

## ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.250-260](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.250-260)

**В.В. Аулін**, проф., д.-р тех. наук, **О.В. Кузик**, доц., канд. техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **І.В. Жилова**, асист.

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

## Механізми внутрішнього та зовнішнього тертя та їх вплив на процеси зношування трибоспряження деталей машин

В статті розглянуті сутність та механізми внутрішньої і зовнішнього тертя, їх характеристики. Узагальненою характеристикою зовнішнього тертя є вибіркоче нерівномірне зношування навантажених робочих поверхонь деталей. Динамічні механізми релаксації напружень поверхневих шарів матеріалів деталей трибоспряжень є механізмом дисипації енергії в процесі внутрішнього тертя. Зазначено, що типовими процесами механічної релаксації в зразках релаксаційного внутрішнього тертя є і релаксація Сноєка, релаксація Кестера і зерногранична релаксація. Розглянуто їх специфіку. Виявлено, що релаксаційні процеси при недостатності дисипативних властивостей тонкої структури матеріалу сприяють підвищенню зносостійкості.

**внутрішнє та зовнішнє тертя, зношування, дисипація енергії, механічна релаксація, зносостійкість, деформація, дислокації**

**Постановка проблеми.** Питання, пов'язані із зовнішнім та внутрішнім тертям і їх впливом на структуру, міцність та процеси зношування матеріалів трибоспряжень деталей машин, вивчені в недостатній мірі. Взаємозв'язок механізмів зовнішнього та внутрішнього тертя представляє інтерес не лише з практичної точки зору, але і як одне з явищ, пов'язаних з особливостями визначальних властивостей матеріалів і фізико-хімічних процесів, що протікають в поверхневих шарах матеріалів деталей трибоспряжень.

Підвищення зносостійкості і надійності, зниження експлуатаційних та енергетичних витрат є нагальною проблемою, загальною для всіх областей техніки. В процесі експлуатації зношування деталей і робочих органів машин збільшує тяговий опір агрегатів, витрату палива і простій машин, зв'язаних з періодичною заміною зношених деталей або їх відновленням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні положення теорії руйнування поверхневих шарів деталей при терті сформульовані за даними досліджень, проведених вітчизняними [1-4] і зарубіжними вченими [5-7], а також колективом співробітників ЦНТУ [8,9]. Виявлено основні закономірності зміни зношувальної здатності деталей в залежності від напружено-деформованого [11,12] та структурного станів поверхневих шарів їх матеріалів [9,10], фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей, характеристик матеріалів робочих (технологічних) середовищ [13,14]. В роботі [15] дано теоретичне обґрунтування методів зниження інтенсивності зношування на основі удосконалення конструкції, оптимізації їх робочих поверхонь та методів і варіантів зміцнення. З'ясовані умови реалізації ефекту самоорганізації робочих (технологічних) середовищ та поверхонь спряжень деталей машин [16].

Виявлено, що процеси зовнішнього тертя та зношування відбуваються при динамічній контактній взаємодії. Причому динамічне напруження зони контакту матеріалів трибоспряжень деталей тертя визначається не стільки макропоказниками зовнішнього тертя (ЗТ), скільки релаксаційними властивостями їх поверхневих шарів [17].

З дисипацією механічної енергії, що підводиться до спряжень деталей машин пов'язаний цілий комплекс фізико-хімічних явищ, які відбуваються в поверхневих шарах матеріалу при взаємодії з робочим (технологічним) та навколишнім середовищем [18]. При цьому важливо виявити роль ЗТ і внутрішнього тертя (ВТ) у цих процесах, їх взаємний перехід і взаємозв'язок та з'ясувати їх вплив на процеси зношування та руйнування трибоспряжень деталей машин, а також розробити способи підвищення їх зносостійкості на основі виявлених механізмів внутрішнього та зовнішнього тертя [19].

Одним із способів підвищення зносостійкості і отримання оптимальної структури матеріалу з мінімальним зношуванням є контроль і управління режимами внутрішнього і зовнішнього тертя. Це потребує наукового обґрунтування підходу вибору параметрів залежно від реологічних і трибологічних властивостей матеріалів трибоспряжень деталей.

Також слід з'ясувати систему ознак здатності матеріалів деталей, робочих та технологічних середовищ трибоспряжень деталей до реалізації процесів та станів самоорганізації [9,20]. При цьому істотного зниження дефектності деталей можна досягти за умови повної дисипації механічної енергії, враховуючи властивості в'язкості і умов протікання процесів ЗТ і ВТ [21,22]. В зв'язку з цим в'язкість є досить вивченою властивістю дисперсних систем [23,24], проте в розрахунках параметрів трибоспряжень деталей машин не враховується залежність в'язкості від швидкості деформації матеріалу деталі, що забезпечується механізмами внутрішнього тертя.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є з'ясування механізмів внутрішнього та зовнішнього тертя спряжень деталей, їх вплив на процеси зношування та розробка на цій основі способів зміцнення робочих поверхонь деталей і реалізації процесів та станів самоорганізації.

**Виклад основного матеріалу.** Серед зовнішніх факторів, що впливають на процес ЗТ є навантаження, швидкість ковзання і температура в зоні тертя. Незалежно від механізму зношування поверхневе чи приповерхневе руйнування, як правило, починається в місцях концентрації напруження. Фактори, що обумовлюють зносостійкість, трибо спряжень деталей машин повинні забезпечувати деконцентрацію контактних напружень, поверхневу локалізацію й однорідність деформації, що пов'язано з реологічними або релаксаційними властивостями матеріалів деталей.

Механічна енергія, що підводиться при зовнішньому терті передається в матеріали деталей трибоспряження за допомогою хвиль "деформація-напруження", трансформуючись у внутрішнє тертя, яке обумовлене непружними явищами і характеризує здатність матеріалу деталі незворотно розсіювати енергію механічних коливань, перетворюючи її в теплову.

Узагальненою характеристикою ЗТ є нерівномірне зношування найбільш навантажених робочих поверхонь деталей, тобто вибіркоче зношування цих поверхонь, обумовлене нерівномірністю розподілу питомого тиску, відмінностями швидкостей і прискорень частинок зносу в процесі їх відносного переміщення по робочій поверхні деталей трибоспряжень.

Механізми дисипації енергії в процесі ВТ за своєю суттю є динамічними механізмами релаксації напружень, що виникають у приповерхневих шарах матеріалів деталей трибоспряжень. Релаксація напружень в зонах контакту обумовлена високим

ВТ деталей машин, що призводить до більш рівномірного їх перерозподілу як на поверхні, так і в об'ємі матеріалу деталей, що запобігає необоротне накопичення дефектів та викликає концентрацію напружень. Звідси випливає, що чим більше частка механічної енергії, що підводиться при ЗТ, розсіюється у формі тепла. Це призводить до того, що чим вища повинна бути зносостійкість спряжень деталей, тим більше спостерігається процес розсіяння механічної енергії. Інформацію про протікання процесів, що відбуваються в матеріалах деталей на границях зерен структури матеріалів деталей дає метод ВТ. Цей метод має високу чутливість до змін складу і структури міжкристалічних поверхонь і приграничних областей.

Вимір температурних та амплітудних залежностей ВТ проводили на установці (рис. 1), що працює за принципом зворотного крутильного маятника. Її характеристики: оцінка коефіцієнта тертя, абразивного зношування поверхонь тертя, методами "голка по диску" та "кулька по диску"; дозволяє змінювати силу тиску до 60 Н, вимірювати силу тертя до 20 Н, змінювати частоту обертання в діапазоні  $1 + 1500$  об/хв, проводити випробування в рідкому середовищі до температури 250°C або на повітрі до 800°C.

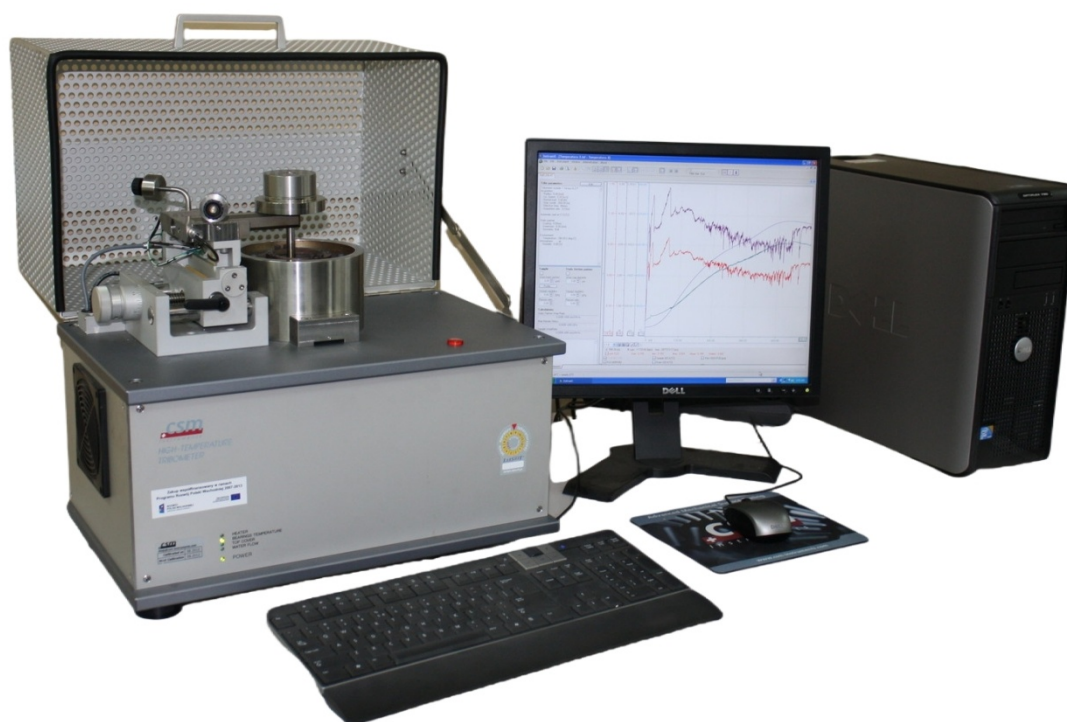


Рисунок 1 – Установа для вимір температурних та амплітудних залежностей ВТ

Джерело: [7]

Оскільки залежності ВТ часто мають екстремальний характер, то виявляються характерні піки ВТ при збільшенні температури, відносній швидкості руху зразків деталей трибоспряжень або нормального навантаження до рівнів, що відповідають тому чи іншому піку ВТ. При цьому спостерігається зниження зносу. Типовими процесами механічної релаксації в металевих зразках, релаксаційного ВТ є: релаксація Сноєка (РС), релаксація Кестера (РК) і зерногранична релаксація (РЗГ).

Зазначимо, що пік ВТ Сноєка пов'язаний з дифузією атомів за механізмом впровадження (вуглець, азот та ін.) в полі напружень металів при циклічній деформації. Зміни деформації при цьому викликані перерозподілом цих атомів у полі напружень, які запізнюються відносно до змін напружень.

Деформаційний пік Кестера є результатом взаємодії дислокацій, що виникають

при пластичній деформації матеріалу (металу) з домішковими атомами впровадження.

Ефекти зернограничної релаксації відображають в'язкий плин по поверхням та субповерхням поділу, а також рухливість вакансій і атомів в приграничних областях. При співпаданні періоду деформації з часом релаксації процесу міграції між границею і об'ємом зерна спостерігається максимальне розсіювання енергії коливань та з'являється пік ВТ.

Для дослідження зазначених явищ, виявлення механізму процесів, що відбуваються, проведені дослідження впливу швидкості тертя ковзання на характеристики тертя і зношування сталей з різною первиною термообробкою. При цьому матеріали деталей трибоспряжень будуть відрізнятися за реологічними властивостями поверхні у середовищах з різною окиснювальною здатністю.

Важливими факторами збільшення зносостійкості матеріалів деталей трибоспряжень і зниження динамічного напруження поверхонь ЗТ є динамічне деформаційне зміцнення (ДДЗ). Дисипація підведеної механічної енергії здійснюється за рахунок невідосконалої пружності контактуючих матеріалів, тобто ВТ, як прояв релаксаційного процесу.

Для розвитку ДДЗ необхідне виконання принаймні трьох умов:

- створення пластичних деформацій вільних дислокацій в матеріалах деталей;
- наявність атомів домішків в твердому розчині матеріалу деталей трибоспряження;
- забезпечення динамічної взаємодії між генеруючими дислокаціями і атомами домішок в матеріалах деталей.

Виявлено, що чим більша швидкість деформації, тим при більш високій температурі проявляється ефект ДДЗ. Формування дислокаційної субструктури під час ДДЗ відбувається в умовах динамічного блокування дислокацій атомами домішків. Процес деформації розвивається, в основному, за рахунок генерації нових дислокацій, а щільність існуючих дислокацій в процесі ДДЗ швидко збільшується. Тривалість проходження ДДС дорівнює часткам секунди. Тому головним постачальником атомів домішок для блокування дислокацій є твердий розчин. Процес ДДС завершується звичайно утворенням атмосфер чи сегрегацій на дислокаціях (без дрібнодисперсних включень). Дислокаційні сегменти між точками закріплення залишаються частково рухомими, і сталевий матеріал деталі зберігає достатню пластичність. Температура, що стимулює підвищену дифузійну рухомість атомів домішок до рівня швидкості руху дислокацій при даній швидкості тертя, співпадає з температурою виникнення окисної плівки. Зміцнення внаслідок ДДС значно підвищує твердість, границю міцності, границю втомленості і витривалості.

Результати досліджень зносостійкості спряжених матеріалів зразків деталей проведені за схемою "ролик-вкладиш". Ролик виготовлено зі сталі 25, а вкладиш зі сталі 45. Дослідження проводили в діапазоні швидкостей 0,3...3,0 м/с на повітрі на машині 2070 СМТ-1 (рис.2).

Результати досліджень наведенні в таблиці 1.

Таблиця 1 – Залежність зносу  $u$  сталі 25 від швидкості руху  $v$  зразка на повітрі,  $T=473K$

$v$ , м/с	0,3	0,4	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
$u$ , г	5,00	1,10	0,55	0,12	0,8	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 2 – Загальний вид машини тертя 2070 CMT-1

*Джерело: розроблено авторами*

З отриманих результатів випливає, що при швидкостях тертя 0,3...1,0 м/с зношування сталі 25 зменшується: при температурі в зоні тертя біля 573К ( $\nu=1,0...1,5$  м/с) зносостійкість зростає в декілька десятків разів. В результаті чого формується інтервал мінімального зносу, що відповідає релаксації Кестера при зазначеній температурі (табл. 2).

Таблиця 2 – Залежність дикримента  $\delta$  затухання внутрішнього тертя від температури Т

Т, К	373	423	473	523	573	623	673	723	773
$\delta \cdot 10^4$	10	15	20	30	52	40	18	10	20

*Джерело: розроблено авторами*

Під час старіння деформованої сталі 25 на температурній залежності внутрішнього тертя на інтервалі 473...573 К (табл. 2), з'являється деформаційний максимум ВТ (релаксація Кестера). З'ясовано, що чим більша висота і площа піку Кестера, тим вища релаксаційна здатність матеріалу деталей машин. Під час ДДС відбувається релаксація напружень безпосередньо в процесі деформації, внаслідок чого зростає енергоємність матеріалу (сталі), знижується динамічна напруженість поверхні тертя, зменшується імовірність появи релаксаційних тріщин. Таким чином, при певній комбінації теплового і механічного впливів на матеріал (сталь) деталі при взаємодії ЗТ і ВТ. При цьому відбувається термопластичне (субструктурне) зміцнення. В таких умовах формується комірчаста структура з розвитком ДДС. Визначено, що перерозподіл дислокацій всередині субзерен (комірок) та генерування дислокацій субграницями сприяє релаксації пікових локальних напружень за механізмами гістерезисного і мікропластичного ВТ, запобігаючи крихкому руйнуванню зміцнених об'ємів матеріалу деталей машин.

Виявлено також, що при зниженні температури деформації зростає напруження ВТ, що ускладнює поперечне ковзання й зменшує імовірність утворення комірчастої структури, а сам розмір комірок зменшується, що приводить до зниження мікропластичності і релаксаційної здатності матеріалу поверхні тертя деталей

трибоспряження.

Виявлено, що явище зміни механічних властивостей металів деталей машин при зміні температурно-швидкісних умов випробувань є характерним не тільки для тертя.

Дослідженнями впливу температурно-швидкісних режимів деформації будь-якого виду на опір деформації технічного заліза і сталі в певному температурному інтервалі (473...573К). Зафіксовано підвищену міцність і твердість сталі (табл. 3), що обумовлено розвитком процесів ДДС.

Таблиця 3 – Залежність границі втомленості  $\sigma_{-1}$  та твердості HV від температури випробувань T

T, К	373	423	473	523	573	623	673	723	773
$\sigma_{-1}$ , МПа	280	320	390	440	455	440	400	350	290
HV, ГПа	0,9	1,2	1,3	1,6	1,7	1,6	1,3	1,2	1,1

Джерело: розроблено авторами

Дослідження показали, що відхилення від монотонної температурної залежності механічних характеристик не супроводжується змінами мікроструктури. Тільки на поверхні з'являється окисна плівка характерного синього кольору.

Визначено, що важливими факторами збільшення зносостійкості матеріалу деталей і зниження динамічної напруженості поверхонь тертя є зміцнення внаслідок ДДС і дисипації підведеної механічної енергії з боку ЗТ за рахунок невідосконалої пружності контактуючих матеріалів трибоспряження деталей, тобто переходу до ВТ, як прояву релаксаційного процесу.

На важливість ролі релаксаційних процесів, що протікають в матеріалах деталей, крім ефекту зміцнення, вказують і результати випробування загартованих сталей, які, не дивлячись на високу твердість і міцність, виявляють низьку зносостійкість при підвищених температурно-швидкісних режимах ЗТ.

Результати проведених лабораторних досліджень загартованих і високо відпущених вкладишів зі сталі 45 в спряженні з роликами зі сталі 25, подано в табл. 4.

Таблиця 4 – Закономірності зміни зносу і коефіцієнту тертя загартованих і відпущених зразків Ст 25 і Ст 45 від зміни швидкості і температури в зоні тертя

v, м/с	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
T, К	333	353	403	453	503	553	593
Знос загартованих зразків сталі 25 і сталі 45							
u, г	5,0	0,20	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
	0,15	0,14	0,13	0,02	0,04	0,05	0,04
Знос зразків сталі 25 і сталі 45, відпущених при 873 К							
u, г	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,05	0,08
	1,20	0,08	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
Коефіцієнт тертя загартованих і відпущених зразків сталі 25 і сталі 45							
$f_{тр}$	0,35	0,32	0,30	0,33	0,34	0,35	0,35
	0,47	0,43	0,38	0,33	0,32	0,33	0,34

Джерело: розроблено авторами

Виявлено, що високовідпущена сталь при малих швидкостях катастрофічно зношується, але при зростанні швидкості переходить в стан високого опору зношуванню. Загартована сталь навпаки, при малих швидкостях тертя чинить опір зносу, а при великих – знос набуває екстремальних значень. Сталь після загартування

характеризується підвищеною структурною метастабільністю і, відповідно, підвищеним ВТ структурно-дислокаційної природи. Це являє собою так званий домінуючий захисний механізм дисипації механічної енергії при невисоких швидкостях і температурах тертя. Зазначимо також, що структурно-дислокаційна релаксація матеріалів трибоспряження деталей запобігає схоплюванню.

Відносно вузький діапазон швидкості, в якому знос зразків деталей мінімальний, пов'язаний з особливостями геометрії трибоспряження, в якій погіршується тепловіддача, що призводить до більш швидкого розігрівання в процесі тертя, а отже і прояву низькотемпературного дифузійного піку Сноєка (перерозподіл атомів впровадження в полі діючих напружень). Подальше підвищення швидкості викликає падіння зносостійкості. Першопричиною різкого збільшення зносу загартованої сталі при певних температурно-швидкісних умовах є процеси ДДС (відпускання під навантаженням). При цьому відбувається розподіл пересиченого твердого розчину (мартенситу) в полі напружень, створеному зовнішнім навантаженням. Зазначене викликає збільшення дисперсності карбідних включень, щільності їх розподілу, появу сегрегації на дислокаціях.

Динамічне старіння матеріалу, особливо при підвищених температурах, інтенсивно впливає на субструктурні процеси: відбувається стабілізація структури сталі, яка супроводжується різкою релаксаційною здатністю. Про це свідчить зменшення піка Кестера. Значний інтервал швидкостей, в якому спостерігається висока зносостійкість, обумовлено рядом факторів: особливостями геометрії трибоспряження деталей; збільшенням швидкості навантаження, що приводить до зміщення піку Кестера; спостереженням магнітомеханічного гистерезису, який відіграє суттєву роль зі зростанням амплітуди циклічної інформації і температури відпускання.

Результати лабораторних досліджень підтверджують міркування, що стосуються матеріалів з різною термообробкою. Встановлено, що при малих швидкостях (0,3 м/с) знос загартованої сталі 45 на два порядки менший зносу відпущеної сталі, а при підвищених швидкостях (3,0 м/с) навпаки, загартована сталь 45 зношується набагато інтенсивніше високовідпущеної. Що стосується зношуваної здатності загартованої сталі 45, то вона в багато разів менша від високовідпущеної сталі, але при підвищених швидкостях картина змінюється на протилежну.

Виявлено, що діапазон швидкостей ковзання зразків деталей, що відповідає мінімізації зносу, залежить від структурного стану сталей. Сталі після високого відпускання при малих швидкостях катастрофічно зношуються, але при зростанні швидкості до 0,5...1,0 м/с переходять в стан, що чинить високий опір зношуванню і зберігає його в великому діапазоні швидкостей до 3,0 м/с. Загартована сталь навпаки, при малих швидкостях тертя чинить опір зносу, а при великих – знос набуває екстремуму.

З процесами релаксації пов'язана і зміна коефіцієнту тертя. При малих швидкостях тертя сталі після високого відпускання підлягають схоплюванню, що підвищує коефіцієнт тертя.

Під час періодичної деформації поверхневого шару деталі при ЗТ в ньому порушується термодинамічна рівновага і при певній температурі і частоті навантаження виникають релаксаційні процеси, що приводять до відставання процесу деформації від напруження. Внаслідок чого значна частина механічної енергії, що підводиться в фізичних контактах трибоспряження зразків деталей незворотно розсіюється у вигляді тепла. Так, релаксація Кестера, що виникає в сталях при температурах 473...623К формує пік ВТ, пов'язаний з пластичною деформацією і присутністю атомів вуглецю і азоту.

Релаксація може бути пов'язана і з переорієнтацією атомів впровадження в силовому полі дислокацій матеріалу деталей під впливом полів створених напружень. Висота піку ВТ зростає зі збільшенням температури загартування сталі, деформації, температури деформації і концентрації атомів впровадження. Зі збільшенням ступеня деформації температура піку може знизитись до 443...453К. Якщо в сталь вводити легуючий карбідоутворюючий елемент, то пік ВТ зміщується в бік більш високих температур, або зовсім зникає.

Релаксація поверхневих шарів трибоспряження деталей – це самопідстроювання системи в часі до його нового рівноважного стану у відповідь на зміну параметру ЗТ. Якщо таким параметром є напруження, то встановлення в часі рівноважного значення в трибоспряженні деталей змінної деформації матеріалу проявляється як непружна механічна релаксація. Під час цього відбувається підстроювання до рівноважного значення параметра ВТ. Протягом цього інтервалу часу здійснюється безпосередній зв'язок між напруженням і деформацією.

Релаксація параметру ВТ супроводжується процесами переносу, тобто, непружна деформація є термодинамічною властивістю, обумовленою зв'язком напруження і деформації з параметрами, зміна яких може відбуватися внаслідок кінетичних процесів. Зазначимо, що зсувні напруження при температурі нижче температури піку ВТ не викликають ефективного руху дислокацій. Це відбувається внаслідок того, що атоми впровадження, що закріплюють їх, є нерухомими. При температурі вищій температури піку ВТ дислокації і атоми домішків зміщуються за фазою прикладеного напруження. При температурі, що відповідає піку ВТ, домішкові атоми відстають від дислокацій, обумовлюючи при цьому непружну (механічну) релаксацію.

В залежності від швидкості ковзання для процесу ЗТ і зношування поверхневих шарів деталей трибоспряжень характерні зони високої та низької зносостійкості поперемінно чергуються. Звісно, що ці зони обумовлені релаксаційними властивостями зміцнених поверхневих шарів спряжених деталей внаслідок термообробки або в процесі їх контактної взаємодії. Визначено, що високі дисипативні властивості матеріалу деталі сприяють зниженню інтенсивності його зносу. Якщо матеріал втратить релаксаційні властивості, то це негайно приведе до його інтенсивного зношування.

Виявлено також, що релаксаційні хімічні процеси при недостатності дисипативних властивостей тонкої структури матеріалу також сприяють підвищенню зносостійкості. При високому рівні ВТ матеріалу його зносостійкість буде максимальна.

В процесі досліджень виявлено, що ВТ і ЗТ можна істотно зменшити, оптимізуючи матеріал деталі зміною його хімічного складу з реалізацією стану самоорганізації робочих поверхонь деталей. Зазначене можна покласти в основу розробки ефективних технологій зміцнення. Результати експериментальних досліджень механізмів ЗТ і ВТ та теоретичне їх обґрунтування дають можливість встановити технологічні та трибофізичні критерії змін характеристик та властивостей поверхневих шарів, матеріалів трибоспряжень деталей, в тому числі і зношувальної здатності, при їх взаємодії. Оскільки при експлуатації деталей автотранспортної і сільськогосподарської техніки спостерігається вибіркоче зношування локальних областей їх робочих поверхонь, то при виборі методів зміцнення доцільно використовувати і диференціальний підхід.

Перспективними в цьому напрямку будуть нерівноважені технології зіцнення, які в поєднанні з нерівноважними процесами тертя можуть сформувати ефективні процеси і стани самоорганізації.

**Висновки:** 1. Результати експериментальних досліджень та їх теоретичні обґрунтування дали можливість встановити технологічні та трибофізичні критерії зміни характеристик та властивостей поверхневих шарів, в тому числі зношувальної здатності, при їх взаємодії.

2. Оскільки при експлуатації деталей машин спостерігається вибіркоче зношування локальних областей робочої поверхні, то при виборі методів зміцнення доцільно використовувати диференціальний підхід.

3. Виявлено, що ВТ і ЗТ можна істотно зменшити оптимізуючи матеріал деталі хімічним складом, реалізацією стану самоорганізації робочих поверхонь деталей. Зазначене може скласти основу для розробки ефективних технологій зміцнення.

## Список літератури

1. Аулін В.В. Підвищення надійності трибосистем реалізацією процесів самоорганізації. Матеріали III міжнар. наук.-техн. конф.: "Сучасні проблеми триботехніки", 7-9 жовтня 2009р. Миколаїв: НУК, С 15-17.
2. Stachowiak, G. Peter J. Blau (2017): Tribosystem Analysis: A Practical Approach to the Diagnosis of Wear Problems. Tribol Lett 65, 136.
3. Blau, P.J. (2009) Friction Science and Technology: From Concepts to Applications. CRC Press, Boca Raton, 43-118.
4. Mikhail S. Blanter, Igor S. Golovin, Hartmut Neuhäuser, Hans-Rainer Sinnig Internal Friction in Metallic Materials. Springer Berlin, Heidelberg. 12 June 2007.
5. Clogston A.M.. Relaxation phenomena in ferrites. The Bell System Technical Journal. Volume: 34, Issue: 4, July 1955.
6. Morris J.G. Dynamic strain aging in aluminum alloys. Materials Science and Engineering. Volume 13, Issue 2, February 1974, Pages 101-108. Materials Testing Laboratory. URL: <https://kois.prz.edu.pl/en/laboratories/materials-testing-laboratory> (дата звернення : 01.08.2024).
7. Аулін В.В., Головатий А.О., Мірний В.Ю., Кузик О.В. Розробка технологій зміцнення деталей сільськогосподарської техніки з урахуванням зовнішнього та внутрішнього тертя в матеріалах. Збірник тез I Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців "Перспективи та тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарських машин та знарядь". 16-17 жовтня 2014 р. Житомир: Житомирський агротехнічний коледж, 2014. С. 52-54.
8. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: Монографія. Кіровоград: КОД, 2014. 370 с.
9. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохімія та реологія зносостійкості: монографія. Хмельницький: ХНУ. 2006. 278 с.
10. Baker L.J., Parker J.D., Daniel S.R. The use of internal friction techniques as a quality control tool in the mild steel industry. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 143-144. p. 442-447.
11. Hoyos J.J., Ghilarducci A.A., Salva H.R., Chaves C.A., Vélez J.M. (2011). Effects of tempering on internal friction of carbon steels. *Materials Science and Engineering: Properties, Microstructure and Processing*. Vol. 528, Issue 9. p. 3385-3389.
12. Leisure R.G., Foster K., Hightower J.E., Agosta D.S. Internal friction studies by resonant ultrasound spectroscopy. *Materials Science and Engineering: A. Proceedings of the 13th International Conference of Internal Friction and Mechanical Spectroscopy*. 2004. Vol. 370, Issues 1-2. p. 34-40.
13. Li S., Deng L., Wu X., Wang H., Min Y. Low-frequency internal friction investigating of the carbide precipitation in solid solution during tempering in high alloyed martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527, Issue 26. p. 6899-6903.
14. Lu X., Jin M., Zhao H., Li W., Jin X. Origin of low-temperature shoulder internal friction peak of Snoek-Kester peak in a medium carbon high alloyed steel. *Solid State Communications*. 2014. Vol. 195. p. 31-34.
15. Shevelya V., Sokolan J., Kupiec B., Korenivskiy M. Effect of Viscoelastic Properties of Treated Steel on the Rheology and Dissipative Properties of Frictional Contact. *Archives of Foundry Engineering*. 2-14. Vol. 14, Special Issue 1. p. 193-198.
16. Shevelya V. V., Sokolan Yu. S. Dynamic relaxation processes in steel friction under the action of heat treatment. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47, No. 4. p. 524-531.
17. Tkalec J., Mari D. Internal friction in martensitic, ferritic and bainitic carbon steel; cold work effects. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 370, Issues 1-2. p. 213-217.
18. Tkalec J., Mari D., Benoit W. Correlation between internal friction background and the concentration of

- carbon in solid solution in a martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A. Proceedings of the 14th International Conference of Internal Friction and Mechanical Spectroscopy*. 2006. Vol. 442, Issues 1-2. p. 471-475.
19. Zheng S., Uruñeña J. M., Dunn A. C., Uhl J. T., and Dahmen K. A. Similarity of internal and external friction: Soft matter frictional instabilities obey mean field dissipation through slip avalanches. *Phys. Rev. Research* 2020. 2. 042016(R).
  20. The basic principles and applications of internal friction and mechanical spectroscopy [J]. *PHYSICS*, 2011, 40(12): 786-793.
  21. Wert C. A. Internal friction in solids. *J. Appl. Phys.* 1986. 60, 1888-1895.
  22. Nian Yin, Zhiguo Xing, Ke He, Zhinan Zhang. Tribo-informatics approaches in tribology research: A review, *Friction*, 2020. 1, p. 1-22.
  23. Nian Yin and Zhinan Zhang. *Tribo-Informatics: The Systematic Fusion of AI and tribology*. CRC Press. 2014. 220.

## References

1. Aulin V.V. (2009). Pidvyshchennia nadiinosti trybosystem realizatsiieiu protsesiv samoorganizatsii [Increasing the reliability of tribosystems by implementing self-organization processes]. *Materialy III mizhnar. nauk.-tekhn. konf.: "Suchasni problemy trybotekhniki - Modern problems of tribotechnics"*, 7-9 zhovtnia 2009r. Mykolaiv: NUK, S 15-17 [in Ukrainian].
2. Stachowiak, G. Peter J. Blau (2017): *Tribosystem Analysis: A Practical Approach to the Diagnosis of Wear Problems*. *Tribol Lett* 65, 136. [in English].
3. Blau, P.J. (2009) *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*. CRC Press, Boca Raton, 43-118. [in English].
4. Mikhail S. Blanter, Igor S. Golovin, Hartmut Neuhäuser, Hans-Rainer Sinning *Internal Friction in Metallic Materials*. Springer Berlin, Heidelberg. 12 June 2007. [in English].
5. Clogston A.M.. Relaxation phenomena in ferrites. *The Bell System Technical Journal*. Volume: 34, Issue: 4, July 1955. [in English].
6. Morris J.G. Dynamic strain aging in aluminum alloys. *Materials Science and Engineering*. Volume 13, Issue 2, February 1974, Pages 101-108. *Materials Testing Laboratory*. URL: <https://kois.prz.edu.pl/en/laboratories/materials-testing-laboratory> (date of application : 01.08.2024) [in English].
7. Aulin V.V., Holovatyi A.O., Mirnyi V.Iu., Kuzyk O.V. (2014). Rozrobka tekhnolohii zmitsnennia detalei silskohospodarskoi tekhniki z urakhuvanniam zovnishnoho ta vnutrishnoho tertia v materialakh [Development of technologies for strengthening parts of agricultural machinery taking into account external and internal friction in materials]. *Zbirnyk tez I Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv ta molodykh naukovtsiv "Perspektyvy ta tendentsii rozvytku konstruktiv silskohospodarskykh mashyn ta znariad - Prospects and trends in the development of constructions of agricultural machines and tools"*. 16-17 zhovtnia 2014 r. Zhytomyr: Zhytomyrskyi ahrotekhnichniyi koledzh, S. 52-54 [in Ukrainian].
8. Aulin V.V. (2014). Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorganizatsii v trybotekhnichnykh systemakh: Monohrafiia [Physical basis of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: Monograph]. Kirovohrad: KOD, 370 s [in Ukrainian].
9. Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P. (2006). *Tribokhimiya i reologiya iznosostoikosti [Tribocchemistry and rheology of wear resistance]*. Khmel'nitskii: KhNU. 278 s [in Russian].
10. Baker L.J., Parker J.D., Daniel S.R. (2003). The use of internal friction techniques as a quality control tool in the mild steel industry. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 143-144. p. 442-447 [in English].
11. Hoyos J.J., Ghilarducci A.A., Salva H.R., Chaves C.A., Vélez J.M. (2011). Effects of tempering on internal friction of carbon steels. *Materials Science and Engineering: Properties, Microstructure and Processing*. Vol. 528, Issue 9. p. 3385-3389 [in English].
12. Leisure R.G., Foster K., Hightower J.E., Agosta D.S. (2004). Internal friction studies by resonant ultrasound spectroscopy. *Materials Science and Engineering: A. Proceedings of the 13th International Conference of Internal Friction and Mechanical Spectroscopy*. Vol. 370, Issues 1-2. p. 34-40 [in English].
13. Li S., Deng L., Wu X., Wang H., Min Y. (2010). Low-frequency internal friction investigating of the carbide precipitation in solid solution during tempering in high alloyed martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527, Issue 26. p. 6899-6903 [in English].
14. Lu X., Jin M., Zhao H., Li W., Jin X. (2014). Origin of low-temperature shoulder internal friction peak of Snoek-Kester peak in a medium carbon high alloyed steel. *Solid State Communications*. Vol. 195. p. 31-34.

15. Shevelya V., Sokolan J., Kupiec B., Korenivskiy M. (2014). Effect of Viscoelastic Properties of Treated Steel on the Rheology and Dissipative Properties of Frictional Contact. Archives of Foundry Engineering. Vol. 14, Special Issue 1. p. 193-198 [in English].
16. Shevelya V. V., Sokolan Yu. S. (2015). Dynamic relaxation processes in steel friction under the action of heat treatment. Strength of Materials. 2015. Vol. 47, No. 4. p. 524-53[in English].
17. Tkalcec J., Mari D. (2011). Internal friction in martensitic, ferritic and bainitic carbon steel; cold work effects. Materials Science and Engineering: A. Vol. 370, Issues 1-2. p. 213-217 [in English].
18. Tkalcec J., Mari D., Benoit W. (2006). Correlation between internal friction background and the concentration of carbon in solid solution in a martensitic steel. Materials Science and Engineering: A. Proceedings of the 14th International Conference of Internal Friction and Mechanical Spectroscopy. Vol. 442, Issues 1-2. p. 471-475[in English].
19. Zheng S., Uruña J. M., Dunn A. C., Uhl J. T., and Dahmen K. A. (2020). Similarity of internal and external friction: Soft matter frictional instabilities obey mean field dissipation through slip avalanches. Phys. Rev. Research 2, 042016(R) [in English].
20. The basic principles and applications of internal friction and mechanical spectroscopy [J]. PHYSICS, 2011, 40(12): 786-793 [in English].
21. Wert C. A. (1986). Internal friction in solids. J. Appl. Phys. 60, 1888-1895 [in English].
22. Nian Yin, Zhiguo Xing, Ke He, Zhinan Zhang. (2020). Tribo-informatics approaches in tribology research: A review, Friction, 1, p. 1-22 [in English].
23. Nian Yin and Zhinan Zhang (2024). Tribo-Informatics: The Systematic Fusion of AI and tribology. CRC Press. 220 [in English].

**Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Oleksandr Kuzyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Inna Zhylova**, Graduate student  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Mechanisms of Internal and External Friction and their Influence on Wear Processes of Tribo-coupling of Machine Parts**

The article describes the essence and mechanisms of internal and external friction, their characteristics. A generalized characteristic of external friction is the selective uneven wear of the loaded working surfaces of parts. Dynamic mechanisms of stress relaxation of the surface layers of materials of tribocoupler parts are a mechanism of energy dissipation in the process of internal friction. It is noted that the typical processes of mechanical relaxation in samples of relaxation internal friction are Snoek relaxation, Kester relaxation, and grain boundary relaxation. Their specifics are considered.

The process of dynamic strain hardening and its influence on wear processes are considered. It is indicated that for the development of the specified strengthening of the samples, it is necessary to create plastic deformations of free dislocations in the materials of the parts, the presence of impurity atoms in the solid solution of the material of the triboconjugation parts, and the provision of dynamic interaction between generating dislocations and impurity atoms in the materials of the parts. It is shown that hardness, the limit of strength, fatigue and endurance increases.

The results of laboratory studies of hardened and highly tempered samples of parts made of steels 25 and 45 on the installation for measuring the temperature and amplitude dependences of internal friction and on the friction machine 2070CMT-1 are given. The rationale for heat treatment regimes and changes in wear patterns and friction coefficient is given. It is shown that the realization of the internal friction parameter is accompanied by transfer processes. It was found that relaxation processes in case of insufficient dissipative properties of the fine structure of the material contribute to the increase of wear resistance.

**internal and external friction, wear, energy dissipation, mechanical relaxation, wear resistance, deformation, dislocations**

*Одержано (Received) 01.09.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.09.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024*