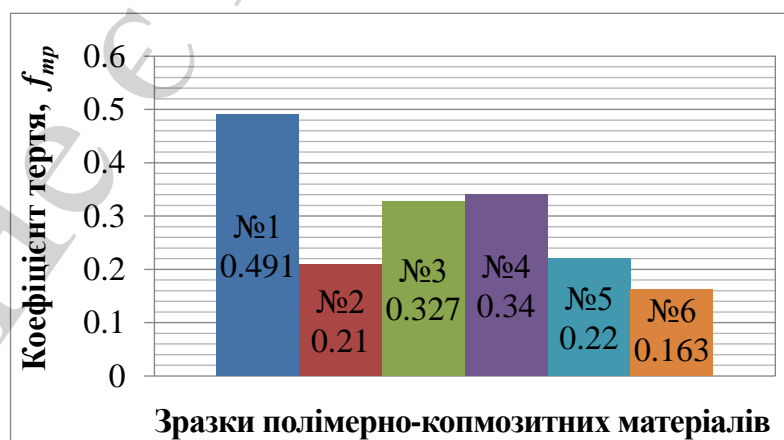


Рис. 12. Максимальне значення коефіцієнта тертя при фрикційній взаємодії сталевого спряженого зразка із полімерними зразками

Зміна коефіцієнта тертя  $f$  від тривалості експерименту наведено на рис. 13.

Результати дослідження температури в зоні тертя наведено на рис. 14 свідчать, що цей параметр корелює зі значеннями коефіцієнта тертя  $f_{mp}$  (рис. 13).

Стабілізація температури  $T$  в зоні тертя для всіх зразків свідчить про припрацьованість трибоспряження "сталь 45 – ПКМ".

Результати металографічних досліджень поверхні тертя спряжених зразків зі сталі 45 з відповідними досліджуваними зразками з ПКМ відображено на рис. 16.

Проаналізувавши отримані експериментальні результати, можливо виконати вибір спряжень матеріалів деталей машин для жорстких умов експлуатації з використанням матеріалів сталь 45 та ПКМ.

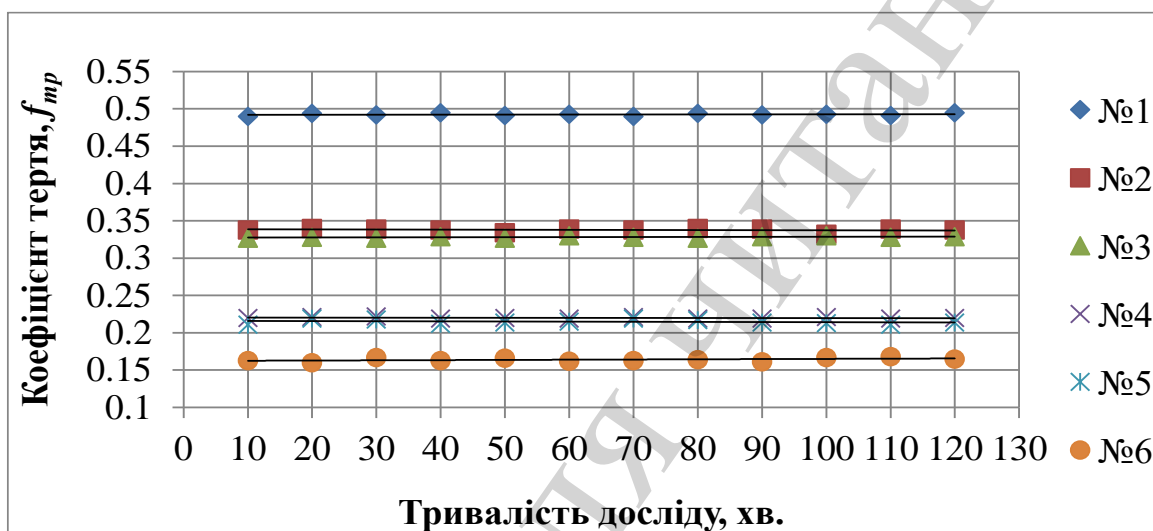


Рис. 13. Залежність коефіцієнту тертя при фрикційній взаємодії сталевого спряженого зразка із полімерно-компонітними зразками від часу проведення експерименту

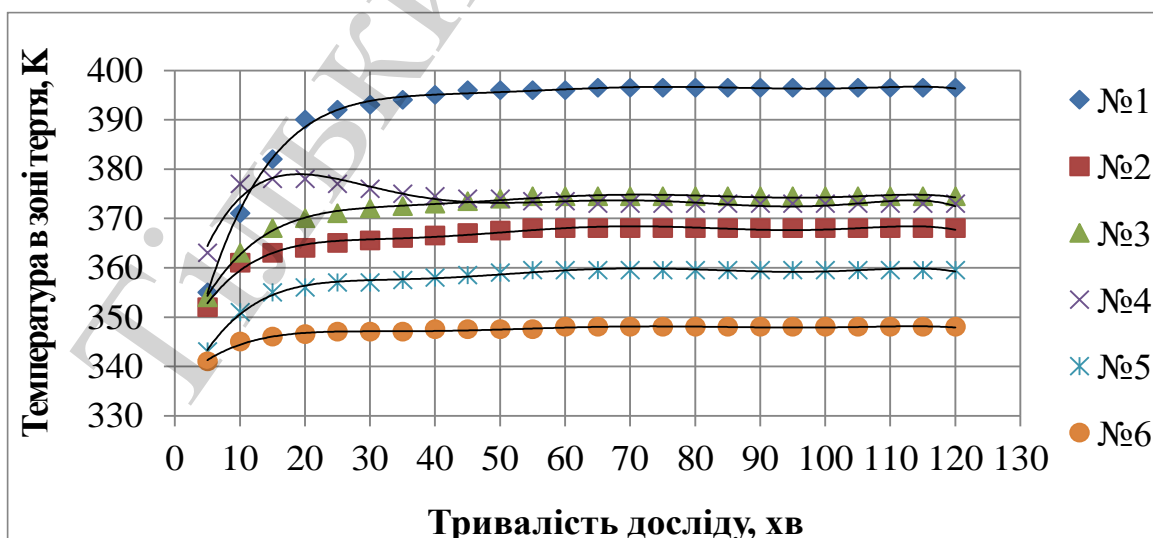


Рис. 14. Залежність температури в зоні тертя при фрикційній взаємодії трибоспряження зразків із "сталь 45 – ПКМ" від часу дослідження



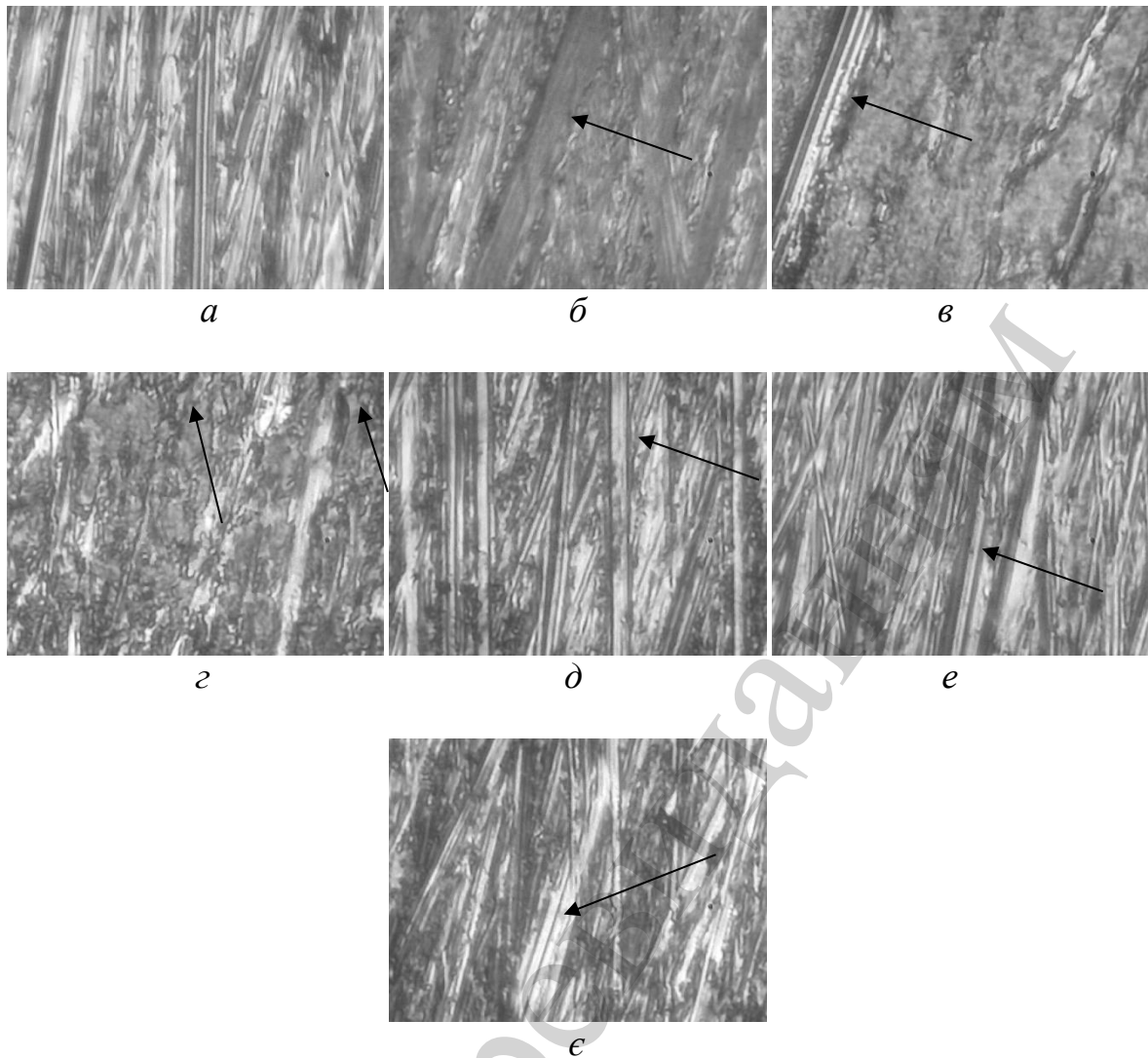


Рис. 16. Характерний вигляд робочої поверхні зразків зі сталі 45: *a* – до взаємодії з зразками зі ПКМ; *б* – після взаємодії з ПКМ № 1; *в* – № 2; *г* – № 3; *д* – № 4; *е* – № 5; *є* – № 6 ( $\times 400$ )

## 6. Обговорення результатів досліджень триботехнічної ефективності спряжень матеріалів "сталь 45 – досліджувані ПКМ"

Результати досліджень (табл. 2) показали, що зразок № 1 (Nylon 66) має найвищу відносну абразивну стійкість і вона суттєво позитивно відрізняється від інших матеріалів. Візуальне ранжування зразків за критерієм відносної абразивної стійкості (рис. 9) показало найнижчу абразивну зносостійкість матеріалу № 4 (Kocetal GF705), що у 4,3 разів нижча від еталону № 1 (Nylon 66). Тому при абразивному зношуванні в спряженнях деталей доцільно використовувати спряження матеріалів "сталь 45 – ПКМ № 1 (Nylon 66)".

Результати, представлені на рис. 10, свідчать, що за однакових умов випробувань мінімальний знос мали зразки за № 6 (УПА-6-30) (0,83 мг), а максимальний – зразки № 4 (Kocetal GF705), що у 18,1 разів більший, ніж матеріал № 6 (УПА-6-30). При цьому з рис. 10 можна також бачити, що матеріали за № 1 (Nylon 66)–№ 5 (Kocetal K300) мають величину зносу на порядок більшу від



№ 6 (УПА-6-30). Найближчим до зразка № 6 (УПА-6-30) за триботехнічними характеристиками без мащення є зразок № 3 (РА6/6.6 R196-GF30), що має у 6,1 разів вищий знос, за однакових умов проведення експерименту.

Результати зносу сталевого зразка (рис. 11) показують, що всі ПМК, крім № 6, мають значний негативний вплив на зношування сталевого зразка. У порівнянні зі зразком № 6, інші зразки мали знос більший у 19,2 (№ 1 (Nylon 66)) і 64 (№ 4 (Kocetal GF705)) рази. Це свідчить про непридатність до застосування матеріалів № 1 (Nylon 66) – № 5 (Kocetal K300) в рухомих з'єднаннях деталей, що працюють у спряженні з конструкційними сталями, термообробленими до твердості 48 – 50 HRC.

На основі отриманих даних (рис. 12) можна вважати, що матеріали зразків за № 2 (ПА-6-210КС), № 5 (Kocetal K300), № 6 (УПА-6-30) відносяться до антифрикційних, оскільки мають коефіцієнт тертя  $f_{тр} < 0,3$ . Матеріали зразків: № 1 (Nylon 66), № 4 (Kocetal GF705), № 3 (РА6/6.6 R196-GF30) – є фрикційними матеріалами з помірно високим коефіцієнтом тертя.

Дослідження залежності коефіцієнта тертя  $f_{тр}$  від тривалості експерименту (рис. 13) показали, що стабілізація  $f_{тр}$  для всіх зразків настає через 3...22 хв. від початку випробувань. Для зразків № 2 (ПА-6-210КС) – № 6 (УПА-6-30) впродовж 120 хв.  $f_{тр}$  не зростає, або відхилення його значень знаходилися в межах похибки вимірювань. Лише при випробуванні зразка з ПМК № 1 (Nylon 66) цей показник незначно стабільно зростає. Швидкість його зростання складала  $0,01 \text{ (год)}^{-1}$ .

Одним із позитивних факторів для всіх матеріалів з ПМК, крім № 1 (Nylon 66), є стабілізація коефіцієнта тертя трибоспряжень зразків при сталому режимі, що дозволяє прогнозувати їх експлуатаційну надійність в трибоспряженнях деталей без змащування.

Можна побачити, що, в цілому, закономірність розподілу температури між зразками практично корелює з  $f_{тр}$  (рис. 13).

З експериментальних випробувань, граничне значення температури в рухомих трибоспряженнях сільськогосподарських машин є 333 К [16]. Як свідчать залежності представлені на рис. 14, два матеріали задовольняють цій вимозі: № 5 (Kocetal K300) та № 6 (УПА-6-30). У решті випадків температура зразків в зоні тертя у трибоспряженнях значно вища за рекомендовану. Встановлено, що найменшу температуру в зоні тертя має зразок за № 6 (УПА-6-30), а зразок № 1 (Nylon 66) має максимальну – у 2,72 рази вищу.

Для трибоспряження матеріалів "№ 1 (Nylon 66) – сталь 45" (рис. 15, б) виявлено характерні окремі незначні пошкодження поверхні сталевого матеріалу (рис. 15, б, вказані стрілками). Це є основним фактором деякого зростання зносу поверхні зразка. Перенесення полімеру на поверхню спряженого зразка слабо виражене і не відіграє значної ролі в роботі трибоспряження.

Дещо більша кількість борозен виявлена на сталевій робочій поверхні зразка при терті зі зразком № 2 (ПА-6-210КС) (рис. 16, в). Це може бути викликано наявністю скловолокон, які обумовлюють утворення подряпин та сприяють їх розвитку. В даному випадку також характерне більш виражене перенесення полімерного матеріалу на поверхню сталевого спряженого зразка. Виявлено, що

дрібні подряпини заповнюються полімером і формується більш гладка поверхня тертя. Це забезпечує невисокий коефіцієнт тертя (рис. 13).

Для матеріалу № 3 (РА6/6.6 R196-GF30) характерні локальні руйнування (вказані стрілками), які, судячи з рис. 16, з, 10, чинять такий характер зношування сталеві деталі, як і при використанні зразку з ПКМ № 2 (ПА-6-210КС).

Фрикційна взаємодія матеріалу № 4 (Kocetal GF705) із сталлю 45 характеризується масштабним пошкодженням (подряпини, вигортання, сколювання) поверхні сталевого спряженого зразку (рис. 15, д). Це призводить до найбільшого зношування сталевих матеріалів у порівнянні з іншими зразками. Слідів переносу полімерного матеріалу на поверхню сталевих зразків не виявлено, що свідчить про відсутність в зоні тертя сприятливих умов для утворення полімерної плівки переносу.

Для матеріалу № 5 (Kocetal K300) пошкодження (рис. 15, е) спряженого сталевих матеріалів є характерними до попередніх випадків, крім зразка з № 2 (ПА-6-210КС). При цьому спостерігається залежність пошкоджень від кількості скловолокна в ПКМ.

Виявлено дещо відмінний вигляд поверхні тертя сталеві робочі поверхні зразка після фрикційної взаємодії зі зразком, виготовленим з матеріалу № 6 (УПА-6-30) (рис. 15, є). Спостерігається зменшення глибини пошкоджень та інтенсивне заповнення дна борозен полімерним композитом (вказано чорними стрілками). Це свідчить про чітку наявність ефекту переносу композиту, що і забезпечує мінімальне зношування сталеві поверхні зразка та низькі значення коефіцієнту тертя і температури в зоні тертя.

Із досліджуваних ПКМ № 6 (УПА-6-30) володіє найкращим комплексом триботехнічних характеристик, необхідних для забезпечення довговічності роботи трибоспряджень сталевих деталей з деталями, виготовленими з цього ПКМ. Тому цей матеріал доцільно рекомендувати для виготовлення деталей трибоспряджень, що експлуатуються в жорстких умовах експлуатації.

Основний ряд промислових ПКМ на даний час мають основні граничні обмеження стосовно температурних режимів їх експлуатації, тому максимальне значення за цим параметром складає 368 ... 412 К [38]. Досліджувані зразки ПКМ під час трибологічних випробувань за температурою в зоні тертя не виходили за дані обмеження. Це ще раз підтверджує їх відповідність до змодельованих режимів експлуатації. Перспективним напрямком для даного дослідження є експериментальне встановлення режимів експлуатації рухомих спряджень, з можливістю економічної доцільності виготовлення деталей з ПКМ та впровадження у технології машинобудування та технічного сервісу машин.

## **7. Висновки**

1. Результати досліджень зразків полімерно-композитних матеріалів на відносно абразивну стійкість в спрядженні зі сталлю 45 дала можливість встановити, що найменше значення вагового зношування має матеріал № 1 (Nylon 66), який було обрано за еталон. Найближчі значення відповідної абразивної стійкості з досліджуваних полімерно-композитних матеріалів до еталонного має матеріал № 2 (ПА -6- 210КС) в 1,65 раз менші. Для нормальної експлуатації спря-

жень матеріалів в умовах абразивного зношування доцільно використовувати "ПКМ № 1 (Nylon 66) – сталь 45" та "ПКМ № 2 (ПА-6-210КС) – сталь 45".

2. Результати триботехнічних досліджень спряжень матеріалів "сталь 45 – ПКМ" без мащення на машині тертя СМЦ-2 дають можливість виявити, що найнижчим ваговим зношуванням володіє зразок з ПКМ № 6 (УПА-6-30) 0.00083 г. Найближчим ПКМ до № 6 володіє зразок № 3 (РАG/6.6 R196-GF30)– 6.1 раз більший ваговий знос (0.00506 г). Зразок з матеріалу сталь 45 в спряженні з ПКМ № 6 (УПА-6-30) має найнижче значення вагового зношування (0,00005 г), найближчий ПКМ є № 1 (Nylon 66), що в 19.2 рази більший. Встановлено, що найнижчими значеннями коефіцієнтів тертя спряження "сталь 45 – ПКМ" володіють зразки ПКМ № 6 (УПА-6-30) – 0.163 та № 2 (ПА-6-210КС) – 0.21. Найшвидше припрацьовуються ПКМ № 6 (УПА-6-30), що можна спостерігати за зміною температури в зоні тертя, після 20хв. дослідження температура стабілізується на значенні  $348 \pm 2$  К.

3. За металографічними дослідженнями поверхні сталевого зразка в спряженнях з ПКМ найкращі характеристики має ПКМ № 6 (УПА-6-30). В спряженні з даним матеріалом спостерігається зменшення глибини пошкодженості та інтенсивності заповнення борозен полімерним композитом, що обумовлює зменшення зношування зразків сталі 45.

### Література

1. Bulgakov, V., Adamchuk, V., Ivanovs, S., Kaletnik, H. (2019). Experimental investigation of technical and operational indices of asymmetric swath reaper machine-and-tractor aggregate. *Engineering for Rural Development*, 256–263. doi: <https://doi.org/10.22616/erdev2019.18.n387>
2. Vigneshwaran, S., Uthayakumar, M., Arumugaprabu, V. (2019). Prediction and Analysis of Abrasive Water Jet Machining Performance on Hybrid Composite. *Journal of Testing and Evaluation*, 48 (2), 20180593. doi: <https://doi.org/10.1520/jte20180593>
3. Derkach, O. D., Kabat, O. S., Bezus, R. M., Kovalenko, V. L., Kotok, V. A. (2018). Investigation of the influence of fullerene-containing oils on tribotechnical characteristics of metal conjunction. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13 (14), 4331–4336.
4. Garg, N., Chandrashekar, G., Alisafaei, F., Han, C.-S. (2019). Fiber Diameter-Dependent Elastic Deformation in Polymer Composites – A Numerical Study. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 142 (1), 011002. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4043766>
5. Santo, L., Quadrini, F., Bellisario, D., Iorio, L. (2019). Applications of Shape-Memory Polymers, and Their Blends and Composites. *Shape Memory Polymers, Blends and Composites*, 311–329. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8574-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8574-2_13)
6. Aulin, V., Lysenko, S., Lyashuk, O., Hrinkiv, A., Velykodnyi, D., Vovk, Y. et. al. (2019). Wear Resistance Increase of Samples Tribomating in Oil Composite with Geo Modifier KGMF-1. *Tribology in Industry*, 41 (2), 156–165. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.02.02>

7. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Rohovskii, I., Chernovol, M., Lyashuk, O., Zamota, T. (2019). Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (97)), 6–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156150>
8. Qi, X., Wang, Y. (2019). Novel Techniques for the Preparation of Shape-Memory Polymers, Polymer Blends and Composites at Micro and Nanoscales. *Shape Memory Polymers, Blends and Composites*, 53–83. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8574-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8574-2_3)
9. Prysyazhnyuk, P., Lutsak, D., Shlapak, L., Aulin, V., Lutsak, L., Borushchak, L., Shihab, T. A. (2018). Development of the composite material and coatings based on niobium carbide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (96)), 43–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150807>
10. Tiptipakorn, S., Rimdusit, S. (2019). Thermal Stability of Shape Memory Polymers, Polymer Blends, and Composites. *Shape Memory Polymers, Blends and Composites*, 167–197. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8574-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8574-2_8)
11. Srinivasababu, N. (2019). Comparison in Performance of Hybrid and Marvel NoKH Okra/Abelmoschus esculentus Fibre Reinforced Polymer Composites Under Tensile Load. *Engineering Design Applications II*, 243–255. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20801-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20801-1_18)
12. Lutsak, D., Prysyazhnyuk, P., Burda, M., Aulin, V. (2016). Development of a method and an apparatus for tribotechnical tests of materials under loose abrasive friction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (83)), 19–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79913>
13. Bakanin, D., Bychkovsky, V., Filippenko, N., Butorin, D., Kuraitis, A. (2019). Development and Automation of the Device for Determination of Thermophysical Properties of Polymers and Composites. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 731–740. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8\\_69](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_69)
14. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Dykha, A., Zamota, T., Dzyura, V. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (99)), 6–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171619>
15. Marszałek, J., Stadnicki, J. (2019). Mesoscopic Modelling of Unidirectional Polymer Laminate Reinforced with Glass Roving Fabric. *Mechanisms and Machine Science*, 51–60. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13321-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13321-4_5)
16. Wu, S., Kondo, Y., Kakimoto, M., Yang, B., Yamada, H., Kuwajima, I. et. al. (2019). Machine-learning-assisted discovery of polymers with high thermal conductivity using a molecular design algorithm. *Npj Computational Materials*, 5 (1). doi: <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0203-2>
17. Aulin, V. V., Chernovol, M. I., Pankov, A. O., Zamota, T. M., Panayotov, K. K. (2017). Sowing machines and systems based on the elements of fluidics. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 53 (3), 21–28. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85039172369&partnerID=40&md5=2468069fc8914b34091c229527a0cc3e>
18. Sokolowski, K., Zambrzycki, M., Fraczek-Szczypta, A., Blazewicz, S. (2019). Ceramic coating formation during carbothermic reaction of polysiloxanes

with carbon and graphite materials. *Materials Chemistry and Physics*, 238, 121908. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121908>

19. Sankaranarayanan, S., Likozar, B., Navia, R. (2019). Real-time Particle Size Analysis Using the Focused Beam Reflectance Measurement Probe for In Situ Fabrication of Polyacrylamide–Filler Composite Materials. *Scientific Reports*, 9 (1). doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46451-x>

20. Feyzullahoğlu, E. (2017). Effect of Different Fillers on Adhesive Wear Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *Tribology in Industry*, 39 (4), 482–486. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.04.07>

21. Aulin, V., Lyashuk, O., Tykhyi, A., Karpushyn, S., Denysiuk, N. (2018). Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation. *Acta Technologica Agriculturae*, 21 (4), 153–159. doi: <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0028>

22. Botan, M., Musteata, A. E., Ionescu, T. F., Georgescu, C., Deleanu, L. (2017). Adding Aramid Fibers to Improve Tribological Characteristics of two Polymers. *Tribology in Industry*, 39 (3), 283–293. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.03.02>

23. Panneerselvam, T., Kandavel, T. K., Raghuraman, S. (2016). Experimental investigations on tribological behaviour of alumina added Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) composites. *Tribology in Industry*, 38 (3), 338–346.

24. Ashmarin, G. M., Aulin, V. V., Golobev, M. Yu., Zvonkov, S. D., Malyuchkov, O. T. (1986). Electrical conductivity of copper after laser treatment. *Russian metallurgy. Metally*, 5, 185–189. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0022959597&partnerID=40&md5=a27075bbaeb23b2bea5c5f9b2cc75f68>

25. Oladele, I. O., Olajide, J. L., Amujede, M. (2016). Wear resistance and mechanical behaviour of epoxy/mollusk shell biocomposites developed for structural applications. *Tribology in Industry*, 38 (3), 347–360. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84989248998&partnerID=40&md5=5d6a9d6decb8de737ce0b400121e0195>

26. Ashmarin, G. M., Aulin, V. V., Golubev, M. Yu., Zvonkov, S. D. (1986). Grain boundary internal friction of unalloyed copper subjected to continuous laser radiation. *Physics and chemistry of materials treatment*, 20 (5), 476–478. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0022781198&partnerID=40&md5=12a45ba637bf291f2ffb4fe3a9da90e0>

27. Bîrsan, I.-G., Cîrciumaru, A., Bria, V., Ungureanu, V. (2009). Tribological and electrical properties of filled epoxy reinforced composites. *Tribology in Industry*, 31 (1-2), 33–36. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-74049115422&partnerID=40&md5=09c05046e2a613645fc79c11fe8bb25e>

28. Căpitanu, L., Onișoru, J., Iarovici, A. (2004). Tribological aspects for injection processing of thermoplastic composite materials with glass fiber. *Tribology in Industry*, 26 (1-2), 32–41. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-47149103073&partnerID=40&md5=d9ea7df25effc0e25979b2af100dc5cc>

29. Aulin, V., Lyashuk, O., Pavlenko, O., Velykodnyi, D., Hrynkiv, A., Ly-senko, S. et. al. (2019). Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 21

- (2), 3–12. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85066994460&partnerID=40&md5=105d35bd46f8ab7b6de0b6688948d0e3>
30. Myshkin, N. K., Pesetskii, S. S., Grigoriev, A. Y. (2015). Polymer tribology: Current state and applications. *Tribology in Industry*, 37 (3), 284–290. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84941957788&partnerID=40&md5=898d9e4440a69f9f7237f020888370ff>
31. Cerit, A. A., Karamiş, M. B., Fehmi, N., Kemal, Y. (2008). Effect of reinforcement particle size and volume fraction on wear behaviour of metal matrix composites. *Tribology in Industry*, 30 (3-4), 31–36. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-76649086674&partnerID=40&md5=80413e399317cac297443c6121bdf2ca>
32. Riecky, D., Zmindak, M., Pelagic, Z. (2014). Numerical finite element method homogenization of composite materials reinforced with fibers. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 16 (3 a), 142–147. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84919961587&partnerID=40&md5=5268bd99b57539e4058c0f0e255c3e0e>
33. Bria, V., Dima, D., Andrei, G., Birsan, I.-G., Circiumaru, A. (2011). Tribological and wear properties of multi-layered materials. *Tribology in Industry*, 33 (3), 104–109. URL: <http://www.tribology.fink.rs/journals/2011/2011-3/2.pdf>
34. Aulin, V., Hrinkiv, A., Dykha, A., Chernovol, M., Lyashuk, O., Lysenko, S. (2018). Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (92)), 4–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125349>
35. Hassan, S. B., Aigbodion, V. S., Patrick, S. N. (2012). Development of polyester/eggshell particulate composites. *Tribology in Industry*, 34 (4), 217–225. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84871914470&partnerID=40&md5=827dcc75092ac0ae9c025ce1e4b2923a>
36. Todić, A., Čikara, D., Lazić, V., Todić, T., Čamagić, I., Skulić, A., Čikara, D. (2013). Examination of wear resistance of polymer - Basalt composites. *Tribology in Industry*, 35 (1), 36–41. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84875410103&partnerID=40&md5=ac878f662a36868beeadc2426f6d16a>
37. Danchenko, Y., Andronov, V., Barabash, E., Obigenko, T., Rybka, E., Meleshchenko, R., Romin, A. (2017). Research of the intramolecular interactions and structure in epoxyamine composites with dispersed oxides. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (90)), 4–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118565>
38. Petru, M., Broncek, J., Lepsik, P., Novak, O. (2014). Experimental and numerical analysis of crack propagation in light composite materials under dynamic fracturing. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 16 (3 a), 82–89. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84920052758&partnerID=40&md5=993ab820ab09a50372ff085635383742>
39. Bastiurea, M., Rodeanu Bastiurea, M. S., Andrei, G., Dima, D., Murarescu, M., Ripa, M., Circiumaru, A. (2014). Determination of specific heat of polyester composite with graphene and graphite by differential scanning calorimetry (2014) *Tribology in*

Industry, 36 (4), 419–427. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84919829774&partnerID=40&md5=c0b5cdd104d2180cbd622a242fa15829>

40. Besnea, M. A. C., Trufasu, D. C., Andrei, G., Bastiurea, M., Rodeanu, M. S. (2015). Estimation of wear behavior of polyphenylene sulphide composites reinforced with glass/carbon fibers, graphite and polytetrafluoroethylene, by pin-on-disc test. *Tribology in Industry*, 37 (1), 88–96.

41. Kondratiev, A., Gaidachuk, V. (2019). Weight-based optimization of sandwich shelled composite structures with a honeycomb filler. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1 (97)), 24–33. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154928>

ТІЛЬКИ ДЛЯ ЧИТАННЯ