Устаткування та прилади

УДК 621.892.094:621.892.09.6
DOI: 10.33070/etars.1.2021.07

***Кириченко В.І.*[1]*,** докт. пед. наук, канд. хім. наук, проф.,*
***Кириченко В.В.*[2]*,** канд. хім. наук,*
***Нездоровін В.П.*[1]*,** канд. хім. наук, **Стремецький О.І.*[1]
[1] ***Хмельницький національний університет***
вул. Інститутська, 11, 29016 Хмельницький, Україна, e-mail: vikirich@ukr.net
[2] ***ТОВ «Пейселл», Київ***
вул. Солом'янська, 11А, 03110 Київ, Україна, e-mail: kyrychenko.vk@gmail.com

Забезпечення ефективної експлуатації вузлів тертя у контексті добирання функціонально якісних олив

У статті знайшли відображення певні прикладні аспекти нового напрямку енергетики — біосинтетичних енергоносіїв, наприклад, біоолив, одержаних із технічних олій. Розглянуто результати дослідження впливу такого характеристичного фактора базових олив та біоолив, як поверхнева їх активність, енергоефективність та надійність роботи змащених ними за умов межового режиму вузлів тертя. Доведено, що поверхнева активність олив як показник їх функціональної якості обумовлена особливостями будови та властивостей їх молекул, енергетичні поля яких провокують певні трибохімічні взаємодії із трибоактивованими наноповерхнями сталей вузла тертя. Сформовано окремі критерії оцінювання ефективності впливу трибохімічної активності олив на процес модифікування стальних поверхонь функціонуючих вузлів тертя. Викладено сутність рентгенографічного дослідження впливу змащувальних середовищ на стан поверхні сталі за методом ковзаючого пучка Х-променів із наступним аналізом поверхневих шарів на глибині 0,5–7 мкм. Виявлений ефект суттєвого впливу біоолив на фазові перетворення структури та властивостей поверхневого наношару сталі у перебігу трибовипробувань зразків на тертя та зношування. Показано, що ефект деформування кристалічної структури сталі із зміцненням поверхні під деформованим шаром залежить від трибохімічної активності запропонованих трьох мастильних композицій, що характеризуються певним алгоритмичним зростанням поверхневої активності. Встановлено, що інтенсивність фазових перетворень у поверхневих шарах металу (тобто ефект Ребіндера П.О.) під впливом біоолив більш високої трибоактивності у складі композицій 2 та 3 перевищує вплив базової композиції 1 низької трибоактивності на ступінь покращення показників тертя та зношування. Х-структурний аналіз поверхонь зразків сталі 45 у вихідному стані та після випробувань у середовищах кожної з композицій показав, що у процесах тертя має місце руйнування структури аустеніту з виділенням α-фази (фериту). Показано, що інтенсивність такого модифікування поверхонь сталі прогресивно посилюється у зразках, змащених композиціями більшої

© Кириченко В.І., Кириченко В.В., Нездоровін В.П., Стремецький О.І., 2021

трибохімічної активності. Виявлено, що у більш глибоких шарах поверхні зразків сталі (від 0,5 до 7 мкм), змащених композиціями з біооливами після їх випробувань на трибометрі, кількість фериту в шарах зростає, а вміст аустеніту зменшується. При цьому зменшується деформуємість структури кристалів металу, що призводить до зміцнення поверхні під пластифікованим його шаром, а отже й до зниження коефіцієнта тертя та зношування за рахунок сформованої міжповерхневої сервовітно-трибополімерної плівки, стійкої за умов межового режиму тертя. *Бібл. 12, рис. 5, табл. 3.*

Ключові слова: біосинтетичні оливи, мастильні композиції, поверхнева активність, пластичне деформування поверхонь, трибовипробування, Х-графічне дослідження, Х-структурний аналіз, аустенітна та феритна структури сталі.

Вступ. Енергоефективність та надійність експлуатації енергетичного чи іншого устаткування визначається значною мірою як досконалістю конструкцій вузлів тертя, так і функціональною якістю змащувальних матеріалів. Вузли тертя як найвідповідальніші частини будь-якого устаткування, у тому числі і енергетичного, разом з усім комплексом зв'язаних між собою функціональних факторів, зокрема їх конструкціями, типом матеріалів та змащувальних середовищ, режимом експлуатації тощо, називають трибосистемами. Серед усього комплексу факторів, які визначають ефективність роботи трибосистем, особливе місце займає фактор так званої трибологічної якості таких важливих елементів цих систем, як мастильні матеріали, зокрема базові оливи та мастильні композиції на їх основі (скорочено «б.ол-м.комп»). Коли говорять про трибологічну якість б.ол.–м.комп, то мають на увазі інтегровану їх властивість — поверхневу активність у контексті з поверхнями пар тертя. Причому важливо враховувати рівень такої активності, яка оцінюється значеннями відомих фізико-хімічних величин. Отже, як показує практика експлуатації вузлів тертя, базові оливи є одним з важливих факторів управління процесом формування стійких за жорстких умов тертя змащувальних плівок, які забезпечують зниження інтенсивності тертя та зношування. Доведено, що забезпечення ефективної та безпечної роботи технологічного обладнання пов'язане з успішним розвитком такого напрямку сучасної енергетики, як біосинтетичні енергоносії та матеріали із технічних олій. Серед досягнень цього напрямку особливої уваги заслуговують трибологічно якісні та екобезпечні базові біооливи та методи раціонального їх використання у трибосистемах енергетичного устаткування.

Постановки проблеми. У контексті розвитку теоретичних та прикладних аспектів трибології мастильних матеріалів важливо дослідити вплив структури та властивостей матеріалів нового типу — біосинтетичних, одержуваних із технічних олій — на триботехнічну якість наноплівок, сформованих між змащеними ними металічними поверхнями вузлів тертя [1–3]. Для цього потрібно: 1) сформувати базовий понятійно-категоріальний апарат явища впливу змащувальних середовищ різної трибохімічної активності на ефективність експлуатації вузлів тертя машин та механізмів; 2) на основі розроблених інноваційних методів та технологій перероблення технічних олій на новий клас базових продуктів мастильної галузі — біооливи, одержати їх зразки різної трибохімічної активності, які представляють інтерес для трибовипробувань; 3) сформувати три мастильні композиції, які відповідно до складу характеризувалися би алгоритмом зростання їх трибохімічної активності у перебігу трибовипробувань; 4) провести триботехнічні випробування змащених відповідними композиціями зразків сталей на підібраних трибометрах за оптимізованим режимом; 5) провести дослідження поверхонь стальних зразків після випробувань найбільш сучасним методом Х-структурного аналізу, та на основі порівняльного аналізу одержаних графічних залежностей зробити висновок стосовно впливу поверхневої активності нових олив на процеси тертя та зношування.

Стан дослідженості проблеми. Перші наукові дослідження впливу фізико-хімічних процесів, які мають місце у функціонуючих вузлах тертя, змащених мастильними матеріалами певного типу, та властивостей встановлення оптимальних умов ефективної та надійної їх роботи відносяться до 1960–1980-х рр. Результати тогочасних досліджень таких процесів, які заклали основи нового та важливого розділу трибологічної науки — трибохімії, розглянуті у науковій монографії «Системный анализ в трибонике»

(Х.Чихос. Пер. с англ. М. : Мир, 1982. 352 с.) Подальший інтенсивний розвиток науково-технічних засад трибохімії як важливої складової трибологічної науки, а також аналіз досягнень прикладної її частини — триботехніки, знайшли всебічне та системне відображення у двох монографіях [4, 5].

Етапи розвитку трибології розглядаються в монографії [4] у контексті системного аналізу фізико-хімічних процесів, які мають місце у вузлах тертя за умов найпоширенішого режиму їх функціонування — межового. Досягненням у вирішенні науково-технічних проблем трибології мастильних матеріалів, у першу чергу базових олив, присадок тощо, та зокрема у формуванні основ їх трибохімії присвячена монографія [5]. Аналізу сучасного стану та перспективам розвитку галузі мастильних матеріалів як традиційних класів, так і нового класу — біосинтетичних, а також трибохімічним аспектам їх використання, присвячена україномовна науково-технічна монографія [1]. У ній розглядаються триботехнічні особливості функціонування вузлів тертя змащених традиційними та біосинтетичними мастильними композиціями.

Весь комплекс науково-технічних проблем сучасних трибології та триботехніки основоположно викладений у фундаментальному творі під назвою «Tribologi-Handbuch» [6]. В основу твору покладений системний аналіз питань енергетики та механізмів різнобічних за своєю природою явищ та процесів, які мають місце у змащених трибосистемах, а також оптимізації умов ефективного їх функціонування з урахуванням фактора трибоматеріалів та методів трибометрії.

Інноваційні тенденції розвитку сучасної трибології знайшли відображення у монографії, присвяченій таким важливим та взаємозв'язаним її розділам, як трибокаталіз, трибохімія та трибокорозія [7]. Механізм відповідних трибопроцесів у змащених за межового режиму вузлах тертя розглядаються у контексті явища трибоемісії електронів з активованих поверхонь пар тертя. За умов поверхнево-активних матеріалів «трибоелектрони» провокують явище пластичного деформування поверхневих наношарів та сприяють формуванню енергетично стійких змащувальних плівок, а отже забезпечують ефективну, надійну роботу вузлів тертя. Вперше належна увага приділена явищу трибокаталіза, який чинить вирішальний вплив на енергетику процесів хемісорбції та трибохімічних реакцій у вузлах тертя, знижуючи їх енергію активації [8].

Особливо важливого значення набуло висвітлення результатів дослідження такого актуального питання трибохімії, як вплив поверхневої активності (ПА) змащувальних середовищ, зокрема значень дипольних моментів молекул базових олив, їх полярності та поляризуємості на перебіг процесів їх хемісорбції та трибохімічних реакцій. Показано, що рівень полярності та поляризуємості базових олив суттєво впливає на низку поверхневих явищ у наношарах металів тертя, у першу чергу на густину дислокацій та пластичне деформування поверхонь, а також на деформаційне їх зміцнення та, як наслідок, на енергетичні та матеріальні критерії тертя та зношування [8–10].

Належна увага приділена також висвітленню сучасного стану досконалості методів дослідження поверхонь матеріалів взагалі та поверхонь функціонуючих вузлів тертя зокрема з урахуванням механізмів процесів тертя та зношування. Аналіз сутності методів та особливості їх використання розглядаються у контексті динаміки та механізмів фізико-хімічних явищ, які мають місце у поверхневих наношарах змащених поверхонь вузлів тертя, та ефективності їх роботи [1, 6, 11]. Отже, поверхнева активність олив є ініціюючим фактором комплексу трибохімічних та трибокаталітичних процесів, які мають місце між елементами змащених ними вузлів тертя, отже, суттєво впливають на ефективність їх роботи [7–10].

Основний зміст дослідження. У перебігу трибологічних досліджень процесів та явищ, які мають місце у змащених оливами (мастильними матеріалами взагалі) вузлів тертя орієнтувалися на реальний режим їх експлуатації — межовий, з його певними функціональними характеристиками, а саме: а) досить високою енергетичною напруженістю поверхневих шарів тіл тертя в ділянці їх контакту; б) графічною залежністю коефіцієнта тертя (f, ордината) та товщини прверхневої оливної плівки (h) від комплексного параметра $\eta \cdot \upsilon \cdot F_N^{-1}$ (де η — в'язкість; υ — швидкість; F_N — навантаження нормальне), відомою під назвою «крива Штрибека»; в) умовним параметром λ відповідно до формули $\lambda = h / \overline{R}$ (де $\overline{R}$ — середньоквадратичне значення шорсткостей поверхонь), причому за межового режиму тертя $\lambda \leq 0{,}4$ [1, 6, 7].

У функціонуючих вузлах тертя має місце синергетичний ефект одночасних трибовзаємодій між поверхнево-активними (за рівнем енергетики фізико-хімічних взаємодій) базовими оливами та трибоактивованими за умов межового режиму поверхонь металів. У результаті таких взаємодій у змащеному міжповерхневому наношарі вузла тертя формується так зване «поверхневе силове поле» металів, яке, у свою чергу, провокує трибохімічні взаємодії з плівкою олив, що характеризується енергією власного «молекулярного силового поля». Очевидно, що обидві енергетичні характеристики базових олив, а саме: якісна — поверхнева активність, та кількісна — рівень силових полів їх молекул, корелюються між собою, а отже й оцінюються, головним чином, впливом двох взаємозв'язаних фізико-хімічних характеристик молекул олив: а) рівнями полярності та поляризуємості (іноді й діелектричної проникності ε); б) значеннями питомої енергії високополярних функціональних груп.

Порівняльне оцінювання рівня поверхневої активності (ПА) традиційних базових олив як своєрідного показника їх функціональної якості показує, що основний їх клас — мінеральні оливи парафінового (рідше нафтенового) походження, виявляють найнижчий рівень ПА. Саме тому товарні мастильні композиції на їх основі готують з додаванням цілих пакетів досить вартісних та екологічно небезпечних сполук (в основному органічних) із специфічними функціями — присадок, які забезпечують необхідний рівень трибологічної їх якості. Значно вищий рівень ПА виявляють синтетичні базові оливи, але вони є набагато дорожчими та еконебезпечнішими [1, 5, 6].

Проблему створення альтернативних базових олив з високим рівнем ПА, які відповідали б оптимальному критерію «ціна — висока функціональна якість — екобезпека», запропоновано вирішувати за напрямком цілеспрямованого хімічного перероблення технічних олій. За цим напрямком нами розроблені методи та технології одержання з олій галузевих базових продуктів нового типу — біосинтетичних, зокрема біоолив, біоолив-присадок, технічних біорідин, біокомпонентів пластичних мастил тощо [2, 3]. Специфічна хімічна будова молекул таких біосинтетичних продуктів (у першу чергу базових біоолив), велика кількість в їх структурі ненасичених хімічних зв'язків та високополярних функціональних груп обумовлюють високий рівень ПА та сприятливу фізико-хімічну їх активність у трибохімічних процесах змащених ними вузлів тертя. Особливого практичного значення заслуговувало порівняння впливу базових олив різної поверхневої активності, а саме: мінеральних та біоолив на трибохімічні взаємодії у змащених ними міжповерхневих шарах вузлів тертя, які мінімізують процеси тертя та зношування та, як результат, підвищують ефективність та надійність їх роботи [1, 2].

Враховуючи важливість такого трибологічного показника якості базових біоолив (мастильних композицій на їх основі), як поверхнева активність, важливо аналізувати значення кількісних їх характеристик, а саме: а) полярності та поляризуємості (інколи ще й діелектричної проникності) молекул олив; б) вільної енергії функціональних груп. Обидві характеристики відображають (хоча й відносно) особливості будови молекул олив, а отже енергетичний рівень їх силових полів. При цьому, має місце вплив на поверхневу активність олив значень дипольних моментів (μ, D) та поляризуємості (α, см^3) найбільш характерних хімічних зв'язків відповідно до таких даних:

зв'язок ....μ, D.....α, см^3	зв'язок ...μ, D .....α, см^3
H–C 0,3 1,7	C=C .....— 4,2
H–O 1,53 1,9	C–O 0,36 1,5
C–C .....— 1,3	C=O 2,7 3,3

Наведені дані показують, що найбільшу поверхневу активність чинять ті оливи, в молекулах яких містяться зв'язки H–O, C=C та C=O. З іншого боку, на поверхневу активність олив впливає вільна енергія високополярних функціональних груп, зокрема –OH, –C(O)–OR, –CH=CH–CH(OH)– тощо, відповідно до представлених двох характеристик: а) питомої вільної енергії окремих груп $\Delta G_o'/S'$, Дж/м^2; б) поверхонь окремих груп S', м^2/кмоль, на яких розподілена енергія $\Delta G_o'$, Дж/кмоль:

Параметри силових полів	Функціональні групи		
	–OH	–C(O)–OR(–C=O)	–CH=CH–CH(OH)
$(\Delta G_o'/S')\cdot 10^2$, Дж/м^2	4,15	3,30	1,84
S', м^2/кмоль	1,50	2,20	0,68

Наведені дані показують, що найбільші значення силових полів та поверхонь мають такі

групи: гідроксильна –OH та естерна (карбонільна) –C(O)–OR(–C=O) [6, 8, 9].

Дані з оцінки рівня поверхневої активності біоолив цілком підтверджуються аналізом запропонованих математичних рівнянь, які функціонально зв'язують питому силу тертя, а також і коефіцієнт тертя з двома типами провідних характеристик роботи змащених оливами трибосистем: а) з показниками поверхневої активності олив, зокрема дипольними моментами, поляризуємістю, діелектричною проникністю; б) з показниками енергетики пластичного деформування поверхонь та формування змащувальної плівки, зокрема питомою силою тертя, поверхневим натягом, густиною поверхневих дислокацій наноструктур металу, теплотою адсорбції, товщиною плівки тощо. Аналіз математичних залежностей показав, що питома сила тертя зменшується із зростанням значень густини дислокацій та показників активності олив (μ, α, ε), а також із зменшенням товщини плівки (h) [9].

Енергетика всього комплексу трибохімічного процесу на змащених поверхнях трибосистем характеризується величиною енергії активації (E_a, кДж/моль), оцінювання якої спирається на аналіз залежності коефіцієнта тертя (f) від температури (T). Графік цієї залежності характеризується трьома перехідними температурними режимами: двома критичними з максимумами за значень $T_{кр.1}$ та $T_{кр.2}$, а також температурою хімічного модифікування $T_{х.м}$ (рис.1). Встановлено, що при досягненні значення $T_{кр.1}$ має місце руйнування енергетично слабкого адсорбційного межового шару, а за умови $T_{кр.2}$ відбувається руйнування енергетично міцнішого модифікованого шару, сформованого під впливом явища хемісорбції. За умови досягнення значення $T_{х.м}$ забезпечується ефективна робота вузла тертя з оптимізацією провідних його функцій: антифрикційної, протизношувальної та протизадирної — за рахунок сформованої міжповерхневої змащувальної наноплівки, яка має будову специфічного квазітвердого композита з малим опором зсуву, стійкого до руйнувань за умов граничного режиму змащування. Значення температур $T_{кр.1}$, $T_{кр.2}$ та $T_{х.м}$ залежать, у першу чергу, від вмісту в структурі змащувальної плівки (композиті) функціонально якісних біоолив (олив взагалі), зокрема за рівнем їх поверхневої активності (рівнем полярності), а також від оптимізованості провідних експлуатаційних параметрів вузла тертя [1, 10].

Відповідно до завдань дослідження нами сформовані три мастильні композиції, які за своїм

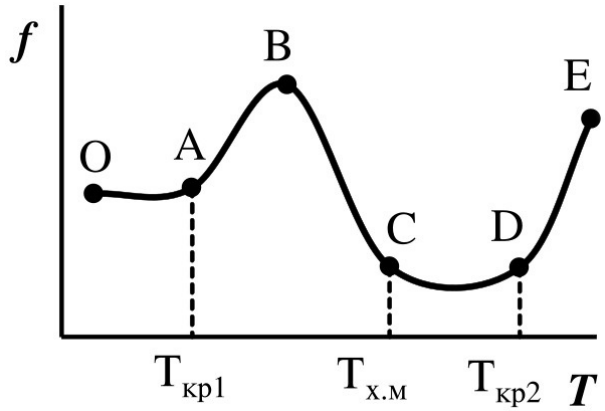


Рис.1. Узагальнена залежність коефіцієнта тертя (f) від температури (T) у трибологічному контакті змащеного трибохімічно активною оливою вузла тертя [10].
Fig. 1. Generalized dependence of friction coefficient (f) from temperature (T) in tribological contact of friction unit lubricated with tribochemically active oil [10].

складом та властивостями відображають заплановану алгоритмічну послідовність зростання їх поверхневої активності: від найнижчого рівня до середнього та далі до високого. Усі три композиції є пластичними мастилами, сформованими на одному й тому ж відомому базовому мастилі «Ціатим-201» (ГОСТ 6267-74), яке є мінеральною оливою середньої в'язкості, загущеною стеаратом літію $C_{17:0}H_{35}COOLi$. Таке мастило призначене для змащування вузлів тертя з малими навантаженнями та температурними режимами (t^o) у межах від –60 до +90 °C [1, 2]. Композиції 1, 2, 3 формували цілеспрямовано шляхом додавання до базового мастила (композиція 1) оптимізованої кількості (25 % ваг.) нових біоолив, одержаних у процесах хімічного модифікування технічних олій: а) оливу Біо-Ол-1 (з ріпакової олії) додають до базового мастила з одержанням композиції 2; б) оливу Біо-Ол-2-*гл*, вироблену із суміші олій ріпакової та рицинової (20 % ваг.), додають до базового мастила з одержанням композиції 3, яка характеризується найвищими значеннями μ, α та $\Delta G_o'/S'$, а отже найбільшою поверхневою активністю (табл.1) [8, 9, 12].

Важливим етапом дослідження були трибологічні випробування зразків сталей (двох типів), змащених запропонованими мастильними композиціями, на відповідних стандартизованих машинах тертя (трибометрах) з визначенням основних функціональних властивостей композицій (табл.2). Триботехнічні випробування зразків Ст. 45 (HB 193), змащених відповідними компо-

зиціями (див. табл.1), які призначалися для наступного рентгено-структурного аналізу їх поверхонь, проводилися на трибометрах СМЦ-2 або SRV, налаштованих на реалізацію зворотньо-поступального взаємного руху поверхонь. Середня швидкість відносного переміщення зразків — 0,4 м/с; тиск у контакті — 4 МПа, частота осциляцій — 110 хв$^{-1}$.

Таблиця 1. Характеристики мастильних композицій, використаних для змащування поверхонь сталі-45 у перебігу триботехнічних випробувань зразків
Table 1. Characteristics of lubricating compositions used to lubricate surfaces of steel-45 during tribotechnical tests of samples

Змащувальна композиція	Склад композиції за компонентами	$M_{сер}$	η, Па·с	Функціональні групи, рівень фізико-хімічної активності
Комп.-1 низької трибохімічної активності	Ціатим-201 — пластичне мастило на основі нафтенової оливи, загущеної стеаратом літія $C_{17:0}H_{35}$–C(O)–O–Li	~ 350	1800 Па·с (при 0 °С, 10^{-1} см)	Стеарат-аніон $C_{17:0}H_{35}C(O)O$– помірної поверхневої активності на рівні фізичної адсорбції; сили Ван-дер-Ваальса
Комп.-2 середньої трибохімічної активності	Ціатим-201 — 75 % (ваг.), решта — біоолива Біо-Ол-1: $[R_{ВЖК}–C(O)–OCH_2]_2$, М 650, ν_{100} 10–12 мм^2/с, де $R_{ВЖК}$ – C(O)– — ацильні групи суміші ВЖ-кислот, похідних від ріпакової олії; де R: $C_{17:1}H_{33}$–; $C_{17:2}H_{31}$–; $C_{17:0}H_{35}$–; –C–CH_2–CH_2–O– — діоксильний залишок етиленгліколя [9]	~ 430	1500 Па·с (при 0 °С, 10^{-1} см)	Групи: –C(O)–O–; $[–C(O)–O–CH_2]_2$; –CH=CH–; $[–CH=CH_2]_2–CH_2$; поверхнева активність на рівні хемісорбції; частково — ефект пластичного деформування, комплексоутворення
Комп.-3 високої трибохімічної активності	Ціатим-201 — 75 % (ваг.), решта — біоолива Біо-Ол-2-*гл* двокомпонентна: $[R_{ВЖК}–(OH)–C(O)–OCH_2]_2$ + $R_{ВЖК}–(OH)–C(O)–OCH_2–CH_2–OH$, $M_{сер.}$493, ν_{100} 8–10 мм^2/с, де $R_{ВЖК}$ — похідні від ріпакової олії; $R_{ВЖК}$ (OH) — від OH-вмісної рицинолевої кислоти $C_{17:1}H_{31}(OH)$– [9]	~ 410	~ 1400 Па·с (при 0 °С, 10^{-1} см)	Групи: –OH; CH=CH–CH(OH)–; $[–C(O)–O–CH_2]_2$; –CH=CH–; $[–CH=CH_2]_2–CH_2$; висока поверхнева активність на рівні трибохімічних реакцій; виражений ефект пластичного деформування

Примітки: М, $M_{сер}$ — молекулярна маса, та те саме середня; η, ν_{100} — в'язкість відповідно динамічна, кінематична за 100 °С; ВЖК — вищі жирні кислоти.

Таблиця 2. Основні функціональні операції та характеристики триботехнічних випробувань експериментальних зразків сталей на трибометрах [9]
Table 2. Basic functional operations and characteristics of tribotechnical tests of experimental samples of steels on tribometers [9]

Нормативний документ	Пара тертя у трибометрі, тип сталі	t, °С, випробування	Частота обертання (коливань) W^{-1}, Гц	Характерне навантаження Н, кГ·с	Трибологічні показники, що визначають	Тип машини тертя
Визначення антифрикційних властивостей						
ASTM D 6425-99	Машини СНЦ-2 або SRV, площини у зворотньо-поступальному русі, Ст.45	50	110–300	4 МПа	коефіцієнт тертя f (протягом 2 год)	Optimol; СМЦ-2; SRV; ВПС-1
Визначення протизношувальних властивостей						
ASTM D 4172-94	Чотири кулі, пірамідально, Ст.ШХ-15	75	1200	147 (15); 392 (40)	діаметр плям зносу $d_{зн}$, мм	Falex–машина; ЧКМ-К1М
Визначення протизадирних властивостей						
ГОСТ 9490-75, ASTM D 2783-88	Чотири кулі, пірамідально, Ст.ШХ-15	20	1460	ступінчасте (по 10 с) збільшення від 196 (200) до 9800 (1000)	навантаження Н: а) критичне $P_{кр}$; б) зварювання $P_{зв}$; в) індекс задиру $I_з$	ЧКМ-К; ЧКМ-1М; Falex-машина Extrem Pressure (EP)

Результати трибологічних випробувань зразків Ст.45 та Ст.ШХ-15, змащених відповідними мастильними композиціями (див. табл.1), на адаптованих трибометрах (див. табл.2) наведені у табл.3.

Дослідження поверхонь Ст.45 у вихідному стані та після випробувань на трибометрі з метою встановлення впливу кожної окремої мастильної композиції (1, 2, 3, див. табл.1) на структуру та властивості тонких поверхневих шарів сталі спиралося на сучасний метод рентгено-(Х-)-структурного аналізу, а саме: на метод ковзаючого пучка рентгенівських (Х-) променів [1, 6]. Товщину досліджуваних шарів сталі у перебігу опромінення їх за таким методом визначає кут нахилу Х-променів до поверхні зразка. Цей метод дає можливість аналізувати шари, заглиблені від поверхні на 10^{-8}–10^{-6} м, які недоступні для традиційних методів рентгенівських досліджень. Для рентгеноструктурних досліджень використовували комплект обладнання: апарат УРС-1,0; трубку БСВ-2; камеру РКД. Час експозиції Х-променями складав 6 год. Кут нахилу зразків вибирався рівним 1°; 2°; 4°; 6°; 10°; 20°.

Таблиця 3. Триботехнічні показники стальних зразків, змащених мастильними композиціями

Table 3. Tribotechnical indicators which are determined during the tests of steel samples (Article 45, Article SHH-15), lubricated with appropriate lubricating compositions (table 1) on adapted tribometers (table 2)

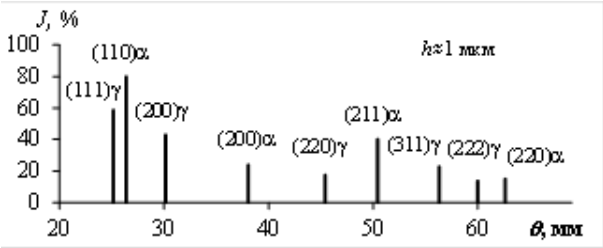
Мастильні композиції (комп.) і рівень їх активності	Зразків Ст.45 (НВ 193)		Зразків Ст.ШХ-15		
	f за умови 200 Н	$t_{конт}$, °С	$d_{зн}$, мм	$P_{кр}$, Н	$P_{зв}$, Н
Комп.-1. низької трибохімічної активності	0,16	60	0,68	620	1470
Комп.-2 середньої трибохімічної активності	0,11	53	0,62	670	1850
Комп.-3 високої трибохімічної активності	0,08	48	0,45	820	2020

Примітки: f — коефіцієнт тертя; $t_{конт}$ — температура зони контакту (вимірювали термопарою на відстані 0,7–0,8 мм від поверхні тертя); $d_{зн}$ — діаметр плями зношування кульок після випробувань на трибометрі; $P_{кр}$ — навантаження критичне; $P_{зв}$ — навантаження зварювання.

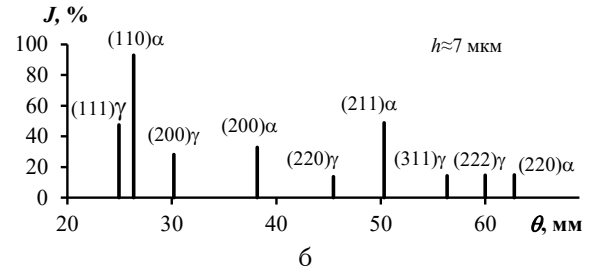
Структурні зміни у тонких поверхневих шарах Ст.45, які відбулися у перебігу тертя в мастильних композиціях 1, 2 та 3, оцінювали шляхом установлення фазового складу поверхні сталі на глибинах 0,5–7 мкм. Оцінювали також фізичне розширення інтерференційних ліній на рентгенограмах, оскільки ширина рентгенівських ліній визначається наявністю у кристалах ділянок когерентного розсівання (блоків) та мікро-деформацією кристалічної решітки. Відомо, що за величинами ширини інтерференційних ліній можна оцінити густину дислокацій на даній поверхневій глибині метала [6, 8, 9].

Х-структурний аналіз поверхні Ст.45 у вихідному стані показав, що її структура складається з α- та γ-фаз. На рентгенограмі спостерігається падіння інтегральної інтенсивності інтерференційних ліній в α-фазі та в γ-фазі металу на великих кутах Брегга-Вульфа, тобто на лініях (220) для α-Fe та на лініях (222) для γ-Fe (рис.2). Падіння інтенсивності ліній свідчить про статичне викривлення кристалічної гратки твердого розчину, який утворюється в результаті проникнення в гратку сталі атомів карбону та нітрогену (мова йде про нітроцементовану сталь). Кількість α- та γ-фаз змінюється залежно від глибини поверхневого шару. На глибині близько 1 мкм кількість α- та γ-фаз приблизно однакова, а на глибині близько 7 мкм кількість α-фази зростає, про що свідчать дані зміни співвідношення інтенсивностей інтерференційних ліній на штрих-діаграмі (рис.2, а, б). Динаміка зміни фізичної ширини інтерференційних ліній (211) свідчить про те, що у поверхневих шарах на глибині близько 0,5 мкм спостерігається максимальне викривлення кристалічної гратки, пов'язане з проникненням у неї іншорідних атомів у процесі нітроцементування сталі. У глибших шарах (≥ 2 мкм) фізична ширина інтерференційних ліній стабілізується (рис.2, в).

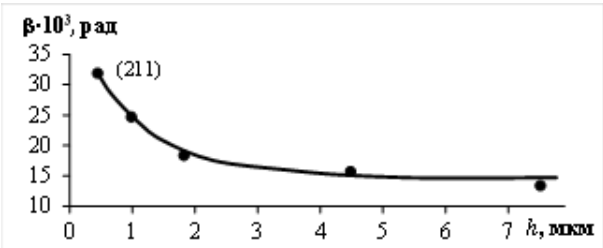
Х-структурний аналіз поверхонь Ст.45 після випробовування на тертя та зношування зразків у середовищі базової мастильної композиції 1 (див. табл.1), яка характеризується низькою три-



а



б



в

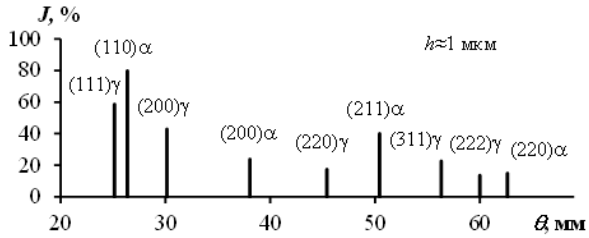
Рис.2. Результати Х-структурного аналізу поверхні Ст.45 до випробувань: J — інтенсивність відбитого випромінювання; θ — відстань ліній від точки відліку: а, б — штрих-діаграми розшифрованих Х-спектрів, знятих з поверхні тертя на глибині h ≈ 1 мкм (а) та h ≈ 7 мкм (б); в — закономірності зміни фізичної ширини інтерференційних ліній залежно від глибини поверхневого шару сталі.

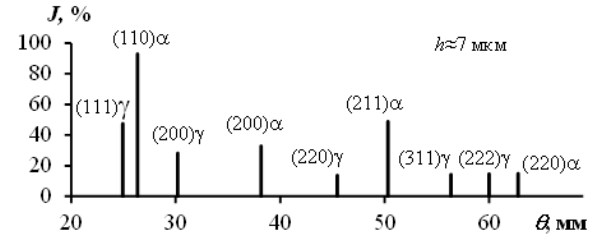
Fig. 2. The results of X-structural analysis of the surface of steel 45 before the tests, where J — is the intensity of the reflected radiation; θ — is the distance of the lines from the reference point: a, b — bar diagrams of decoded X-spectra taken from the friction surface at a depth of h ≈ 1 mkm (a) and at a depth of h ≈ 7 mkm (b); c — regularities of change of physical width of interference lines depending on depth of a surface layer of steel.

бохімічною активностю, засвідчив певні зміни структури, а саме: а) має місце зростання впливу фериту як наслідок розпадання аустеніту; б) із заглибленням у поверхню зразка кількість фериту зростає, а вміст аустеніту зменшується (рис.3, а, б). Тобто відбувається трибо-процес фазового модифікування поверхонь сталі з перетворенням аустенітної фази у феритну.

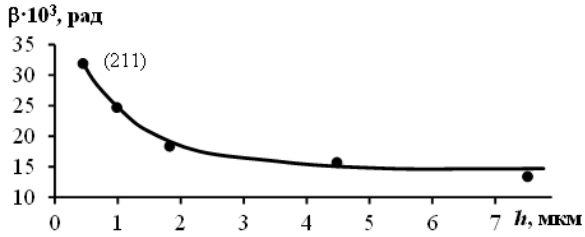
При цьому ферит як твердий розчин вуглецю в α-залізі характеризується низькими показниками міцності та твердості, але високою пластичністю та ударною в'язкістю, а аустеніт як твердий розчин вуглецю в γ-залізі (існує за температури ≥ 1400 °С) характеризується високими показниками розчинності вуглецю в γ-залізі (з межею розчинності близько 2,01 %), міцності та твердості, але показником низької пластичності.

У перебігу випробування сталі в такому ж середовищі (композиція 1) визначалася також фі-





б



в

Рис.3. Результати Х-структурного аналізу поверхні Ст.45 після випробувань на трибометрі (див. табл.3) у середовищі мастильної композиції 1 (див. табл.1) (позначення ті самі, що на рис.2): а, б — штрих-діаграми розшифрованих Х-спектрів, знятих з поверхні тертя на глибині h ≈ 1 мкм (а) та h ≈ 7 мкм (б); в — закономірності зміни фізичної ширини інтерференційних ліній залежно від глибини поверхневого шару сталі.

Fig. 3. The results of X-structural analysis of the surface of steel 45 after testing on a tribometer (Table 3) in the environment of the lubricating composition-1 (Table 1) (the designations are the same as in Fig. 2); a, b — bar diagrams of decoded X-spectra taken from the friction surface at a depth of h ≈ 1 mkm (a) and at a depth of h ≈ 7 mkm (b); c — regularities of change of physical width of interference lines depending on depth of a surface layer of steel.

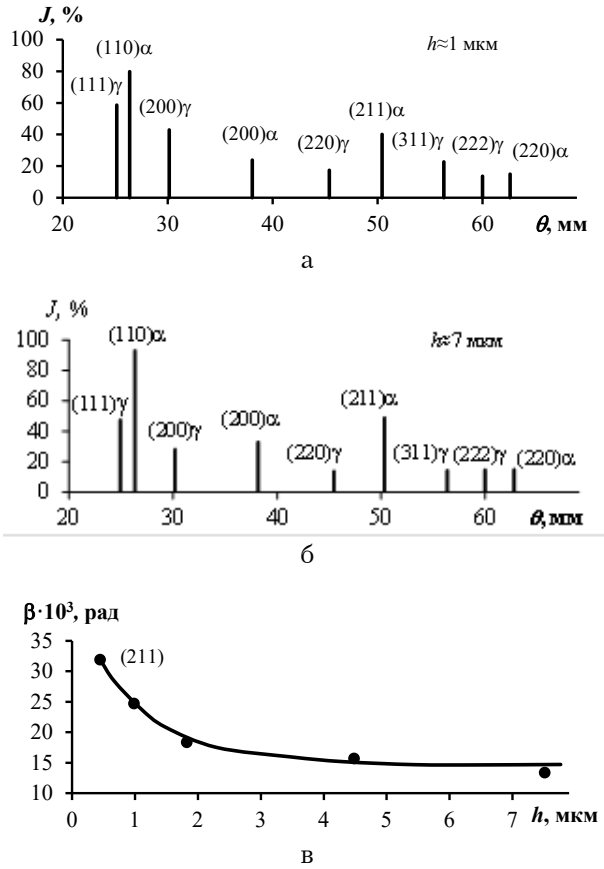


Рис.4. Результати Х-структурного аналізу поверхні Ст.45 після випробувань на трибометрі (див. табл.3) у середовищі мастильної композиції 2 (див. табл.1) (позначення такі самі, що на рис.2): а, б — штрих-діаграми розшифрованих Х-спектрів, знятих з поверхні тертя на глибині h ≈ 1 мкм (а) та h ≈ 7 мкм (б); в — закономірності зміни фізичної ширини інтерференційних ліній залежно від глибини поверхневого шару сталі.

Fig. 4. The results of X-structural analysis of the surface of steel 45 after testing on a tribometer (Table 3) in the environment of the lubricating composition-2 (Table 1) (the designations are the same as in Fig. 2); a, b — bar diagrams of decoded X-spectra taken from the friction surface at a depth of h ≈ 1 mkm (a) and at a depth of h ≈ 7 mkm (b); c — regularities of change of physical width of interference lines depending on depth of a surface layer of steel.

зична ширина інтерференційних ліній β (211), яка набуває дещо більших значень в поверхневому шарі у порівнянні з такими ж лініями у вихідному стані сталі. На глибині близько 7 мкм значення β (211) стають нижчими у порівняння з вихідним станом поверхні сталі (рис.3, в). Зменшення значень β (211) із заглибленням у поверхню зразка пов'язане, ймовірно, з розпаданням структури аустеніту та виділенням α-фази. Тобто за умов такого тертя кристалічна гратка сталі стає менш викривленою (менш деформованою).

Дослідження структури поверхні Ст.45 (за складом та фазовим станом) у перебігу, наступного випробування на тертя та зношуваність у середовищі змащувальної композиції-2 (див. табл.1), яка характеризувалася більш високою

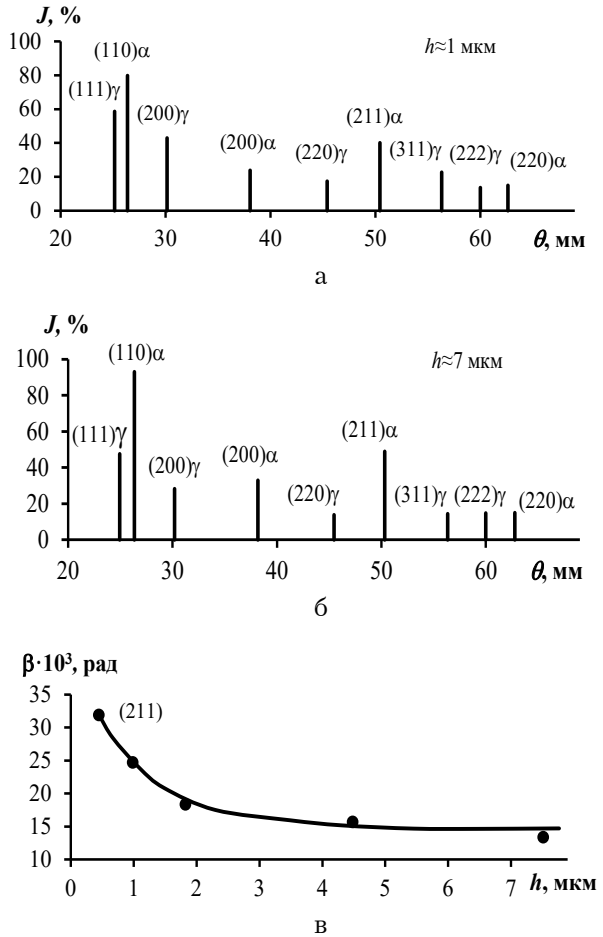


Рис.5. Результати Х-структурного аналізу поверхні Ст.45 після випробувань на трибометрі (див. табл.3) у середовищі мастильної композиції 3 (див. табл.1) (позначення такі самі, що на рис.2): а, б — штрих-діаграми розшифрованих Х-спектрів, знятих з поверхні тертя на глибині h ≈ 1 мкм (а) та h ≈ 7 мкм (б); в — закономірності зміни фізичної ширини інтерференційних ліній залежно від глибини поверхневого шару сталі.

Fig. 5. The results of X-structural analysis of the surface of steel 45 after testing on a tribometer (Table 3) in the environment of the lubricating composition 3 (Table 1) (the designations are the same as in Fig. 2); a, b — bar diagrams of decoded X-spectra taken from the friction surface at a depth of h ≈ 1 mkm (a) and at a depth of h ≈ 7 mkm (b); c — regularities of change of physical width of interference lines depending on depth of a surface layer of steel.

трибохімічною активністю на рівні хемісорбції полярних груп олив, довели, що у такому середовищі має місце інтенсифікація процесу розпадання аустеніту у порівнянні з тертям в інертному середовищі композиції-1 (рис.4 а, б). На глибині ≈ 7 мкм фіксується наявність в основному α-фази (фериту). При цьому фізична ширина інтерференційних ліній в міру заглиблення зменшується (рис.4, в).

Результати Х-структупного аналіза поверхні стальних зразків, які випробувалися у трибометрі на тертя та зношуваність (див. табл.3) у середовищі трибохімічно найбільш активної композиції-3 (див. табл.1), активність якої обумовлена поверхневими хімічними реакціями, переконливо доводять, що у цьому середовищі має місце подальше зростання вмісту фериту в наношарі, зокрема із заглибленням у поверхню (рис.5, а, б). Найбільш виразно цей процес фіксується на глибині близько 7 мкм. Крім того, аналіз виявив тенденцію зниження ширини інтерференційних ліній β (211) у підповерхневих шарах (рис.5, в). Все це свідчить про те, що в даному процесі випробувань відбувався ще більш активний процес пластичного деформування поверхні сталі та формування стійкої за умов межового режиму змащувальної плівки типу квазітвердого композита.

Висновки

Сформовані основні положення ефекту пластичного деформування поверхонь пар тертя трибосистем (ефекта Ребіндера), його значення як критерію трибохімічного впливу змащувальних середовищ на ефективність роботи трибосистем. Показано, що товщина пластифікованого наношару металу вузла тертя залежить від показників хімічної та фізико-хімічної активності нових біоолив (олив взагалі) та їх впливу на інтенсивність трибохімічних взаємодій між поверхнями металів та оливами. Доведено, що трибохімічна активність біоолив у вузлах тертя є вищою у порівнянні з активністю мінеральної оливи. Встановлені напрямок та метод досягнення трибохімічної активності олив бажаного рівня. Х-структурний аналіз поверхонь тертя зразків сталі у вихідному стані та після випробувань у середовищах композицій 1, 2, 3 показав, що в процесі тертя має місце руйнування структури аустеніту з виділенням α-фази, інтенсивність якого прогресивно посилюється у зразках, випробуваних послідовно в композиціях 1 → 2 → 3. Виявлено, що із заглибленням у поверхневі шари металу після випробувань кількість фериту зростає, а вміст аустеніту знижується. Цей процес супроводжується зменшенням деформуємості кристалів металу та зміцненням поверхні металу під пластифікованим його шаром. Встановлена відсутність обгрунтованого зв'язку між фізичною шириною інтерференційних ліній та інтенсивністю зношування сталі у різних змащувальних композиціях.

Список літератури

1. Сіренко Г.О., Кириченко В.І., Сулима І.В. Фізико-хімія паливно-мастильних матеріалів. Івано-Франківськ : Приватне вид-во, 2017. 507 с.

2. Кириченко В.І., Сіренко Г.О., Кириченко В.В. Сучасні паливно-мастильні матеріали: стан та поступ розвитку. Частина 2. Мастильні матеріали. Івано-Франківськ : Приватне вид-во, 2017. 268 с.

3. Кириченко В.І., Кириченко В.В., Нездоровін В.П. Перероблення технічних олій на альтернативні біопродукти галузі мастильних матеріалів: методи та їх ефективність. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2019. № 4. С. 33–43.

4. Буяновский И.А., Фукс И.Г., Шабалина Т.И. Граничная смазка: этапы развития трибологии. М. : Нефть и газ, 2002. 230 с.

5. Заславский Ю.С. Трибология смазочных материалов. М. : Химия, 1991. 240 с.

6. Czichos H., Habid K-H. Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Springer Vieweg, 2015. 794 p.

7. Kajdas Czeslaw, Hiratsuka Ken'ichi. Tribocatalysis, Tribochemistry, Tribocorrosion. Jenni Stanford Pablishing, 2018. 322 p.

8. Алексеев П.Г., Щеглова А.В. Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформационного упрочнения и износостойкость поверхностей. *Трение и износ*. 1983. Т. 4, № 2. С.189–193.

9. Березняков А.И. О влиянии полярных молекул смазочного материала на силу трения. *Трение и износ*. 2001. Т. 22, № 5. С. 513–519.

10. Буяновский И.А. Оценка кинетических характеристик трибохимических процессов при граничной смазке. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2006. № 12. С. 22–26.

11. Куксенова Л.И., Лаптева И.Г., Комаков Л.Г., Рыбакова Л.Н. Методы испытаний на трение и износ. М. : Интернет-ринг, 2001. 152 с.

12. Kyrychenko V.I., Kyrychenko V.V., Ribun V.S., Skladaniuk M.B. Alternative Fuels from Vegetable Oils: Innovative Methods and Technologies of Production and Usage. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. Vol. 21, № 3. P. 552–559.

Надійшла до редакції 17.01.21

Кириченко В.И.[1]***,*** *докт. пед. наук, канд. хим. наук, проф.,*
Кириченко В.В.[2]***,*** *канд. хим. наук,*
Нездоровин В.П.[1]*, канд. хим. наук,* ***Стремецкий А.И.***[1]
[1] ***Хмельницкий национальный университет***
ул. Институтская, 11, 29016 Хмельницкий, Украина, e-mail: vikirich@ukr.net.
[2] ***ТОО «Пейселл», Киев***
ул. Соломенская, 11А, 03110 Киев, Украина, e-mail: kyrychenko.vk@ gmail.com

Обеспечение эффективной эксплуатации узлов трения в контексте выбора функционально качественных масел

В статье нашли отражение определенные прикладные аспекты нового направления энергетики — биосинтетических энергоносителей, например, биомасел, полученных из технических растительных масел. Рассмотрены результаты исследования влияния такого характеристического фактора базовых масел и биомасел, как поверхностная их активность, энергоэффективность и надежность работы смазанных ими в условиях граничного режима узлов трения. Доказано, что поверхностная активность базовых масел как показатель их функционального качества обусловлена особенностями строения и свойств их молекул, энергетические поля которых провоцируют определенные трибохимические взаимодействия с трибоактивированными наноповерхностями сталей узла трения. Сформированы основные требования к оценке эффективности влияния трибохимической активности масел на процесс модифицирования стальных поверхностей функционирующих узлов трения. Изложена сущность рентгенографического исследования влияния смазывающих сред на состояние поверхности стали методом скользящего пучка Х-лучей с последующим анализом поверхностных слоев на глубине 0,5–7 мкм. Выявлен эффект существенного влияния биосинтетических масел на фазовые превращения структуры и свойств поверхностного нанослоя стали в процессе трибоиспытаний образцов на трение и износ. Показано, что эффект деформирования кристаллической структуры стали с упрочнением поверхности под деформированным слоем зависит от трибохимической активности предложенных трех смазывающих композиций, которые характеризуются алгоритмическим возрастанием поверхностной активности. Установлено, что интенсивность фазовых превращений в поверхностных слоях металла (то есть эффект Ребиндера П.А.) под влиянием биомасел более высокой трибоактивности в составе композиций 2 и 3 превышает влияние базовой композиции 1 низкой трибоактивности на степень улучшения показателей трения и изнашивания. Х-структурный анализ поверхностей образцов стали 45 в исходном состоянии и после испытаний в средах каждой из композиций показал, что в процессах трения происходит разрушение структуры аустенита с выделением α-фазы (феррита). Показано, что интенсивность такого модифицирования поверхности стали прогрессивно усиливается в образцах, смазанных композициями большей трибохимической активности. Выявлено, что в более глубоких слоях поверхности образцов стали (от 0,5до 7 мкм), смазанных композициями с биомаслами после их испытаний на трибометре, количество феррита возрастает, а содержание аустенита понижается. При этом уменьшается деформируемость структуры кристаллов металла, что приводит к упрочнению поверхности под пластифицированным его слоем и, как следствие, к снижению коэффициента трения и износа за счет сформированной межповерхностной сервовитно-трибополимерной пленки, устойчивой в жестких условиях граничного режима трения. *Библ. 12, рис. 5, табл. 3.*

Ключевые слова: биосинтетические масла, смазывающие композиции, поверхностная активность, пластичное деформирование поверхностей, трибоиспытания, Х-графическое исследование, Х-структурный анализ, аустенитная и ферритная структура стали.

Kirichenko V.I.[1], *Candidate of Chemical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,* ***Kirichenko V.V.***[2], *Candidate of Chemical Sciences,* ***Nezdorovin V.P.***[1], *Candidate of Chemical Sciences,* ***Stremetsky A.I.***[1]

[1] ***Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine***

11, Institutska Str., 29016 Khmelnytsky, Ukraine, e-mail: vikirich@ukr.net

[2] ***«Peysell», Ltd., Kiev, Ukraine***

11A, Solomyenska Str., 03110 Kiev, Ukraine, e-mail: kyrychenko.vk@gmail.com

Ensuring the efficient operation of friction units in the context of selecting functionally high quality oils

The article reflects certain applied aspects of a new direction of energy — biosynthetic energy sources, such as bio-oils obtained from technical oils. In particular, there are considered results of the research of the influence of such a characteristic factor of base oils and, first of all, bio-oils as their surface activity on energy efficiency and reliability of operation of friction units lubricated by them under the conditions of the boundary regime of friction. It is proved that the surface activity of oils as an indicator of their functional quality is due to the peculiarities of the structure and properties of their molecules, the energy fields of which evoke certain tribochemical interactions with triboactivated nano-surfaces of friction steels. Separate provisions for evaluating the effect of the tribochemical activity of oils on the process of modifying the steel surfaces of functioning friction units have been formed. The essence of X-ray examination of the influence of lubricating media on the condition of the steel surface by the method of a sliding X-ray beam, analyzing the surface layers with a depth of 0.5–7 mkm. The effect of significant influence of bio-oils obtained from oils on the phase transformations of the structure and properties of the steel surface during tribe tests of samples on friction and wear is revealed. It is established that the effect of obtaining the crystal structure of steel with surface hardening under the deformed layer depends on the tribochemical activity of the proposed three lubricating compositions, which are characterized by the algorithmic growth of such activity. It is proved that the tribochemical activity of bio-oils (in compositions 2 and 3, estimated by the intensity of phase transformations in the surface layers (the effect of Rebinder PO), leads, in turn, to improved friction and wear of lubricated samples compared to the composition 1 low triboactivity. X-structural surfaces analysis of the samples of steel 45 in the initial state and after testing in the media of each of the compositions showed that in the friction processes there is a destruction of the structure of austenite with the release of α-phase (ferrite). It is shown that the intensity of such modification of steel surfaces is progressively amplified in samples lubricated with compositions in accordance with their increasing triboactivity. It was found that with the penetration into the surface layers of steel (from 0.5 to 7 mkm), lubricated with bio-oils of the samples after their tribometer tests, the amount of ferrite increases and the content of austenite decreases. This reduces the deformability of the structure of metal crystals, which leads to the strengthening of its surface under its plasticized layer, and hence the reduction of friction and wear due to the formed intersurface servito-tribopolymer film, resistant to friction. *Bibl. 12, Fig. 5, Tab. 3.*

Keywords: biosynthetic oils, lubricating compositions, surface activity, plastic deformation of surfaces, tribe tests, X-graphical research, X-structural analysis, austenitic and ferritic structures of steel.

References

1. Sirenko G.O., Kirichenko V.I., Sulima I.V. Phisico-chimiya palyvno-mastylnych materialiv. [Physical chemistry of fuel and lubricating materials]. Ivano-Frankivsk : Privatne Vydavnytsvo, 2017. 507 p. (Ukr.)

2. Kirichenko V.I., Sirenko G.O., Kirichenko V.V. Suchasni palyvno-mastylni materialy: stan ta postup rozvytku. Ch. 2. Mastylni materially. [Modern fuel and lubricating materials: the state and the course of devel-

opment. Part II. Lubricating materials]. Ivano-Frankivsk : Privatne Vydavnytsvo, 2017. 268 p. (Ukr.)

3. Kirichenko V.I., Kirichenko V.V., Nezdorovin V.P. Pererobleniy technishnych oily na alternatyvni bioprodukty galuzi mastylnich materialiv : Metody ta iych efectyvnist. [The Processing of Industrial Oils for Alternative Bioproducts Lubricants : Methods and their Effectiveness]. *Energotehnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving].* 2019, No. 4. pp. 33–43. (Ukr.)

4. Buyanovsky I.A., Fuchs I.G., Shabalina T.I. Granichnay smazka: etapy razvitiya tribologiy. [Border lubrication: stages of development of tribology]. Moscow : Nefty i gaz, 2002. 230 p. (Rus.)

5. Zaslavsky Yu.S. Tribologiy smazoshnich materialiv. [Tribology of lubricants]. Moscow : Khimiya, 1991. 240 p. (Rus.).

6. Czichos H., Habid K-H. Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Springer Vieweg, 2015. 794 p.

7. Kajdas Czeslaw, Hiratsuka Ken'ichi. Tribocatalysis, Tribochemistry, Tribocorrosion. Jenni Stanford Pablishing, 2018. 322 p.

8. Alekseev P.G, Shcheglova A.V. Vliyanie poverchnostno-aktivnoy sredy na processy deformacionnogo uproshneniy i isnosostoykost poverchnostey. [Influence of the surface-active medium on the processes of deformation simplification and wear resistance of surfaces]. *Trenie i iznos. [Friction and wear].* 1983. 4 (2). pp. 189–193. (Rus.)

9. Bereznyakov A.I. O vliyanii poliyarnich molekul smazochnogo materiala na silu treniya. [On the influence of polar molecules of lubricant on the friction force]. *Trenie i iznos. [Friction and wear].* 2001. 22 (5). pp. 513–519. (Rus.)

10. Buyanovsky I.A. Ocenka kinetisheskich charakteristik tribochimisheskich processov pri granishnoy smazke. [Estimation of kinetic characteristics of tribochemical processes at boundary lubrication]. *Trenie i smazka v machinach i mechanismach. [Friction and lubrication in machines and mechanisms].* 2006. No. 12. pp. 22–26. (Rus.)

11. Kuksenova L.I., Lapteva I.G., Komakov L.G., Rybakova L.N. Metodi ispitaniy na trenie i iznos. [Friction and wear test methods]. Moscow : Internet-ring, 2001. 152 p. (Rus.)

12. Kyrychenko V.I., Kyrychenko V.V., Ribun V.S., Skladaniuk M.B. Alternative Fuels from Vegetable Oils: Innovative Methods and Technologies of Production and Usage. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21 (3). pp. 552–559.

Received January 17, 2021

УДК 666.2

DOI: 10.33070/etars.1.2021.08

Чернявський М.В., *докт. техн. наук,*
Мірошниченко Є.С., Провалов О.Ю., *канд. техн. наук*
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Переведення котлів малої та середньої потужності зі щільним шаром на спалювання твердої паливної біомаси

Проаналізовано наявний парк та можливості заміни антрацитових й переведених на природний газ котлів малої та середньої потужності. Обґрунтовано, що реконструкція з переведенням на біомасу доцільна для котлів тепловою потужністю понад 5 МВт. Основна проблема при цьому — зменшення теплосприйняття топкових екранів та збільшення виносу тепла до конвективної шахти за рахунок збільшеної питомої витрати продуктів згоряння біомаси. На основі аналізу зміни характеру топкових процесів та перерозподілу теплообміну в котлі визначено критерії можливості переведення котлів із викопного палива на біомасу з максимальним використанням наявного обладнання. Найбільш прийнятним паливом для цього визнано гранули з агровідходів та відходів деревини. Розроблено та розрахунково

© Чернявський М.В., Мірошниченко Є.С., Провалов О.Ю., 2021