

УДК 621.891:631.31:631.37 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.55-70](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.55-70)

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **А.В. Гриньків**, канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **О.М. Лівіцький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропівницький, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com

А.В. Бабій, доц., д-р техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м.Тернопіль, Україна

e-mail: ababiy@ukr.net

Закономірності впливу високомодульних наповнювачів на розподіл полів напружень в поверхневих шарах деталей машин, виготовлених з полімерних композитних матеріалів

В даній роботі на основі комп'ютерного моделювання контактної взаємодії спряжень зразків (деталей), навантажених тертям, виявлено основні зміни розподілу полів напружень в контактних областях гомогенних і гетерогенних (композитних) полімерних матеріалів. Поля напруження досліджували як в статичних, так і динамічних умовах навантаження. Увага була зосереджена на виявленні областей з максимальним тангенціальним напруженням τ_{\max} , їх конфігурації та глибини залягання. При цьому була використана теорія N.P. Suh, яка стосується зародження руйнуючих процесів в матеріалах зразків і деталей, ініційована наявністю зон дії максимальних тангенціальних напружень на певній глибині поверхневого шару.

Запропоновано критерій, що відповідає оптимальному об'ємному вмісту високомодульному наповнювача, який дорівнює відношенню усереднених відстань між центрами сусідніх частинок наповнювача і їх розміру. Наведені відповідні оцінки цього критерію.

полімерні композитні матеріали, високомодульний наповнювач, синергетична концепція, трибоспряження, дотичні напруження

Постановка проблеми. Використання деталей, виготовлених з полімерних композитних матеріалів (ПКМ) та відновлених нанесенням покриттів з цих матеріалів в процесі експлуатації, показало ефективність підвищення довговічності систем і агрегатів машин [1-3]. Разом з тим постає проблема оптимізації складу полімерних композитів від вмісту наповнювачів, розподілу полів напружень в полімерній матриці, від геометричної форми та концентрації наповнювача.

Специфічні особливості роботи ПКМ з мікро-, мезо- та макрогетерогенною структурою обумовлюють необхідність аналізу напружено-деформованого стану (НДС), що виникає в умовах навантаження в процесі експлуатації [4,5] силами тертя. Оскільки одна і та величина деформації може привести до крихкого руйнування однієї компоненти, до в'язкого – другого компоненту і утомленого – третього компоненту [6]. Тому в такому випадку визначальним є міцнісні характеристики кожної з компонент ПКМ. Дослідженнями НДС поверхневих шарів, зміцнених ПКМ [7-9], виявлено необхідність урахування взаємодії сусідніх контурних та фактичних контактів в процесі тертя ковзання. В науковій літературі це питання недостатньо досліджено й розглядаються не всі види зношування в спряженнях деталей машин [10-11]. Слід також враховувати процеси викришування та відшарування в ПКМ. Зазначимо, що при

реалізації такої експлуатаційної властивості матеріалів як їх зносостійкість, завдання ускладнюється через суттєву залежність напружень від об'ємного співвідношення компонентів, їх розмірів, форми, а також конструктивних особливостей спряжених деталей та властивостей робочого (технологічного) середовища. Потребує виявлення сам механізм передачі НДС через контактну взаємодію нижче розташованим шарам в поверхневих шарах деталей з ПКМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На думку авторів робіт [12-15] основною причиною руйнуючих процесів у поверхневих шарах ПКМ є НДС, що виникає в результаті контактних напружень і деформацій під впливом дотичних і нормальних навантажень при терті та зношуванні [16,17]. Це обумовлює необхідність детального дослідження особливостей НДС у поверхневих шарах матеріалів спряжених деталей. Вивчення особливостей НДС ПКМ як фактора, що визначає процес їх тертя і зношування, дозволяє підійти з єдиних позицій до нерозв'язаних проблем. При цьому ефективним є використання фізико-математичних моделей [18-20] та проведення оцінки НДС за розподілом навантаження в плямі контакту поляризаційно-оптичним та іншими методами [9]. Спроби співставлення зносостійкості і НДС поверхневих шарів ПКМ зроблено в роботі [8]. Згідно досліджень, проведених в роботі [7] є необхідність релаксації локальних максимальних напружень у поверхневих шарах деталей. Виявлено, що зі збільшенням об'ємного вмісту і розміру наповнювача інтенсивність зносу зменшується, але при цьому недостатньо з'ясовано зв'язок зазначених факторів з величиною максимальних дотичних напружень в ньому [21,22].

Спроби оцінки НДС поверхневих шарів ПКМ, навантажених силами тертя, з використанням теорії Герца [23,24], відображені в роботах В.П. Бондаренка [7], В.Я. Белоусова [13], А.В. Ковальського [8], В.В. Ауліна [9]. Загальним недоліком при цьому є статичність і схематичність картин НДС, відсутність врахування сусідніх контактуючих локальних областей. Існуючі експериментальні і теоретичні дослідження [22,11,25] не дозволяють в повній мірі орієнтуватися в дійсному розподілі поля напружень і деформацій за реальних умов тертя, оскільки залишається не виявленим вплив структурних особливостей ПКМ на НДС та характер і величину зносу, а також їх зв'язок з умовами контактування. Для вивчення цих питань перспективними є фізико-хімічні методи [26] та комп'ютерне моделювання [27,28] з використанням моделей реальних структур ПКМ мікро-, мезо- та макрорівня.

Постановка завдання. Метою даної роботи є на основі порівняльного аналізу полів напружень, що виникають в поверхневих шарах гомогенних і гетерогенних полімерних матеріалів зразків (деталей), навантажених тертям виявити закономірності впливу високомодульних наповнювачів на їх розподіл, при зміні форми наповнювача, відстані між ними та вмісту, а також з'ясувати умови найбільш ефективної експлуатації деталей машин, виготовлених з полімерних композитних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. При комп'ютерному моделюванні контактів спряжених поверхонь гомогенних полімерних матеріалів деталей, враховували, що при їх взаємодії виділяються декілька ділянок як контурних площинок, обумовлених хвилястістю поверхні, тобто нерівністю першого порядку, а також точки контакту, як плями фактичного контакту, обумовлені нерівностями другого порядку [29,30].

Гомогенний полімерний матеріал поверхневих шарів деталей вважали пружної моделлю, що являє собою однорідну півплощину навантажену одночасною дією нормальної \vec{N}_n і тангенціальної \vec{N}_τ складових ($N_n > N_\tau$) силового навантаження, які забезпечують повільне його ковзання по границі спряжених півплощин. Розподіл навантаження по плямі контакту має характер зосередженої сили, що дає можливість оцінити напружений стан за величиною максимального дотичного напруження τ_{\max} :

$$\tau_{\max} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1)$$

де σ_1, σ_2 – головні напруження, що лежать в площині моделі поверхневого шару деталі.

Епюри напружень в контактних зонах спряжень гомогенних однорідних матеріалів зразка і деталі в стані спокою і в процесі відносного руху наведено на рис. 1.

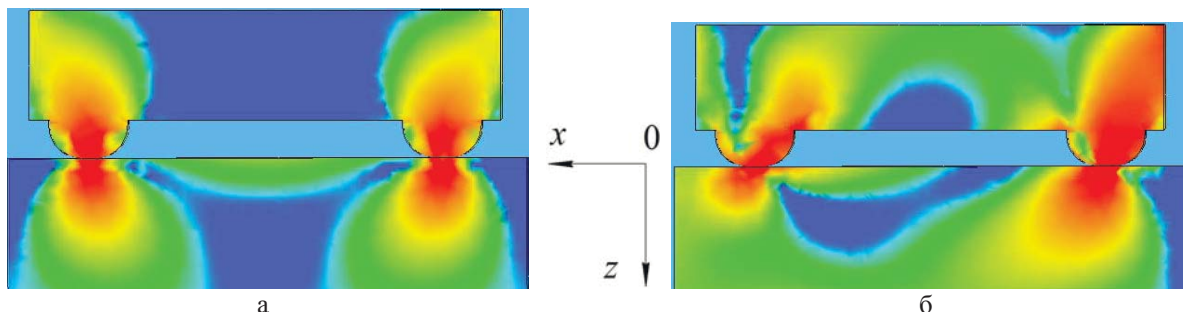


Рисунок 1 – Характерні епюри напружень в контактній зоні зразків з гомогенними однорідними полімерними матеріалами в стані спокою (а) $\bar{v} = 0$ і відносного руху (б) $\bar{v} \neq 0$

Джерело: розроблено авторами

Аналіз картин розподілу напружень в поверхневих шарах гомогенного полімерного матеріалу в процесі тертя ковзання свідчить про необхідність врахування наступної інформації: товщина поверхневого шару; розташування зон максимальних напружень τ_{\max} в ньому; зв'язок характеру розподілу поля напружень з параметрами контактування; періодичний характер коливань напружень. Виявлено, що в певний момент часу максимальні стискуючі напруження поверхневого шару знаходяться під точками контакту і спадають в горизонтальному напрямку в бік сусіднього контакту. За глибиною поверхневого шару спостерігається інший вид залежності напруження τ_{\max} : характерні різкі збільшення величини напруження фіксуються на глибині $h = (0,34...0,38)a$, де a – відстань між контактами, а потім йде різке зменшення, практично до поверхні зразка (деталі). Наявність локальної області з різким збільшенням τ_{\max} реалізує від'ємний градієнт напружень відносно поверхні. Ця область розташована на глибині $(0,18...0,42)a$, нижче якої на глибині $(0,52...0,56)a$ знаходиться ізотропна локальна область: $\sigma_1 = \sigma_2$ і $\tau_{\max} = 0$, в якій має місце всебічне стискування матеріалу [7].

Визначено, що при збільшенні дотичного навантаження картина розподілу поля напруження наближається до поверхні і зсувається в сторону прикладання навантажень N_{τ} . Розташування ізотропної області наближено співпадає з нижньою межею зони найбільших напружень τ_{\max} , а швидкість їх зміни збільшується зі збільшенням відносної швидкості спряженого матеріалу. На увагу заслуговує активний поверхневий шар деталі, розташований на певній глибині, в якому найбільш імовірно відбуваються зародження і протікання руйнівних процесів. В зв'язку з цим існують активні шари першого порядку, що відповідають за процеси руйнування на глибині десятків та сотні мікрметрів, та активні шари другого порядку, що визначають процеси зношування поверхневого шару в області мікронерівностей.

Згідно з теорією N.P. Suh [31-33], зародження руйнуючих процесів в матеріалах деталей часто ініціюється наявністю зон дії напружень τ_{\max} на певній глибині поверхневого шару. Результати комп'ютерного моделювання в даній роботі, підтверджуючи справедливість цієї теорії, дають можливість побудувати узагальнену схему розташування виявлених характерних областей з напруженням τ_{\max} за глибиною поверхневого шару полімерного гомогенного матеріалу зразків (деталей), що

знаходиться в відносному рухомому і нерухомому випадках (рис. 2).

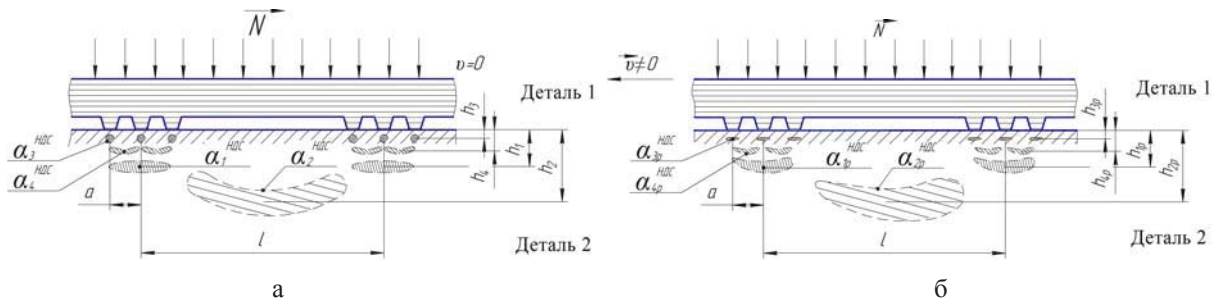


Рисунок 2 – Узагальнена схема розташування характерних локальних областей напруження τ_{\max} за глибиною полімерного гомогенного матеріалу нерухомих зразків (деталей) (а) та при відносному їх русі зі швидкістю v (б): h_1, h_2, h_{1p}, h_{2p} – глибини розташування областей $\alpha_1^{\text{HDC}}, \alpha_2^{\text{HDC}}, \alpha_{1p}^{\text{HDC}}, \alpha_{2p}^{\text{HDC}}$ з τ_{\max} утворених контурним тиском (нерівностями I порядку); h_3, h_4, h_{3p}, h_{4p} – глибина розташування областей $\alpha_3^{\text{HDC}}, \alpha_4^{\text{HDC}}, \alpha_{3p}^{\text{HDC}}, \alpha_{4p}^{\text{HDC}}$ з τ_{\max} утворених фактичним тиском (нерівностями II порядку)

Джерело: розроблено авторами

Згідно узагальненої схеми (рис.2) глибина розміщення локальних областей напруження τ_{\max} в гомогенному полімерному матеріалі визначається шириною контактної площинки a та відстанню між центрами контактних площинок l . Виявлено, що глибина локальних областей α_3^{HDC} і α_1^{HDC} , де τ_{\max} досягає найбільшого значення (рис. 2, а), не залежить від пружних властивостей матеріалу та сил тертя [88]. При збільшенні номінального навантаження спостерігається збільшення фактичної площі контакту і ще в більшому ступені самої контурної площини. Це відбудеться, в основному, не за рахунок збільшення розмірів площинок контакту, а за рахунок збільшення їх кількості. В зв'язку з чим локальні області α_2^{HDC} і α_4^{HDC} переміщуються ближче до поверхні при зменшенні відстаней l і a , а локальні області α_1^{HDC} і α_3^{HDC} залишаться на місці. Комп'ютерне моделювання свідчить, що можливі випадки, коли локальні області α_3^{HDC} і α_4^{HDC} та α_1^{HDC} і α_2^{HDC} будуть розміщуватися на одній глибині від поверхні деталі. Звісно, що така ситуація є небажаною для деталей машин, оскільки весь поверхневий шар на цій глибині буде мати найбільше напруження τ_{\max} , створюючи безперервний від'ємний їх градієнт. В зв'язку з цим знизиться утомна міцність матеріалу деталі [34,35].

Оскільки для гомогенних полімерних матеріалів деталей локальні області найбільших напружень τ_{\max} розташовані на глибині $h_1 = (0,45...0,50)a$, і $h_2 = (0,32...0,36)l$, то при $h_1 = h_2$, маємо: $l/a = 1,58...1,79$. При виконанні умови $l/a > 1,75$ локальна область α_2^{HDC} в поверхневому шарі розташовується нижче рівня області α_1^{HDC} . Зазначене свідчить, що на характер розподілу НДС в гомогенному матеріалі деталі трибоспряження суттєвий вплив здійснює геометрія поверхні тертя. При переміщенні плям контакту деталей від мінімуму до вершини хвилястості поверхні локальна область α_3^{HDC} має найбільші напруження τ_{\max} . В локальній області α_2^{HDC} при терті поширюються мікротріщини в мікровиступі. Локальна область α_4^{HDC} розташована під виступом паралельно поверхні. Основна частина напружень при цьому концентрується у виступах.

Дослідження свідчать, що в процесі переміщення контактуючих ділянок (рис. 2, б) від основи виступів до вершини, в поверхневому шарі полімерного матеріалу

зразків (деталей) трибоспряження, глибина залягання розглянутих локальних областей суттєво не змінюється. Виявлена зміна їх конфігурацій: α_{1p}^{HDC} , α_{2p}^{HDC} , α_{3p}^{HDC} , α_{4p}^{HDC} в процесі відносного руху зразків (деталей). Аналіз результатів досліджень, проведених моделюванням на ПК, свідчить, що знаючи параметри контактування зразків (деталей), взаємне розташування локальних областей з τ_{max} та товщину активного поверхневого шару, можна цілеспрямовано змінювати, забезпечуючи найбільш сприятливі режими тертя в трибоспряженні. З трибофізичної точки зору, на відміну від пружно-пластичної деформації мікронерівностей зразків (деталей) їх поверхневий шар підлягає переважно пружним деформаціям, а руйнування при зношуванні має утомний характер, як результат зміни НДС. Установлено, що в кожній точці активного поверхневого шару виникають внутрішні зусилля коливального характеру у напрямку перпендикулярному вектору відносної швидкості рухомого спряженого зразка або деталі, які можуть слугувати додатковим джерелом енергії при підвищенні температури поверхневого шару в процесі тертя і зношування. В таких умовах мікрогеометрія поверхні зразків і деталей зазнає значних змін внаслідок протікання процесів пластичного відтиснення, утомного руйнування і у деяких випадках, мікрорізання та глибинного виривання. Ці зміни відбуваються до оптимального значення рівноважної шорсткості, характерної для даних спряжень зразків і деталей і умов тертя [36-38].

За даними І.В. Крагельского [39] зі збільшенням чистоти поверхні частка пружної деформації збільшується. При цьому математичний опис шорсткості поверхонь тертя, їх нерегулярність, потребує застосування теоретико-імовірнісних та фрактальних методів [40-41]. Загальні закономірності і особливості НДС поверхневих шарів в областях виступів виявлені в залежності від товщини деформованого шару, його напруженого стану, від форми виступів, їх висоти і кроку та від рівня навантаження на спряження зразків (деталей) [19,36,37]. Виявлено, що концентрація напружень локалізується у виступах при будь-якій їх геометрії, а величина напружень під вільною поверхнею в межах активного шару на 1...2 порядки менша ніж у виступі. Характер навантаження мікронерівностей в процесі тертя залежатиме як від їх геометрії, так і співвідношення контактних тисків матеріалів зразків (деталей), а початкове руйнування в процесі контактування слід очікувати у верхній частині виступу [43,44].

Комп'ютерне моделювання НДС зразків і деталей з полімерного композитного матеріалу, дало можливість виявити вплив на нього розташування твердих частинок наповнювача та найбільш вигідний розподіл напружень в поверхневому шарі. Частинки наповнювача варіювали за геометричною формою (куля, куб, циліндр), по розмірам та порівнювали з масштабами контактування, а по щільності – розташували їх в поверхневому шарі з вмістом c_v , тобто з певною відстанню між ними.

Порівняльний аналіз епюр напружень в поверхневих шарах зразків трибоспряження на рис. 1 та рис. 3 свідчить, що наявність наповнювачів на 18...32% знижує рівень напружень в матриці ПКМ. Сприйняття основного контактного навантаження і передача його полімерній матриці відбувається твердими частинками наповнювача [20]. Виявлено, що характер розподілу напружень в поверхневій шарі залежить як від геометричної форми частинок наповнювача, так і відстані між ними (рис. 3-5). Спостерігається різке збільшення напружень на межі "матриця-наповнювач" для наповнювачів кубічної форми (рис. 3): створюється додаткове напруження на кутах кубічного наповнювача на відміну від випадку круглої форми (рис. 4). Зі зменшенням розмірів частинок наповнювача зменшується рівень напружень та змінюється їх розподіл за глибиною поверхневого шару. Змінюється розподіл напружень у випадках різного розташування наповнювача відносно зони контакту. Найкраще передається

зовнішнє навантаження у випадку (рис. 3, в, рис. 4, в, рис. 5, а,в) коли наповнювач знаходиться в поверхневому шарі зони контакту зразків з ПКМ. Виявлено, що рівень напружень в полімерній матриці під наповнювачем зменшується на 15...18% при зменшенні його розміру в 2 рази. В самому ж наповнювачі зменшення концентрації напруження спостерігається зі збільшенням його розміру.

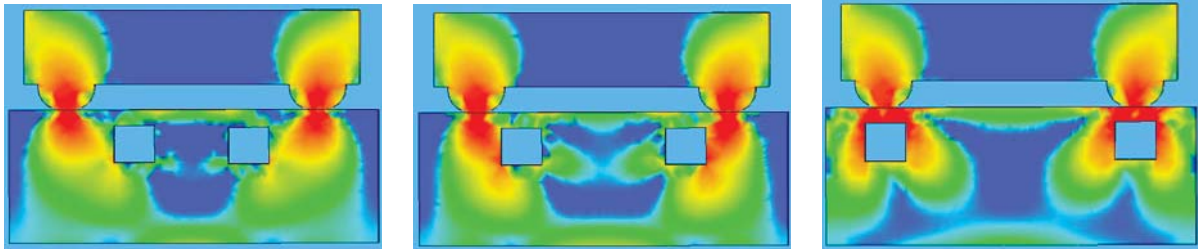


Рисунок 3 – Характерні епюри напруження в зоні контакту поверхонь зразків (деталей) при різній відстані розташування наповнювачів кубічної форми: а – λ_1 ; б – λ_2 ; в – λ_3 ; $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$

Джерело: розроблено авторами

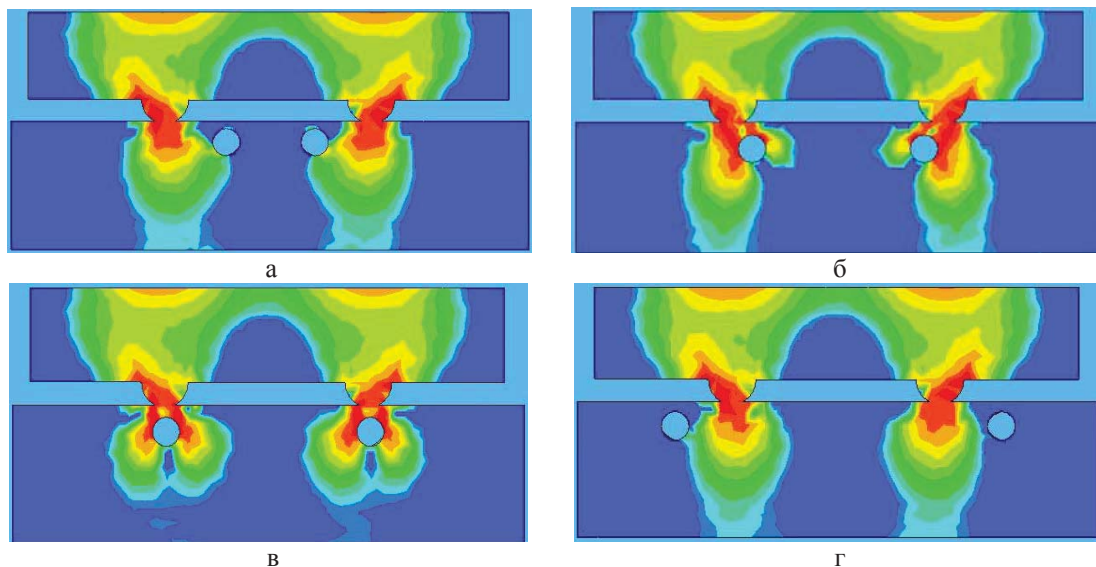


Рисунок 4 – Характерні епюри напруження в зоні поверхонь зразків (деталей) контакту при різній відстані розташування наповнювачів кулястої форми: а– λ_1 ; б – λ_2 ; в – λ_3 ; г – λ_4 ; $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4$

Джерело: розроблено авторами

У порівнянні зі стаціонарним і динамічним навантаженнями, при наявності у поверхневому шарі ПКМ наповнювачів циліндричної форми (рис. 5), характер розподілу напружень істотно змінюється: поле напружень при русі спряженого зразка дещо переміщується до поверхневого шару і залежить від спрямування твірної наповнювачів циліндричної форми у поверхневому шарі спряженого зразка (рис. 5, б,г). Виявлено, що для умов тертя більш сприйнятливим є вертикальне розташування наповнювача циліндричної форми (твірна перпендикулярно робочій поверхні), оскільки при цьому відводиться напруження із зони тертя. Спостерігаються малі за розміром небезпечні зони під наповнювачами та в локальних областях між ними. Динаміка зміни поля напружень від зміни відстані між вертикально розміщеними наповнювачами циліндричної форми наведено на рис. 6. Найбільш сприйнятлива картина для зон тертя наведена на рис. 6 а, коли максимальні напруження зосереджені у зоні контакту.

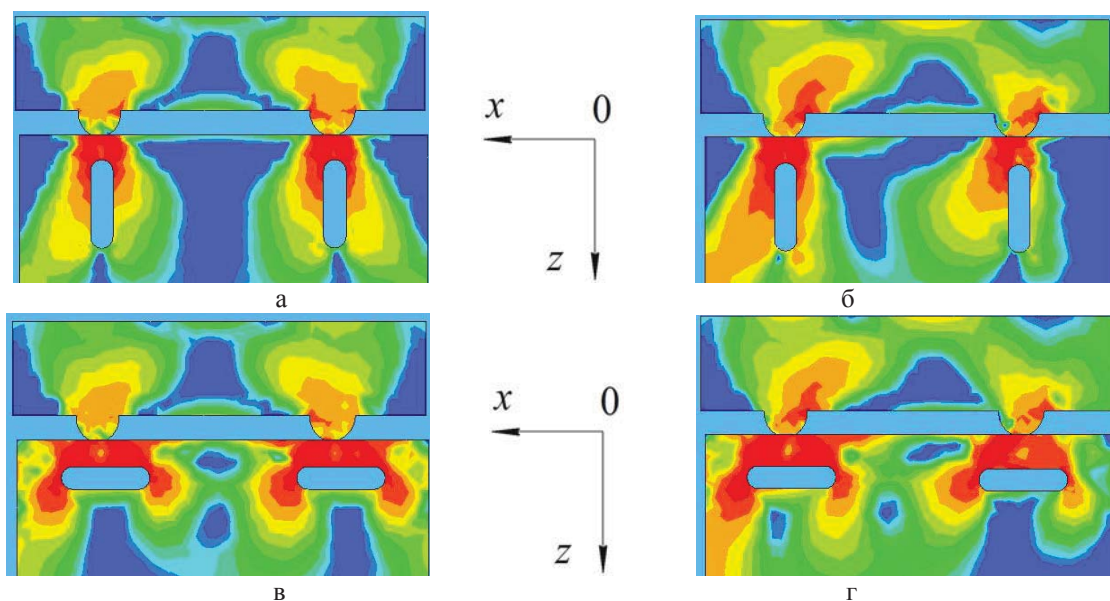


Рисунок 5 – Характерні епюри напруження в зоні контакту поверхонь зразків (деталей) при різному спрямуванні наповнювачів циліндричної форми у поверхневому шарі: вертикальному $\bar{v} = 0$ (а); вертикальному $\bar{v} \neq 0$ (б); горизонтальному $\bar{v} = 0$ (в); горизонтальному $\bar{v} \neq 0$ (г)

Джерело: розроблено авторами

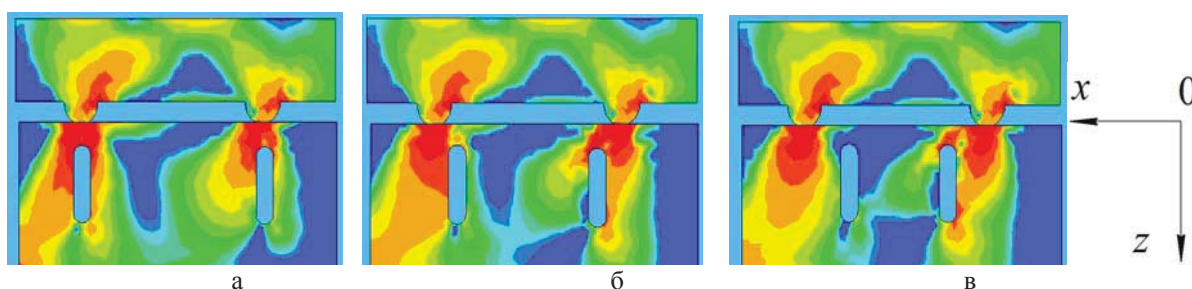


Рисунок 6 – Характерні епюри напруження в зоні контакту трибоспряження зразків з частинками наповнювача циліндричної форми у поверхневому шарі при терті $\bar{v} \neq 0$: в контактній (а) та міжконтактній (б, в) областях

Джерело: розроблено авторами

Змінюється характер розподілу напружень і від концентрації наповнювача у поверхневому шарі зразків (деталі) (рис. 7). Спостерігається відведення максимальних напружень із зон контактування. Зі збільшенням товщини шару ПМК напруження перерозподіляються між наповнювачами.

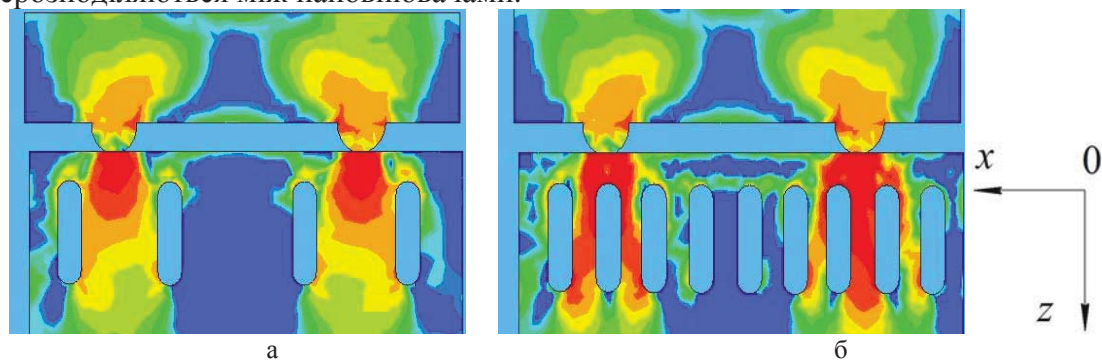


Рисунок 7 – Характерні епюри напруження в зоні контакту зразків при різній концентрації наповнювачів: c_{v1} (а), c_{v2} (б); $c_{v2} > c_{v1}$

Джерело: розроблено авторами

Дослідження показали, що для даного ПКМ існує така його товщина, коли поле напружень (рис. 8, г) не поширюється в перехідну область, що відрізняється від випадків, поданих на рис. 8, а,б,в.

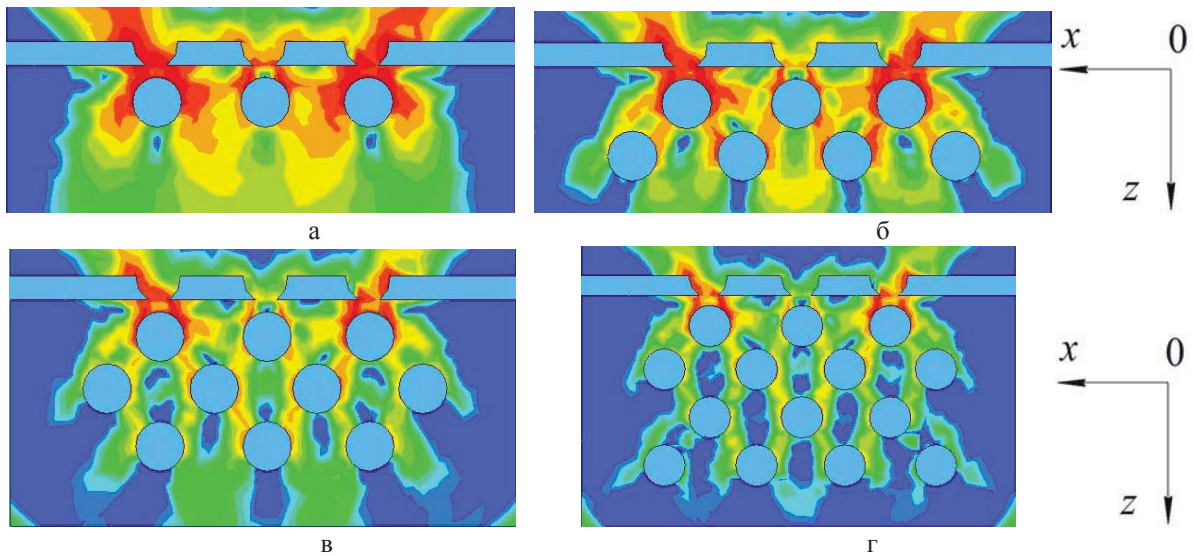


Рисунок 8 – Характерні епюри напруження в багатоконтактній області трибоспряження зразків в режимі стаціонарного навантаження: зразок, зміцнений одношаровим (а); двошаровим (б); тришаровим (в); чотиришаровим (г) ПКМ

Джерело: розроблено авторами

Це свідчить про те, що зміцнювальна ефективність шару ПКМ є максимальною при його оптимальній товщині $h_{пкм} \Rightarrow opt$. Подальше збільшення товщини зміцненого полімерного шару є недоцільним через збільшення витрат на його формування.

Характер сприйняття навантажень у зміцненому ПКМ зразку дещо змінює картину поля напружень і розміщення небезпечних зон в гетерогенному поверхневому шарі у порівнянні з гомогенним. Аналіз отриманих результатів дав можливість побудувати узагальнену схему розташування характерних локальних областей максимальних дотичних напружень τ_{max} в ПКМ, в стаціонарному та динамічному (в процесі тертя ковзання) режимах навантаження (рис. 9).

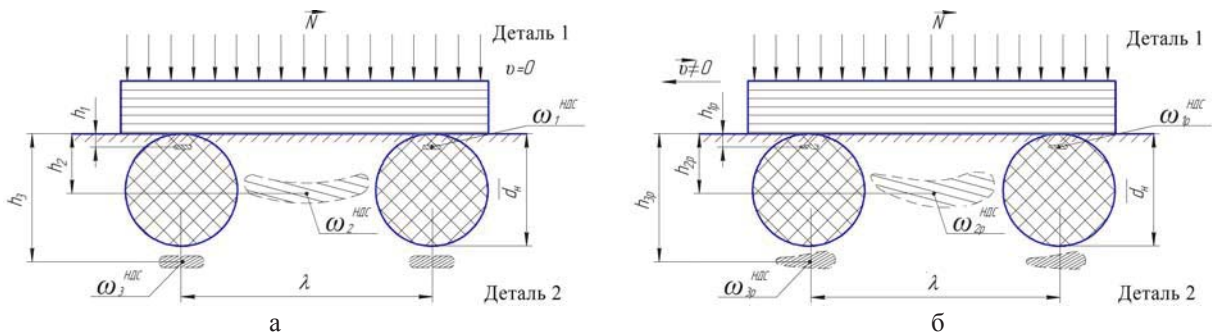


Рисунок 9 – Узагальнена схема розташування характерних локальних областей напружень τ_{max} у матеріалі зразка, зміцненого ПКМ: спряжені зразки знаходяться у стані спокою (а) та відносного руху (б) зі швидкістю \vec{v}

Джерело: розроблено авторами

У випадку, коли наповнювач в ПКМ не виступає над поверхнею, реалізується локальна область ω_2^{HDC} (рис. 9, а) підвищених напружень τ_{max} аналогічна локальним областям α_1^{HDC} і α_4^{HDC} (рис. 2, а) для однорідного гомогенного матеріалу зразка. Це свідчить про те, що контактне навантаження у ПКМ передається, в основному, через наповнювачі і визначається їх геометрією та взаємним розташуванням. Можна припустити, що при розмірі наповнювача порядку однієї нерівності поверхні зразка (деталі) механізм утворення рівноважної шорсткості принципово не відрізняється від випадку однорідного матеріалу [181].

Важливою особливістю є поява третьої локальної області ω_3^{HDC} найбільших напружень τ_{max} під наповнювачем (рис. 9, а). Вона аналогічна областям α_1^{HDC} і α_2^{HDC} (рис. 2, а). Спостерігається також стабільність напружень в активному поверхневому шарі. Виявлено, що при відносному ковзанні зразків з ПКМ, закономірності розподілу напружень в поверхневих шарах істотно не змінюються. Виявлено трансформування конфігурацій їх локальних областей (рис. 9,б): ω_{1p}^{HDC} , ω_{2p}^{HDC} , ω_{3p}^{HDC} .

За рахунок значної відмінності в твердості та модулі пружності полімерної матриці та високомодульного наповнювача у ПКМ наповнювач переймає роль індентора й здійснює навантаження на матрицю. Реалізація локальної області ω_2^{HDC} у поверхневому шарі ПКМ, вимагає набагато більших навантажень ніж для утворення аналогічних областей α_2^{HDC} і α_4^{HDC} у випадку гомогенного матеріалу зразку, оскільки наповнювачі у гетерогенному ПКМ перерозподіляє поле напружень. Зазначимо, що локальна область ω_1^{HDC} , що виникає в матеріалі наповнювача і є безпечною через його достатню міцність. Значну небезпеку й послаблення поверхневого шару здійснюють випадки, коли локальні області ω_2^{HDC} і ω_3^{HDC} , розташовані на одному рівні від поверхні під наповнювачами, що може обумовити їх викришування. Небажаним також є розташування локальної області ω_2^{HDC} між наповнювачами через послаблення міцності матриці між ними.

Результати досліджень свідчать, що найбільш доцільним є розташування областей ω_2^{HDC} і ω_3^{HDC} на глибинах $h_2 > h_3$. Заглиблення в матеріалі ПКМ, області ω_2^{HDC} знижує напруженість матриці між наповнювачами і забезпечує в ній позитивний градієнт напружень. Глибина розташування локальної області ω_3^{HDC} визначається розміром частинок наповнювача: $h_3 = (0,42...0,48) \bar{\lambda}$, де $\bar{\lambda}$ – усереднена відстань між центрами сусідніх частинок наповнювача, аналогічно розташуванню α_1^{HDC} і α_3^{HDC} в однорідному матеріалі під площинкою контакту. Область ω_2^{HDC} знаходиться на глибині $h_2 = (0,48...0,52) \bar{\lambda}$. Якщо вважати, що локальні області ω_2^{HDC} і ω_3^{HDC} знаходяться на одному рівні ($h_2 = h_3$), то умовою цього випадку є: $\bar{\lambda} = (4,2...4,5) \bar{d}_n$, \bar{d}_n – усереднене значення діаметра наповнювача. Для того, щоб область ω_2^{HDC} була глибше області ω_3^{HDC} повинно виконуватись умова: $\bar{\lambda} / \bar{d}_n > 4,2$. Зазначений критерій відповідає оптимальному об'ємному вмісту наповнювача в ПКМ – 20...30% [45, 48].

Оскільки більша частина напружень для ПКМ, що виходять на поверхню, концентрується в області контакту, то локальна область ω_2^{HDC} в цьому випадку, як правило, не реалізується за рахунок того, що лінії однакових напружень витягуються вглиб матеріалу вздовж межі "матриця-наповнювач", збільшуючи глибину активного

поверхневого шару. Визначено, що напруження в об'ємі наповнювача набагато більші ніж в матриці. Це стосується і високомодульних наповнювачів, що не виходять на поверхню і не знаходяться в безпосередньому контакті з спряженою поверхнею зразків (деталей), тобто вони є сильними концентраторами напружень, а знаходячись в контакті несуть на собі основне навантаження. При цьому чим більший їх розмір, тим більше сприйнятна ними частка номінального навантаження на поверхні тертя. Визначено, що циліндрична форма твердих високомодульних наповнювачів є найбільш сприйнятливою при зміцненні полімерного матеріалу, оскільки локальна область ω_2^{HDC} при цьому є незначною або не утворюється взагалі, а локальна область ω_3^{HDC} , як показують дослідження, завжди буде розташовуватися набагато глибше активного поверхневого шару, що виключає небезпеку викришування наповнювачів. Це підтверджують роботи [49-52].

Висновки:

1. Адаптовано метод комп'ютерного моделювання поля напруження для зони контакту гомогенного і гетерогенного полімерного матеріалу в статичному та динамічному режимах.

2. Виявлено характерні чотири зони з максимальним тангенціальним напруженням та їх трансформацію під час відносного руху спряжень зразків (деталей). Проаналізовано до яких наслідків можуть привести зміна глибини залягання в поверхневих шарах матеріалу деталей. Отримано умови, які слід дотримуватись і які слід запобігати при використанні деталей з полімерних матеріалів.

3. Наведено результати комп'ютерного дослідження поля напружень полімерного композитного матеріалу з високомодульним наповнювачем кубічної форми, у вигляді кулі та циліндричної форми та різних відстаням між частинками наповнювача. Встановлено сприйнятливі випадки розташування частинок наповнювача та при різній їх концентрації як по горизонталі, так і по вертикалі поверхневого шару.

4. На основі аналізу результатів комп'ютерного моделювання композитного матеріалу побудована узагальнена схема розташування трьох характерних локальних областей тангенціальних напружень в статичному та динамічному випадках. Проаналізовані зміни глибин залягання цих областей та їх вплив на ефективне функціонування деталей машин, виготовлених з полімерних композитних матеріалів. Запропоновано критерій оцінки якості таких матеріалів, що являє собою відношення усереднених відстань між центрами сусідніх частинок наповнювача і їх розміром. З'ясовано вплив об'ємного вмісту високомодульного наповнювача на ефективне функціонування деталей, виготовлених з полімерних композитних матеріалів.

5. Дослідження з використанням комп'ютерне моделювання дає можливість виявити фактори, що впливають на глибину розташування локальних областей напружень τ_{max} в полімерному шарі деталі, знайти умови оптимізації розподілу в них наповнювачів, що забезпечить максимальну зносостійкість, з урахуванням відстані між частинками, їх розмірами та об'ємним вмістом, та можливість управління параметрами контактної взаємодії трибоспряження, визначити глибину активованого поверхневого шару і цілеспрямовано впливати на опір зношуванню деталей, зміцнених полімерно композитними матеріалами.

Список літератури

1. Аулін В.В., Бруцький О.П. Про доцільність використання полімерних композицій з нанонаповнювачів при відновлюванні та виготовленні ресурсовизначальних деталей СГТ.

- Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с.-г. техніки*: матеріали X Міжнар. наук.-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2015. С.138-140.
2. Аулін В.В., Крилов О.О., Матвієнко О.О. Підвищення триботехнічних характеристик вузлів тертя сільськогосподарської техніки шляхом застосування полімерних матеріалів. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с.-г. техніки*: матеріали X Міжнар. наук.-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2015. С.159-160.
 3. Аулін В.В., Бруцький О.П., Голуб Д.В. Застосування тонкошарових полімерних покриттів для підвищення надійності деталей і спряжень с/г техніки. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с/г техніки*: матеріали IX-ї Міжнар. наук.-практ. конф., вип. 1. Кіровоград: КНТУ, 2013. С. 185-187.
 4. Аулін В.В., Бруцький О.П., Лисенко С.В. Дослідження закономірностей процесів тертя та зношування в металополімерних трибосистемах. *"Трибологія, енерго- та ресурсозбереження" яка проводилась в рамках "Ольвійського форуму - 2015"*: зб. тез матеріалів міжнар. наук.-практ. конф., 3-6 червня 2015, Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. С.3-4.
 5. Аулін В.В., Деркач О.Д., Макаренко Д.О., Гриньків А.В. Вплив режимів експлуатації на зношування деталей, виготовлених з полімерно-композитного матеріалу. *Проблеми трибології*. 2018. №4. С.65-69.
 6. Головчан В.Т. О параметрах микроструктуры трехфазного композитного материала. *Сверхтвердые материалы*. 2009. №2. С. 17-21.
 7. Бондаренко В.П. Триботехнические композиты с высокомолекулярными наполнителями. К.: Наук. думка, 1987. 232 с.
 8. Ковальський А.В. Напряженное состояние и изнашивание композиционных материалов при трении: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04, 05.16.06/ Киев, 1987. 189 с.
 9. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький, 2015. 360 с.
 10. Сороков С. Кластерний підхід до розрахунку фізичних характеристик композитних матеріалів. Львів: Ін-т фізики конденс. систем НАНУ, 2003. 23 с.
 11. Ивановкин П.Г. Контактные задачи для узлов трения с двухслойными композициями триботехнического назначения: автореф. дисс. степени д-ра техн. наук.: 01.02.04, 05.02.04 / Ростов-на Дону, 2009. 38с.
 12. Бабушкин Г. А., Буланов В.Я., Синицкий И.А. Металлические композиты. Свердловск: УНУ АН СССР, 1987. 312 с.
 13. Белоусов В.Я. Долговечность деталей машин с композиционными материалами. Львів: Вища школа, 1984. 180 с.
 14. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов: монографія. К.: Наук. думка, 1985. 304с.
 15. Савуляк В.І. Наукові засади формування на сплавах заліза композиційних металокарбідних шарів зі стабільними структурами та підвищеними триботехнічними характеристиками: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.02.01 / НАН України. Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича. К., 2004. 39 с.
 16. Богданович П.Н. Изнашивание твердых тел: монография. Гомель: Бел. ГУТ, 1998, 304 с.
 17. Браун Э.Д., Буше Н.А., Буяновский И.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). М.: Центр "Наука и техника", 1995. 778с.
 18. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов: монография. Хмельницкий: ХНУ, 2009. 242 с.
 19. Аулін В.В. Поле напружень в композиційному матеріалі та композиційному покритті в умовах тертя ковзання. *Зб. наук. праць ЛНАУ. Серія: Технічні науки*. 2006. №.65(88). С.13-20.
 20. Аулін В.В. Визначення об'ємного вмісту наповнювача в антифрикційному композиційному покритті. *Машинознавство*. 2004. №7(85). С. 49-53.
 21. Аулин В.В., Соловых Е.К., Крылов А.В. Триботехнические свойства полимерометаллических покрытий восстановленных деталей. *Проблеми трибології*. 2003. №3. С.76-84.
 22. Берсудский А.Л., Логинов О.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении с покрытием. *Вестник Самарского госуд. университета. Естественно-научная серия*. 2003. №4(30). С.103-111.
 23. Кузьменко А.Г., Дыха А.В., Бабак О.П. Контактная механика и износостойкость смазанных трибосистем. Теоретическая и экспериментальная трибология: в 12 т.; т. 8 (1): монография. Хмельницкий: ХНУ, 2011. 250 с.
 24. Кузьменко А.Г., Дыха О.В. Дослідження зносостійкості взаємодії змащених поверхонь тертя:

- монографія. Хмельницький: ХНУ, 2005. 183 с.
25. Любичева А.Н. Контактное взаимодействие и изнашивание неоднородных тел: дисс. ... канд. физ-мат. наук: 01.02.04. М.: 2005. 88 с.
 26. Соколовская Е.М., Гузей Л.С. Физикохимия композиционных материалов. М.: Моск. ун-та, 1978. 256 с.
 27. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2004. 432 с.
 28. Воробьев В.А., Илюхин А.В. Математическое моделирование в компьютерном материаловедении. *Российская академия архитектуры и строительных наук. Вестник отделения строительных наук*. 1999. Вып. 2. С.117-125.
 29. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров: монография. Омск: ОмГТУ, 2013. 240 с.
 30. Аулін В.В. Напружено-деформований стан поверхневих шарів гомогенних і гетерогенних матеріалів при терті і зношуванні. *Сучасні проблеми триботехніки: м-ли міжн. наук. техн. конф. 27-29 вересня*. Миколаїв: НУК, 2007. С. 83-86.
 31. Suh N.P. The delamination theory of wear. *Wear*. 1978. Vol.1. P1-162.
 32. Suh N.P. The delamination theory of wear. Massachusetts Institute of Technology, 1975. 158p.
 33. Suh N.P. The delamination theory of wear. *Wear*. 1973. Vol.25. №1. P 11-124.
 34. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 223с.
 35. Ибатуллин И.Д. Новые методы и приборы для экспериментальной оценки энергетических параметров усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: автореф. дисс. д-ра. физ-мат. наук: 01.04.01. Тольятти, 2010. 36с.
 36. Аулін В.В. Динамічна адаптація спряжень деталей до умов експлуатації з реалізацією процесів самоорганізації. *Актуальні проблеми інженер. механіки: м-ли II міжнар. наук.-техн. конф., 22-24 жовтня 2012р*. Миколаїв: НУК, 2012. С73-74.
 37. Аулін В.В., Кузик О.В. Динамічне матеріалознавство зон тертя деталей сільськогосподарської техніки. *Вісник ЖНАЕУ: наук.-теор. збір.* 2014. № 2(45), т.4, ч.ІІ. С. 102-110.
 38. Аулін В.В., Лізунов С.М. Теоретичне обґрунтування зміни шорсткості поверхні деталей після лазерної обробки. *Зб. наук. праць КНТУ "Техніка в сільгосп. виробн., галузеве машинобуд., автотранс."* 2007. Вип. 18. С.98-104.
 39. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. К.: Техника, 1970. 304 с.
 40. Аулін В.В., Лізунов С.М. Дослідження мікрогеометрії поверхонь тертя деталей фрактальним методом. *Констр., виробництво та експлуатація сільгосп. машин*. 2009. Вип.39. С. 280-286.
 41. Божокін С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. *Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика"*, 2001. 128 с.
 42. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
 43. Иванова В.С., Кузеев И.Р., Закиричная М.М. Синергетика и фракталы. Универсальности механического поведения материалов. Уфа: УГГТУ, 1998. 363с.
 44. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
 45. Aulin V., Derkach O., Makarenko D., Hrynkiv A., Pankov A., Tykhyi A. Analysis of tribological efficiency of movable junctions "polymeric-composite materials – steel". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4 (12-100). P. 6-15.
 46. Aulin V.V., Derkach O.D., Kabat O.S., Makarenko D.O., Hrynkiv A.V., Krutous D.I. Application of polymer composites in the design of agricultural machines for tillage. *Problems of Tribology*, V.25, No2/96-2020. 49-58.
 47. Aulin V., Kobets A., Derkach O., Makarenko D., Hrynkiv A., Krutous D., Muranov E. Design of mated parts using polymeric materials with enhanced tribotechnical characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5 (12-107). P. 49-57.
 48. Aulin V., Derkach O., Makarenko D., Hrynkiv A., Krutous D., Muranov E. Development of a system for diagnosing bearing assemblies with polymer parts during operation. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 5/1(55), pp.18-20.
 49. Мельниченко И.М. Восстановление и повышение долговечности подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов и покрытий: автореф. дисс. д-ра. техн. наук. Челябинск, 1992. 31 с.
 50. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Smal V.V., Lysenko S.V., Pashynskiy M.V., Katerynych S.E., Livitskiy O.M. Basic approaches and requirements for the design of tribological polymer composite materials with high-modulus fillers. *Problems of Tribology*, V.26, No 4/102-2021, P. 51-60.

51. Аулін В.В. Вплив характеристик компонентів контактуючих композиційних матеріалів і покриттів на параметри та властивості зони тертя. *Проблеми трибології*. 2006. №4 (42). С. 110-112.
52. Аулін В.В. Деякі закономірності зношування елементів трибосистеми "РОГМ-грунт". *Ольвійський форум – 2012*: зб. тез матеріалів міжнародної науково-практичної конференції, 6-10 червня 2012, Ялта., т. 12. С.57-59.

References

1. Aulin, V.V. & Brutskiy, O.P. (2015). Pro dotsilnist vykorystannia polimernykh kompozytsii z nanonapovniuvachiv pry vidnovliuvanni ta vyhotovlenni resursovyznachalnykh detalei SHT [On the feasibility of using polymer compositions of nanofillers in the restoration and manufacture of resource-determining parts of HRT]. *Problemy konstruiuvannya, vyrobnytstva ta ekspluatatsii s.-h. tekhniky - Problems of design, production and operation of agriculture techniques: materialy X Mizhnar. nauk.-praktichnoi konferentsii*. Kirovohrad: KNTU, 138-140 [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Krylov, O.O. & Matviienko, O.O. (2015). Pidvyshchennia trybotekhnichnykh kharakterystyk vuzliv tertia silskohospodarskoi tekhniky shliakhom zastosuvannia polimernykh materialiv [Improving the tribotechnical characteristics of friction units of agricultural machinery through the use of polymeric materials]. *Problemy konstruiuvannya, vyrobnytstva ta ekspluatatsii s.-h. tekhniky - Problems of design, production and operation of agriculture techniques: materialy X Mizhnar. nauk.-praktichnoi konferentsii*. Kirovohrad: KNTU, 159-160 [in Ukrainian]
3. Aulin, V.V., Brutskiy, O.P. & Holub, D.V. (2013). Zastosuvannia tonkosharovykh polimernykh pokryttiv dlia pidvyshchennia nadiinosti detalei i spriazhen s/h tekhniky [The use of thin-layer polymer coatings to increase the reliability of parts and couplings of agricultural machinery]. *Problemy konstruiuvannya, vyrobnytstva ta ekspluatatsii s/h tekhniky - Problems of design, production and operation of agricultural machinery: materialy IX-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf., vyp. 1*. Kirovohrad: KNTU, 185-187 [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V., Brutskiy, O.P. & Lysenko, S.V. (2015). Doslidzhennia zakonornosti protsesiv tertia ta znoshuvannia v metalopolimernykh trybosystemakh [Research of regularities of friction and wear processes in metal-polymer tribosystems]. *"Trybologhiia, enerho- ta resursozberzhennia" yaka provodylas v ramkakh "Olviiskoho forumu - 2015" - Tribology, energy and resource conservation" held as part of the "Olbia Forum - 2015"*: zb. tez materialiv mizhnar. nauk.-prakt. konf., 3-6 chervnia 2015, Mykolaiv: Vyd-vo ChDU im. Petra Mohyly, 3-4 [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., Derkach, O.D., Makarenko, D.O. & Hrynkiv, A.V. (2018). Vplyv rezhymiv ekspluatatsii na znoshuvannia detalei, vyhotovlenykh z polimerno-kompozytnoho materialu [Influence of operating modes on wear of parts made of polymer-composite material]. *Problemy trybologhii - Problems of tribology*, 4, 65-69 [in Ukrainian].
6. Golovchan, V.T. (2009). O parametrah mikrostrukturyi trehfaznogo kompozitnogo materiala [On the parameters of the microstructure of a three-phase composite material]. *Sverhtverdyie materialy - Superhard materials*, 2, 17-21 [in Russian].
7. Bondarenko, V.P. (1987). *Tribotekhnicheskie kompozityi s vyisokomodulnyimi napolnitelyami [Tribological composites with high-modulus fillers]*. Kiev: Nauk. dumka [in Russian].
8. Kovalskiy, A.V. (1987). Napryazhennoe sostoyanie i iznashivanie kompozitsionnykh materialov pri trenii [Stress state and wear of composite materials during friction]: *Candidate's thesis*. Kiev [in Russian].
9. Aulin, V.V. (2015). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta robochykh orhaniv silskohospodarskoi tekhniky [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery]. *Candidate's thesis*. Khmelnyts. nats. un-t. Khmelnytskyi [in Ukrainian].
10. Sorokov, S. (2003). *Klasternyi pidkhid do rozrakhunku fizychnykh kharakterystyk kompozytnykh materialiv [Cluster approach to the calculation of physical characteristics of composite materials]*. Lviv: In-t fizyky kondens. system NANU [in Ukrainian].
11. Ivanochkin, P.G. (2009). Kontaktnyye zadachi dlya uzlov treniya s dvuhsloynnyimi kompozitsiyami tribotekhnicheskogo naznacheniya [Contact problems for friction units with two-layer compositions for tribotechnical purposes]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Rostov-na Donu [in Russian].
12. Babushkin, G. A., Bulanov, V.Ya. & Sinitskiy, I.A. (1987). *Metallicheskie kompozityi [Metal composites]*. Sverdlovsk: UNU AN SSSR [in Russian].
13. Beloysov, V.Ya. (1984). *Dolgovechnost detaley mashin s kompozitsionnyimi materialami [Durability of machine parts with composite materials]*. Lviv: Vischa shkola [in Russian].

14. Vanin, G.A. (1985). *Mikromekhanika kompozitsionnykh materialov [Micromechanics of composite materials]*. Kiev: Nauk. dumka [in Russian].
15. Savuliak, V.I. (2004). Naukovi zasady formuvannia na splavakh zaliza kompozytsiinykh metalokarbidnykh shariv zi stabilnymy strukturamy ta pidvyshchenymy trybotekhnichnymy kharakterystykamy [Scientific bases of formation on iron alloys of composite metal-carbide layers with stable structures and the raised tribotechnical characteristics]. *Extended abstract of doctor's thesis*. NAN Ukrainy. In-t problem materialoznavstva im. I.M.Frantsevycha [in Ukrainian].
16. Bogdanovich, P.N. (1998). *Iznashivanie tverdykh tel: monografiya [Wear of solids: monograph]*. Gornel: Bel. GUT [in Russian].
17. Braun, E.D., Bushe, H.A., Buyanovskiy, I.A. et al. (1995). *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka) [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]*. M.: Tsentr "Nauka i tehnika", [in Russian].
18. Sorokatyiy R.V. (2006). *Metod triboelementov [Method of triboelements]*. Hmelnytskyi: HNU [in Russian].
19. Aulin, V.V. (2006). Pole napruzhen v kompozytsiinomu materiali ta kompozytsiinomu pokrytti v umovakh tertia kovzannia [Stress field in composite material and composite coating under sliding friction conditions]. *Zb. nauk. prats LNAU. Seriya: Tekhnichni nauky - Coll. Science. against LNAU. Series: Technical Sciences, 65(88)*, 13-20 [in Ukrainian].
20. Aulin, V.V. (2004). Vyznachennia obiemnoho vmistu napovniuvacha v antyfyktsiinomu kompozytsiinomu pokrytti [Determination of the volumetric content of the filler in the antifriction composite coating]. *Mashynoznavstvo - Mechanical Engineering, 7(85)*, 49-53 [in Ukrainian].
21. Aulin, V.V., Soloviyh, E.K. & Kryilov, A.V. (2003). Tribotekhnicheskie svoystva polimerometalicheskikh pokrytyi vosstanovlennykh detaley [Tribotechnical properties of polymer-metal coatings of restored parts]. *Problemy tribologii - Problems of tribology, 3*, 76-84 [in Russian].
22. Bersudskiy, A.L. & Loginov, O.A. (2003). Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya poverhnostnogo sloya pri uprochnenii s pokrytiem [Simulation of the stress-strain state of the surface layer during hardening with a coating]. *Vestnik Samarskogo gosud. universiteta. Estestvenno-nauchnaya seriya - Bulletin of the samara state. university. natural science series, 4(30)*, 103-111 [in Russian].
23. Kuzmenko, A.G., Dyiha, A.V. & Babak, O.P. (2011). *Kontaktnaya mehanika i iznosostoykost smazannykh tribosistem. Teoreticheskaya i eksperimentalnaya tribologiya. [Contact mechanics and wear resistance of lubricated tribosystems. Theoretical and experimental tribology]. (Vols. 12, Vol. 8 (1))*. Hmelnytskyi: HNU [in Russian].
24. Kuzmenko, A.H. & Dykha, O.V. (2005). *Doslidzhennia znosokontaktnoi vzaemodii zmashchenykh poverkhon tertia: monografiya [Investigation of wear-contact interaction of lubricated friction surfaces: monograph]*. Khmelnytskyi: KhNU [in Ukrainian]
25. Lyubicheva, A.N. (2005). Kontaktnoe vzaimodeystvie i iznashivanie neodnorodnykh tel [Contact interaction and wear of inhomogeneous bodies]. *Candidate's thesis*. Moskow [in Russian].
26. Sokolovskaya, E.M. & Guzey, L.S. (1978). *Fizikohimiya kompozitsionnykh materialov [Physicochemistry of composite materials]*. Moskow: Mosk. un-ta [in Russian].
27. Alyamovskiy, A.A. (2004). *SolidWorks/COSMOSWorks. Inzhenernyi analiz metodom konechnykh elementov [SolidWorks/COSMOSWorks. Engineering analysis by the finite element method]*. Moskow: DMK Press [in Russian].
28. Vorobev, V.A. & Ilyuhin, A.V. (1999). Matematicheskoe modelirovanie v kompyuternom materialovedenii [Mathematical modeling in computer materials science]. *Rossiyskaya akademiya arhitektury i stroitelnykh nauk. Vestnik otdeleniya stroitelnykh nauk - Russian Academy of Architecture and Building Sciences. Bulletin of the department of building sciences, Vol. 2*, 117-125 [in Russian].
29. Mashkov, Yu.K. (2013). *Tribofizika metallov i polimerov [Tribophysics of metals and polymers]*. Omsk: OmGTU [in Russian].
30. Aulin, V.V. (2007). Napruzhenno-deformovanyi stan poverkhnevnykh shariv homohennykh i heterohennykh materialiv pry tertii i znoshuvanni [Stress-strain state of surface layers of homogeneous and heterogeneous materials during friction and wear]. *Suchasni problemy trybotekhniki - Modern problems of tribotechnics: m-ly mizhn. nauk. tekhn. konf. 27-29 veresnia*. Mykolaiv: NUK, 83-86 [in Ukrainian].
31. Suh, N.P. (1978). The delamination theory of wear. *Wear, Vol.1*, P1-162 [in English].
32. Suh, N.P. (1975). The delamination theory of wear. Massachusetts Institute of Technology [in English].
33. Suh, N.P. (1973). The delamination theory of wear. *Wear, Vol.25, №1*, P 11-124 [in English].
34. Bushe, N.A. (1987). *Trenie, iznos i ustalost v mashinah [Friction, wear and fatigue in machines]*. Moskow: Transport [in Russian].
35. Ibatullin, I.D. (2010). Novyye metody i pribory dlya eksperimentalnoy otsenki energeticheskikh

- parametrov ustalostnoy povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnykh sloev [New methods and instruments for experimental evaluation of the energy parameters of fatigue damage and destruction of surface layers]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Tolyatti [in Russian].
36. Aulin, V.V. (2012). Dynamichna adaptatsiia spriazhen detalei do umov ekspluatatsii z realizatsiieiu protsesiv samoorhanizatsii [Dynamic adaptation of conjugations of details to operating conditions with realization of processes of self-organization]. *Aktualni problemy inzhener. mekhaniky - Current problems engineer. mechanics: m-ly II mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 22-24 zhovtnia 2012r.* Mykolaiv: NUK, 73-74 [in Ukrainian].
 37. Aulin, V.V. & Kuzyk, O.V. (2014). Dynamichne materialoznavstvo zon tertia detalei silskohospodarskoi tekhniky [Dynamic materials science of friction zones of agricultural machinery parts]. *Visnyk ZhNAEU: nauk.-teor. zbir - Bulletin of ZhNAEU: scientific-theoretical. gathering, 2(45), vol.4, part.II*, 102-110 [in Ukrainian].
 38. Aulin, V.V. & Lizunov, S.M. (2007). Teoretychne obhruntuvannia zminy shorstkosti poverkhni detalei pislia lazernoї obrobky [Theoretical substantiation of change of surface roughness of details after laser processing]. *Zb. nauk. prats KNTU Tekhnika v silhosp. vyrobn., haluzeve mashynobud., avtomat. - Coll. Science. Proceedings of KNTU Machinery in agricultural production., industry engineering., automation, Vol. 18*, 98-104 [in Ukrainian].
 39. Kostetskiy, B.I. (1970). *Trenie, smazka i iznos v mashinah [Friction, lubrication and wear in machines]*. Kiev: Tehnika [in Russian].
 40. Aulin, V.V. & Lizunov, S.M. (2009). Doslidzhennia mikroheometrii poverkhon tertia detalei fraktalnym metodom [Investigation of microgeometry of friction surfaces of parts by fractal method]. *Konstr., vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silhosp. mashyn - Constr., Production and operation of agricultural machines, Vol.39*, 280-286 [in Ukrainian].
 41. Bozhokin, S.V. & Parshin, D.A. (2001). Fraktaly i multifraktaly [Fractals and multifractals]. *Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika" - Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics"* [in Russian].
 42. Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.Zh. & Oksogoev, A.A. (1994). *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii [Synergetics and fractals in materials science]*. Moscow: Nauka [in Russian].
 43. Ivanova, V.S., Kuzeev, I.R. & Zakirnichnaya, M.M. (1998). *Sinergetika i fraktaly [Synergetics and fractals]*. Universalnosti mehanicheskogo povedeniya materialov. Ufa: UGGTU [in Russian].
 44. Mandelbrot, B. (2002). *Fraktalnaya geometriya prirody [Fractal geometry of nature]*. Moscow: Institut kompyuternykh issledovaniy [in Russian].
 45. Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hrynkiv, A., Pankov, A. & Tykhyi, A. (2019). Analysis of tribological efficiency of movable junctions "polymeric-composite materials-steel". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 4 (12-100)*, 6-15 [in English].
 46. Aulin, V.V., Derkach, O.D., Kabat, O.S., Makarenko, D.O., Hrynkiv, A.V. & Krutous, D.I. (2020). Application of polymer composites in the design of agricultural machines for tillage. *Problems of Tribology, Vol.25, 2/96-2020*, 49-58 [in English].
 47. Aulin, V., Kobets, A., Derkach, O., Makarenko, D., Hrynkiv, A., Krutous, D. & Muranov, E. (2020). Design of mated parts using polymeric materials with enhanced tribotechnical characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 5 (12-107)*, 49-57 [in English].
 48. Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hrynkiv, A., Krutous, D. & Muranov, E. (2020). Development of a system for diagnosing bearing assemblies with polymer parts during operation. *Technology audit and production reserves, 5/1(55)*, 18-20 [in English].
 49. Melnichenko, I.M. (1992). Vosstanovlenie i povyishenie dolgovechnosti podshipnikoviykh uzlov selskohozyaystvennoy tekhniki s ispolzovaniem kompozitsionnykh materialov i pokrytityi [Restoration and increase in the durability of bearing units of agricultural machinery using composite materials and coatings]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Chelyabinsk [in Russian].
 50. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Smal, V.V., Lysenko, S.V., Pashynskiy, M.V., Katerynych, S.E. & Livitskiy, O.M. (2021). Basic approaches and requirements for the design of tribological polymer composite materials with high-modulus fillers. *Problems of Tribology, Vol. 26, 4/102-2021*, 51-60 [in English].
 51. Aulin, V.V. (2006). Vplyv kharakterystyk komponentiv kontaktuiuchykh kompozytsiinykh materialiv i pokrytivy na parametry ta vlastyvosti zony tertia [Influence of characteristics of components of contacting composite materials and coatings on parameters and properties of friction zone]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology, 4 (42)*, 110-112 [in Ukrainian].
 52. Aulin, V.V. (2012). Deiaki zakonamirnosti znoshuvannia elementiv trybosystemy "ROHM-grunt" [Some regularities of wear of elements of tribosystem "ROGM-soil"]. *Olviiskiy forum-2012 - Olbia Forum-2012: zb. tez materialiv mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 6-10 chervnia 2012, Yalta., t.*

12, 57-59 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., Dr. tech. sci., **Andrey Hrinkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Livitskyi**, Ph.D. tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Andrii Babii, Assoc. Prof., Dr. tech. sci.

Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine

Regularities of Influence of High-modulus Fillers on the Distribution of Stress Fields in the Surface Layers of Machine Parts Made of Polymer Composite Materials

In this paper, based on computer simulation of contact interaction of conjugations of samples (parts) loaded with friction, the main changes in the distribution of stress fields in the contact regions of homogeneous and heterogeneous (composite) polymeric materials are revealed. Stress fields were investigated under both static and dynamic load conditions. The focus was on identifying areas with maximum tangential stresses τ_{\max} , their configuration and depth. The theory of N.P. Suh, which concerns the origin of destructive processes in the materials of samples and parts, is initiated by the presence of zones of maximum tangential stresses at a certain depth of the surface layer.

In the homogeneous polymeric material, four stress regions are detected: in the contact region α_3^{HDC} ; the contact area α_4^{HDC} ; in the field of aggregate contacts α_1^{HDC} ; in the area between the aggregate contacts α_2^{HDC} . It is shown that in the relative motion of the conjugations of the samples (parts) the depth of the local areas α_3^{HDC} and α_1^{HDC} , where τ_{\max} reaches the highest value and these areas remain in place, and areas α_2^{HDC} and α_4^{HDC} are mixed in operation closer to the surface. The change of configurations of these areas in the process of relative motion of conjugations of samples (details) is also revealed.

In the heterogeneous (composite) polymeric material with high-modulus fillers, three local areas were identified: in the filler ω_1^{HDC} ; between the fillers ω_2^{HDC} ; under the filler ω_3^{HDC} . It is determined that the contact load in the polymer composite material is transmitted through high-modulus fillers and is determined by their geometry and relative position. Significant danger is posed by cases when areas ω_2^{HDC} and ω_3^{HDC} are located at the same level from the surface of the sample (part), which can cause chipping of the filler. It is shown that the most effective is the operation of the part when the area ω_2^{HDC} is located deeper than ω_3^{HDC} . A criterion corresponding to the optimal volume content of high modulus filler, which is equal to the ratio of the average distance between centers of adjacent filler particles and their size. Relevant estimates of this criterion are given.

polymer composite materials, high modulus filler, synergetic concept, tribocouples, tangential stresses

Одержано (Received) 15.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 27.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022