

УДК 621.891

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЕПІЛАМУВАННЯ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**Трошін О.М., Стадниченко М.Г., Парфіло В.В.**

*Харківський національний університет Повітряних Сил  
імені Івана Кожедуба*

*В статті розглянуто питання щодо збільшення циклічної довговічності силових елементів шляхом розробки технології епіламування. Основою технології є нанесення епіламів на активовану поверхню (процес епіламування). Використання епіламування до неактивованих сталевих зразків має значно менший ефект у порівнянні з активованими (2 рази проти 6 разів).*

**Ключові слова:** *циклічна довговічність, силовий елемент, транспортний засіб, епіламування, поверхнево-активні речовини.*

**Вступ.** Проблеми утомного руйнування та зношування привертають велику увагу фахівців різних галузей науки і техніки не тільки в силу їх різноманіття, а й величезного практичного значення у всіх сферах матеріального виробництва.

Накопичені наукові дані свідчать, що процеси накопичення пошкоджень в поверхневому шарі представляють сукупність послідовних переходів матеріалу з одного стану в інший. При одних умовах переходи визначаються процесами пружних і пластичних деформацій, при інших проявляють себе більш глибокі структурні і фазові перетворення в поверхневому і підповерхневому шарах матеріалу.

У зв'язку з цим актуальною є задача впровадження нових технологій, сучасних методів діагностики та систем контролю, які дозволять прогнозувати можливість подальшої експлуатації транспортних засобів, та забезпечити отримання даних для оцінки їх залишкового ресурсу.

Сучасні досягнення в області нанотрибології створили умови заліковування дефектів на стадії їх до критичного розвитку. Перспективним в цьому напрямку є модифікація поверхневого шару шляхом нанесення на нього покриття, які знижують поверхневу енергію за рахунок фізико-хімічної взаємодії з матеріалами на атомарному рівні.

**Аналіз основних досягнень і публікацій.** Вивчення утомного руйнування матеріалів з урахуванням порівняння структурного пошкодження, появи мікротріщин та подальшого їх розвитку розглянуто в роботах [1, 2]. Встановлено що одним з експлуатаційних чинників, який впливає на характеристики міцності силових елементів є чинники навколишнього середовища.

Так під час тривалого зберігання на поверхневий шар транспортних засобів впливають такі основні чинники як температура, тиск, вологість

[3]. В результаті порушення захисного шару елементів конструкції, подальший процес взаємодії крапель вологи і поверхні визначається хімічною та електрохімічною активністю конструкційних матеріалів [4] з яких виготовлені елементи конструкції. Ці властивості можуть визначити умови механічного опору матеріалів у вузлах кріплення [4-7].

Аналіз статистичних даних ресурсних показників транспортних засобів свідчить про те, що близько 80 %, вичерпали призначений ресурс і перебувають в задовільному технічному стані та здатні до їх подальшої експлуатації. У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження нових технологій, які дозволяють відновлювати експлуатаційні показники конструкційних матеріалів силових елементів, що дасть можливість їх подальшої експлуатації.

**Мета досліджень** – розробка технології епіламування силових елементів під час переведення на експлуатацію за технічним станом зразків транспортних засобів для забезпечення заданих рівнів ефективності їх використання за призначенням.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо фізико-хімічні властивості епіламів та їх вплив на модифікацію поверхневого шару металевих виробів з ціллю підвищення зносостійкості та утомної міцності силових елементів транспортних засобів після тривалої експлуатації.

Знос має утомну природу тому цілком обумовленим є використання епіламування для підвищення утомної міцності силових елементів транспортних засобів.

Епілами представляють собою багатокомпонентні системи, що включають фторорганічні і вуглецевоутримуючі поверхнево-активні речовини (ПАР) в розчинах і функціональних добавках. Використання епіламування для підвищення зносостійкості має ряд переваг у порівнянні з іншими технологіями цієї галузі.

При нанесенні ПАР на поверхню твердого тіла (процес епіламування) утворюється тонкий шар молекул, орієнтованих спеціальним чином, який дозволяє надавати йому антифрикційні, протиадгезійні, гідрофобні і деякі інші специфічні властивості, а саме: зменшує поверхневу енергію матеріалу (приблизно в 1000...10000 раз). Внаслідок своєї високої проникаючої здатності ПАР заповнює всі пори й мікротріщини, дегазує їх і таким чином, виключає окрихчування матеріалу (воднева крихкість). Мікропори і мікротріщини позбавляються можливості концентрувати напруги і перестають бути потенційними центрами руйнування. ПАР захищає поверхню від впливу вологи і агресивних середовищ. Плівки ПАР стійкі до низьких і високих температур та не змінюють своїх експлуатаційних характеристик в інтервалі температур від  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+450^{\circ}\text{C}$ , а також до тиску (питомого навантаження до  $3000 \text{ мН/мм}^2$ ), впливу хімічних речовин і радіації.

Одним з найважливіших переваг епіламування є те, що воно не міняє структуру оброблюваної твердої поверхні, а лише модифікує її, надаючи поверхні антифрикційні, протиадгезійні, захисні властивості. Практично незмінними залишаються і геометричні розміри оброблюваних деталей – товщина захисного шару приблизно 40...80 Å.

Додаткове введення до складу епіламу нанодисперсійних часток вуглецю забезпечує утворення упорядкованої структури матриці згідно механізму поляризаційної орієнтації. У результаті цього спостерігається істотне збільшення міцності та зносостійкості. Ефект проявляється при певному співвідношенні компонентів. При збільшенні вмісту наномодифікатора більш заявлених меж спостерігається агломерація наночасток з утворенням дефектних низькоміцних областей в матеріалах [8].

Проведені на теперішній час дослідження [9] показали, що епіламування дозволяє суттєво підвищити утомну міцність і зносостійкість сполучених деталей і, як наслідок, поліпшити динаміку роботи машин, верстатів, промислових роботів, різного технологічного встаткування, а також силових елементів транспортних засобів [9, 10].

Епілами через низьку робочу температуру (150...160°C) застосовують в основному у приладобудівному виробництві для зниження тертя і утримання мащення в контактній зоні, а також для надання деяким матеріалам гідрофобних і інших специфічних властивостей.

Для прикладу порівнюємо деякі характеристики епіламу «Полізам-05» (обраного для досліджень) американського зразка «Films» та вітчизняного ЕП-ЦНТС. У табл. 1 наведено показники епіламів «Полізам-05» та ЕП-ЦНТС, що перевершують за основними показниками американський аналог «Films». Дана обставина визначила вибір для досліджень епіламів «Полізам» та ЕП-ЦНТС.

Таблиця 1. Показники застосування епіламів

Показник	Марка епіламу		
	Полізам-05	ЕП-ЦНТС	Films
Поверхнева енергія після епіламування, мН/м	2...4	3...4	5...8
Питоме навантаження, Н	до 3000	до 2500	до 1500
Максимальна температура експлуатації, °С	450	350	150

Механіка взаємодії епіламу з поверхнею твердого тіла при контактуванні з поверхнею зразка, формує шар орієнтованих молекул, що радикально міняють енергетичні впливи поверхні твердого тіла [10]. Молекули,

що закріплюються за рахунок сил хемосорбції, утворюють структури Ленгмюра-Блоджет у вигляді спіралей з нормально спрямованими до поверхні матеріалу осями [11].

При покритті металевих поверхонь (за винятком чистого титану) спіральні молекули здатні захоплювати електрони в тих місцях поверхні, де особливо висока електронна щільність. Місця з підвищеною електронною щільністю утворюються на тих ділянках металевої поверхні, де є порушення кристалічних ґрат.

Після покриття поверхні епіламом розчинник випаровується, а сама речовина фтор-ПАВ вступає в реакцію з поверхнею, формуючи моношар орієнтованих молекул у вигляді нанорозмірної плівки, що кардинально змінює енергетичний стан поверхні твердого тіла.

Спіралеподібні молекули «висаджуються» на поверхню в місцях з підвищеною електронною щільністю, тобто в місцях, де є порушення кристалічних решіток. Внаслідок високої проникаючої здатності (дуже низького поверхневого натягу) фтор-ПАВ заповнює пори, мікротріщини, подряпини і інші місця концентрації напружень. У результаті утворюється моношар у вигляді плівки нанорозмірної товщини. Таким чином, на оброблюваній поверхні утворюються розділові бар'єрні плівки з дуже низькою поверхневою енергією. Це знижує адгезію контактуючих матеріалів, відбувається локалізація поверхневих мікротріщин і обмеження можливості їхнього росту.

Програма випробувань для розробки технології епіламування передбачала експериментальні дослідження на довготривалу міцність алюмінієвих зразків на згинання. Використовувались зразки з матеріалу (Д16АТВ) силових елементів транспортних засобів, без обробки та оброблених епіламом ЕП-ЦНТС зразків після напрацювання 50 % циклу до руйнування тобто активованих.

З конструкційного матеріалу Д16АТВ, для проведення досліджень було взято 27 зразків з яких 9 зразків без епіламування, 18 зразків після епіламування (в неактивованому стані 9 та 9 зразків в активованому стані (після 50 % напрацювання до руйнування). Розмір зразків  $175 \times 30 \times 1,5$  мм відповідно до «Інструкції з експлуатації прибору для тривалих досліджень на згинання (ДП-5/3)» та ГОСТ 25.502-79. Фізико-хімічні та фізико-механічні характеристики відповідали ГОСТ 4784-97.

Плоскі зразки з алюмінієвих сплавів обробляли у вертикальному положенні. Термофіксацію плівки ПАР виконували при температурі  $90^{\circ}\text{C}$  протягом 50 хв.

Перший етап дослідження виконувався на 9 зразках, що не оброблені епіламом ЕП-ЦНТС з частотою 150 згинань за хвилину, кут відхилення було встановлено 40 градусів при  $t_{\text{пов}} = 20^{\circ}\text{C}$ .

Результати визначалися як середнє арифметичне по 9 зразкам. За результатами досліджень середня кількість згинань до руйнування склала 16153. Межа переходу від пружної до пружно-пластичної деформації визначалася за значеннями акустичної емісії. Перехід від пружної до пружно-пластичної деформації спостерігався при 8000 циклів.

Другий етап дослідження полягав в перевірці властивості зразків оброблених епіламом, при цьому на початок дослідження їх напрацювання складало 0 %. Для дослідження було взято 9 зразків. Умови та порядок проведення дослідження такі як і на першому етапі. Середня кількість згинань до руйнування склала 16450. Перехід від пружної до пружно-пластичної деформації також спостерігався при 8000 циклів.

Третій етап дослідження полягав в перевірці властивостей зразків оброблених епіламом ЕП-ЦНТС у яких на початок дослідження напрацювання складало також 0 %, а нанесення епіламу проводилось при досягненні напрацювання 50 % від визначеного на першому етапі дослідження. Для дослідження також було взято 9 зразків. Решта умов і порядок проведення дослідження аналогічний попереднім двом етапам. Середня кількість згинань до руйнування склала 31751. Узагальнені дані досліджень на згинання наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Результати проведення досліджень на утомну міцність

Показник (середнє по дев'яти дослідженнях)	Вид нанесення епіламу		
	Без нанесення	Нанесена сполука ЕП-ЦНТС. Активація не проведена (наробіток 0 %)	Нанесена сполука ЕП-ЦНТС. Проведена активація матеріалу напрацюванням (8000 циклів) в необробленому стані
Кількість циклів до руйнування	16153	16450	31751

Випробування сталевих зразків проводили на машинах МУИ-6000 для випробувань на утомну міцність. Випробували стандартні циліндричні зразки  $l_0 = 50$  мм,  $d_0 = 10$  мм. Оцінка впливу епіламування при проведенні цих випробувань виконана на підставі порівняння кількості циклів, що витримали зразки до руйнування із застосуванням епіламу Полізам-05 в активованому та неактивованому стані.

Діаметр зразків 7,5 мм, що відповідало відношенню поверхні до об'єму 0,53. Дослідження показало, що при навантаженні 320 МПа зразки без епіламування руйнувалися при значно меншій кількості циклів. Результати вимірювань наведено в табл. 3.

При цьому випадку при обробці епілами в активованому стані спостерігається суттєве підвищення утомної міцності більше ніж у 6 разів, в порівнянні з неактивованими зразками та приблизно у 2 рази в порівнянні з обробкою в неактивованому стані.

Відповідно отриманим результатам, епіламування дозволяє збільшити циклічну довговічність від 3 до 6 разів, і його потрібно розглядати як перспективний метод для подовження ресурсу елементів транспортних засобів.

На теперішній час виробниками епіламів пропонується технологія епіламування як спосіб нанесення полімерного антифрикційного покриття на поверхні деталей виробу, спрощений зміст якої полягає у очищенні поверхні реагентом, сушінні поверхні, нанесенні епіламу [12].

Таблиця 3. Узагальнені дані досліджень на згинання

Показник (середнє по дев'яти дослідженнях)	Вид нанесення		
	Без обробки	Обробка складом Полізам-05 в неактивованому стані	Обробка складом Полізам-05 після напруження зразком 30 000 циклів
Кількість циклів до руйнування	60 000	190 000	365 000

Для використання зазначеної технології епіламування на алюмінієвих сплавах потрібно використовувати вуглецевмісні епілами. Дослідження показали, що використання епіламів у відповідності з цією технологією (обробка в неактивованому стані) не дає практично значних результатів.

В той же час наведені вище результати показують, що врахування властивостей активованого поверхневого шару надає можливість створення універсальної технології для епіламування на основі фтору та вуглецю.

Результати досліджень показали можливість суттєвого підвищення утомної міцності поверхневого шару за рахунок його переведення в активований стан. З закону збереження енергії випливає, що після активації швидкість процесу пасивації (зменшення вільної енергії) різко зростає. На відміну від традиційних технологій збільшення утомної міцності досягається за рахунок утворення міцних зв'язків між атомами епіламу та атомами металу.

Рівень збудження на ділянках у яких є дефекти в порівнянні з іншими ділянками суттєво відрізняється [13]. Активацію поверхні можливо проводити різними способами [14, 15].

При довготривалій експлуатації силових елементів відповідно до кла-

сичної теорії утоми Вейлера: на першому етапі – виникає послідовне накопичення пошкоджень в наступній послідовності від атомно-молекулярного рівня (дислокації, вакансії і т.д.) до другого етапу – утворення субмікротріщин допустимих розмірів, і на заключному етапі до утворення мікротріщин які при їх об'єднанні призводять до руйнування. Тому «заліковування» дефектів можливі на першому та другому етапі до утворення тріщин.

**Висновки.** Проведено аналіз результатів застосування існуючих методик і технологій підвищення утомної міцності силових елементів транспортних засобів під час тривалої експлуатації. Виявлено збільшення циклічної довговічності лабораторних зразків з активованою поверхнею (від 2 до 6 разів). Дослідження показали що застосування епіламу до неактивованих зразків з алюмінієвого сплаву не має жодних переваг. Використання епіламу до неактивованих сталевих зразків має значно менший ефект у порівнянні з активованими (2 рази проти 6 разів). Встановлено, що епіламування повинно виконуватись безпосередньо після активації поверхні через те, що ступінь активації поверхні знижується в період відсутності навантажень.

### Список використаних джерел

1. Кольцун Ю.И. Анализ особенностей медленного роста усталостных трещин в металлах / Ю.И. Кольцун, Д.П. Подлеснова // Известия Самарского научного центра РАН «Достижения физики, электроники и нанотехнологий». – Самара: изд. Самара, 2011. – Т. 13, № 4 (4). – С. 1080–1086.
2. Пачурин Г.В. Кинетика усталостного разрушения некоторых цветных металлов и сплавов при разных температурах / Г.В. Пачурин. Современные проблемы науки и образования – Пенза: Изд. дом «Академия естествознания», 2014. – № 2. – 720 с.
3. Хромов С.П. Метеорология и климатология / С.П. Хромов, М.А. Петросян. 7-е изд. – М.: Наука, 2006. – 582 с.
4. Батраков В.В. Коррозия конструктивных материалов. Газы и неорганические кислоты / В.В. Батраков, В.П. Батраков, Л.Н. Пивоваров и др. В двух книгах. Кн. 1. Газы и фреоны. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
5. Гребенников А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных авиационных конструкций / А.Г. Гребенников – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.
6. Пирогов Е.Н. Соппротивление материалов / Е.Н. Пирогов, В.Ю. Гольцев. – М.: МИФИ, 2008. – 200 с.
7. Аболихина Е.В. Коррозионная стойкость конструкций из сплава Д16Т / Е.В. Аболихин, С.М. Чернега // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк: Луцький НТУ, 2013. – № 41, Ч. 2. – С. 4–9.

8. Охлопкова А.А. Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе полимеров и ультрадисперсных керамик. Автореф. дисс. докт. техн. наук. – Гомель, 1999. – 25 с.
9. Татаркина И.С. Вплив наноструктурного шару на об'ємні механічні властивості виробів / І.С. Татаркина, І.В. Пономаренко, І.В. Дощечкина // Вісник ХНАДУ. – Х., 2010. – Вип. 51. – С. 55–58.
10. Дьяченко С.С. Підвищення механічних властивостей деталей з концентрацією напруг шляхом утвору поверхневого нанослоя / С.С. Дьяченко, І.В. Пономаренко, І.В. Дощечкина и др. // Вісник кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2011. – № 1 (66). Ч. 1. – С. 56–58.
11. Вохидов А.С. Многофункциональные защитные нанопокрытия фтор-ПАВ эпилам / А.С. Вохидов, Л.О. Добровольский // 11 Международная конференция «Пленки и покрытия – 2013». – С.-П., 2013. – 242 с.
12. Пат. 6350 С1 Республика Беларусь, МПК В05D 5/08, 1/18 Способ нанесения антифрикционного и противоизносного фторсодержащего полимерного покрытия / В.А. Струк, Е.В. Овчинников, Ю.С. Бойко, В.А. Губанов, П.Е. Тройчанская. – № а 19980761; заявл. 12.08.1996, опубл. 30.09.2004.
13. Финкель В.М. Портрет трещины. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – 192 с.
14. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки: пер. с яп. / В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
15. Кулик А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.

## Abstract

### DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF EPILAMATION OF POWER VEHICLE ELEMENTS

Troshin O., Stadnichenko M., Parfilo V.

*In the article, the questions of increase of cyclic durability of power elements by development of technology of epilamination are considered. The basis of the technology is the application of epilam on the activated surface. The use of epilamination to unactivated steel samples has a significantly smaller effect compared to the activated ones (2 times vs. 6 times).*

**Key words:** cyclic durability, power element, vehicle, epilamination, surface-active substances.