

Lukasz WOJCIECHOWSKI*

**PROBLEMY KSZTAŁTOWANIA
TECHNOLOGICZNEJ WARSTWY WIERZCHNIEJ
W ASPEKTCIE ODPORNOŚCI NA ZACIERANIE.
CZĘŚĆ 2 – PODEJŚCIE TOPOLOGICZNE**

**PROBLEMS OF THE SURFACE LAYER TECHNOLOGICAL
FORMING IN THE ASPECT OF THE SCUFFING
PERFORMANCE. PART II: THE TOPOLOGICAL
APPROACH**

Słowa kluczowe:

zacieranie, warstwa wierzchnia, podejście topologiczne

Key words:

scuffing, surface layer, topological approach

Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycję topologicznego podejścia do kreowania odporności na zacieranie warstwy wierzchniej na etapie technologicznym. Na podstawie analizy rezultatów cyklu eksperymentów rozpoznano, że odporność na zacieranie zależy od interakcji właściwości reologicznych, morfologicznych oraz fizykochemicznych warstwy wierzchniej. Eksperymentalnie stwierdzono,

* Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, 60-965 Poznań, Polska, tel. +48 61 6652376, e-mail: lukasz.wojciechowski@put.poznan.pl

że istnieją pewne morfologiczne inwarianty zacierania (parametry kształtujące się na zbliżonym poziomie w chwili inicjacji procesu, niezależnie od stanu wyjściowego). Jako optymalne inwarianty morfologiczne wyselekcjonowano motywy chropowatości oraz parametr V_{vv} . W przypadku właściwości fizykochemicznych jako kluczowe uznano polarność powierzchni, a z właściwości reologicznych naprężenia własne. Uwzględniając możliwość sterowania tymi właściwościami zaproponowano koncept limitów „ pVt ” (nacisk \times prędkość \times czas) jako charakterystyki pozwalającej przewidywać, a nawet kontrolować moment inicjacji zacierania.

WPROWADZENIE

Zacieranie należy do katastroficznych form zużywania tribologicznego, która ze względu na swój nagły oraz makroskopowo niszczący charakter prowadzi do awaryjnego unieruchomienia węzła tarcia. Istotnym dla tego zagadnienia jest fakt stosunkowo słabo ugruntowanej wiedzy dotyczącej inicjacji oraz ewolucji tego procesu, w przypadku gdy wiele kluczowych części maszyn jest na niego narażonych. Przykładami mogą być skojarzenia gładzi cylindrowych z pierścieniami tłoków, czopów wałów korbowych z panewkami tłoków, wały krzywkowe z popychaczami, koła zębate, łożyska ślizgowe itd. Taki stan rzeczy jest spowodowany przede wszystkim mnogością czynników obejmujących elementy tribosystemu (materiały pary trącej, metody obróbki ich warstw wierzchnich, reżim smarowania, rodzaj środka smarowego, środowisko itp.), które w zależności od indywidualnych warunków tarcia mogą decydować o inicjacji zacierania. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi na zacieranie może mieć wpływ: podobieństwo strukturalne materiałów pary trącej (np. Coffin [L. 1]), aktywacja energetyczna powierzchni (np. Semenov [L. 2]), wielkość lub szybkość akumulacji produktów zużycia w strefie kontaktu (np. Enthoven i Spikes [L. 3]), osiągnięcie krytycznej temperatury styku (np. Lee [L. 4]), wartość naprężeń wywołujących mechaniczne pękanie (np. Hershberger [L. 5]), czy też chemiczna i mechaniczna wytrzymałość warstwy granicznej (np. Hsu [L. 6]). Dodatkowym problemem w analizie tego zagadnienia jest to, że w każdym z indywidualnych przypadków tribosystemu zacieranie może być inicjowane nie wskutek oddziaływania jednego z wymienionych czynników, a pewnej krytycznej kompilacji kilku z nich. Częściowym potwierdzeniem takiego założenia może być praca [L. 7], w której zestawiono warunki niezbędne do przerwania filmu elastohydrodynamicznego i rozpoczęcia procesu szepiania odpowiedzialnego za zacieranie. Do warunków tych zaliczono przede wszystkim: plastyczną deformację wierzchołków chropowatości, temperaturę kontaktu wyższą niż 150°C , duże naciski w strefie styku, obecność lub nie powierzchniowych warstw ochronnych (tlenkowych, olejowych i innych), własności materiałowe oraz chropowatość

powierzchni. Tylko ten jeden przypadek reżimu smarowania w kontekście zacierania zwraca uwagę na złożoność zagadnienia oraz problem z jednoznaczным ustaleniem mechanizmów rządzących aktywacją tego procesu.

Fakt ten skłania do zadania fundamentalnego pytania dotyczącego celowości poszukiwania uniwersalnej teorii opisującej mechanizm zacierania, w sytuacji, gdy dla różnych konfiguracji tribosystemu może być on wywołany zupełnie inną przyczyną lub kompilacją przyczyn. Wydaje się, że z punktu widzenia praktyki inżynierskiej dużo większe korzyści wynikać mogą z opracowania uniwersalnego i świadomego podejścia do kształtowania warstwy wierzchniej o podwyższonej odporności na zacieranie. Klasyczną metodą kształtowania podwyższonej odporności na zacieranie jest zwiększanie jej twardości. Taki pogląd dominuje w literaturze, przy czym należy mieć na uwadze, że ta sama twardość osiągnięta innymi metodami technologicznymi może przekładać się na inną odporność na zacieranie. Przykładowo Yamamoto [L. 7] sugeruje, że podwyższanie twardości za pomocą obróbki plastycznej na zimno przekłada się na lepszą odporność na zacieranie w porównaniu z obróbką cieplną czy cieplno-chemiczną. Jednakże eksperyment przeprowadzony w pracy [L. 8] wskazuje, że jeżeli para trąca jest smarowana środkiem nieaktywnym, niereagującym chemicznie (w tym przypadku olej parafinowy) z powierzchnią stalową, to wzrost twardości wskutek obróbki plastycznej na zimno nie musi odpowiadać poprawie odporności na zacieranie – co więcej, może prowadzić nawet do jej pogorszenia. Taki stan rzeczy można tłumaczyć wzrostem stanu energetycznego powierzchni jako efektu akumulacji energii mechanicznej wprowadzanej do warstwy wierzchniej podczas zgniotu i przez to jej większej skłonności do szepiania adhezyjnego. Podobne wnioskowanie dla postulatu wzrostu twardości w kontekście zacierania przedstawia Nosal [L. 9], wskazując, że korzystne zmiany twardości wskutek obróbki cieplnej zawsze przekładają się na poprawę odporności na zacieranie, natomiast w przypadku obróbki plastycznej jest to zależne od zastosowanej w tribosystemie substancji smarującej.

Inną metodą kształtowania warstwy wierzchniej w kontekście jej odporności na zacieranie jest dążenie do uzyskania dodatniego gradientu wytrzymałości na ścinanie. Koncepcję tę można realizować dwutorowo. Po pierwsze znając wzajemną zdolność materiałów do tworzenia roztworów stałych, można próbować tak konfigurować materiałowo parę trącą, aby ich powinowactwo chemiczne było jak najmniejsze. W konsekwencji, zdolność do tworzenia szepień adhezyjnych będzie mogła zostać ograniczona, a te, które powstaną, będą na tyle słabe, że nie będą w stanie zagrozić kohezyjnej równowadze materiału rodzimego. Przykładem takiego podejścia może być popularne we współczesnej technice konfigurowanie stopów żelaza ze stopami miedzi. Jeżeli jednak z jakichś względów (np. wytrzymałościowych lub ekonomicznych) musimy skojarzyć dwa podobne materiały (np. stal z żeliwem), rozwiązaniem może być modyfikacja składu chemicznego materiałów w strefie przypowierzchniowej lub

nałożenie warstewki z obcego materiału. Pierwszy z wymienionych sposobów charakteryzuje się wytworzeniem poprzez obróbkę chemiczną lub ciepłochemiczną warstewki tlenków, fosforanów (najczęściej manganu) lub siarczków żelaza. Proces tworzenia się tych warstewek przebiega z bezpośrednim udziałem metalowego podłoża, a elementy ich struktury przenikają w głąb metalu (dzięki czemu uzyskuje się dobre ich związanie) [L. 9]. Druga opcja to tworzenie warstewek z miękkich metali, w tym przede wszystkim z: Pb, Sn, Cd, In, Ag, Au, Cu oraz ich stopów. Duża ich popularność wynika m.in. z technologiczności nakładania umożliwiającej łączenie równomiernych grubości z wymaganą dokładnością. Warstewki te mogą być wykonywane różnymi metodami: galwaniczną, zanurzeniową, napyłaniem próżniowym, nacieraniem itd.

Trzecim kierunkiem w kształtowaniu odporności na zacieranie warstwy wierzchniej jest jej przygotowanie do współpracy z substancją smarującą. To rozwiązanie kojarzone jest przede wszystkim z kontrolowanym kreowaniem struktury geometrycznej powierzchni w aspekcie jej pojemności olejowej. Do najpowszechniej stosowanych obróbek poprawiających pojemność olejową zaliczyć można: gładzenie (honowanie) plateau, nagniatanie oscylacyjne, trawienie elektrochemiczne lub chemiczne oraz metody laserowe. Pomimo że wymienione metody obróbki znacznie różnią się technologią realizacji, pozwalają uzyskać podobny efekt w postaci układu mikrowgłębień na gładkiej powierzchni. Jednakże, rozpatrując kwestię tworzenia morfologii powierzchni, nie można zapominać także o hipotetycznym wpływie zwilżalności na efekty dystrybucji oleju w strefie kontaktu oraz swobodną energię powierzchniową.

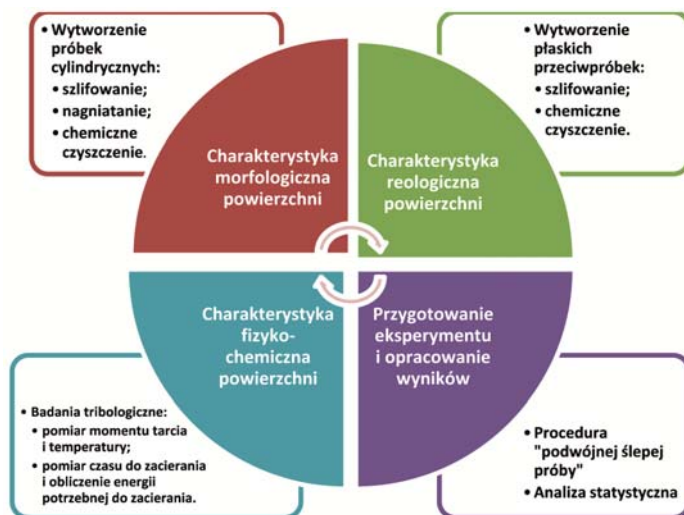
Uwzględniając powyższe ustalenia dotyczące kształtowania warstwy wierzchniej o podwyższonej odporności na zacieranie, można zastanowić się nad pewną technologiczną optymalizacją podejścia do tego problemu. Powstaje pytanie: czy można wyselekcjonować takie parametry warstwy wierzchniej i tak pokierować ich wzajemnym oddziaływaniem, aby uzyskać pożądany kompromis w uzyskaniu maksymalnej odporności na zacieranie? Odpowiedź można uzyskać, wykorzystując topologiczne podejście do zużycia, które w kontekście badań tribologicznych zaproponowano w pracy [L. 10].

Wykorzystując właśnie to podejście i rezultaty szeregu wcześniejszych eksperymentów autora [L. 11÷16], dokonano pewnej syntezy zagadnienia dotyczącego technologicznego kształtowania warstwy wierzchniej w kontekście odporności na zacieranie.

METODYKA BADAŃ

Schemat badań eksperymentalnych dotyczących analizowanego zagadnienia pokazano na **Rys. 1**. Próby zacierania wykonywane były według zasady tzw. „podwójnej ślepej próby”, co oznacza, że osoba bezpośrednio wykonująca badanie do czasu jego wykonania nie wiedziała, jakie próbki testuje. Zgodnie z topologiczną filozofią podejścia do eksperymentu, za odporność na zacieranie

odpowiedzialna jest interakcja pomiędzy właściwościami fizykochemicznymi, reologicznymi oraz morfologicznymi. Na podstawie własnych badań i analiz [L. 11÷16] stwierdzono, że najlepszym reprezentantem parametrów reologicznych będą naprężenia własne, parametrów fizykochemicznych – swobodna energia powierzchniowa natomiast morfologicznych – motywy chropowatości oraz krzywe nośności.



Rys. 1. Schemat strategii eksperymentalnej

Fig. 1. Flow chart of experimental research strategy

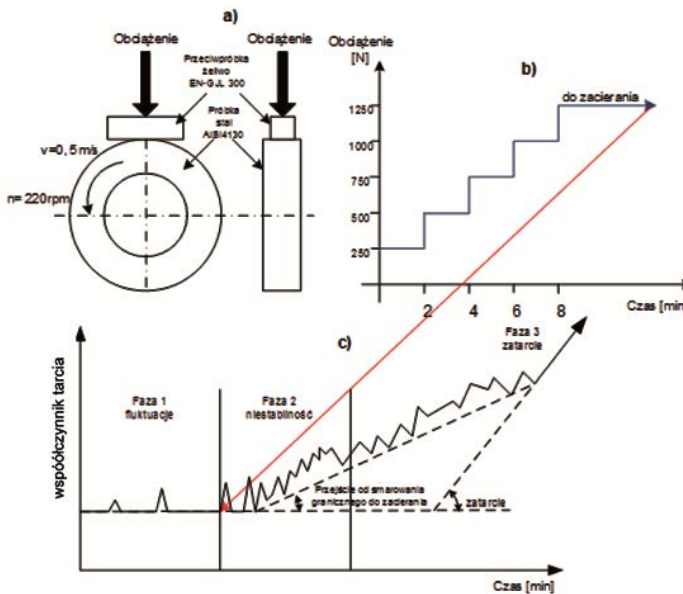
W podstawowej części eksperymentu wykorzystano próbki cylindryczne wykonane ze stali AISI 4130 o średnicy 45 mm oraz szerokości 12 mm. Cylindryczne powierzchnie wszystkich próbek poddano szlifowaniu w taki sposób, aby uzyskać parametr chropowatości $R_a = \text{ok. } 0,5 \mu\text{m}$. Następnie próbki podzielono na sześć partii, które nagniatano z sześcioma różnymi wartościami nacisku narzędzi na obrabianą powierzchnię. Ich wartości wynosiły odpowiednio: 1,30 GPa, 1,64 GPa, 1,87 GPa, 2,06 GPa, 2,22 GPa oraz 2,36 GPa. Pozostałe warunki nagniatania to: prędkość – 100 m/min, posuw – mm 0,08 mm/obr., liczba przejść narzędzi – 2, smarowanie – olej maszynowy z naftą (1:1).

Pomiary morfologii powierzchni wykonano za pomocą interferometru optycznego w pięciu różnych miejscach powierzchni nagniatanej (prostokąt $1,2 \times 0,9 \text{ mm}$) co 72° na obwodzie cylindra z każdej partii próbek. Analizie poddano m.in. parametry wysokościowe, hybrydowe i funkcjonalne, krzywe nośności wraz z charakterystykami, motywy powierzchni, ich izotropowość, fraktale itd. Na podstawie wcześniejszych badań [L. 13] stwierdzono, że istotna dla zagadnienia zacierania może być szczególnie obserwacja motywów chropowatości oraz parametru V_{vv} określającego pojemność dolin.

Wyznaczanie swobodnej energii powierzchniowej (SFE – od ang. *surface free energy*) oraz jej składowych wykonano dwiema (w celach weryfikacyjnych) metodami: Owensa-Wendta (szczegóły metodyki w [L. 11]) oraz van Ossa (szczegóły metodyki w [L. 12]). W pracy [L. 11] zaproponowano wprowadzenie do zastosowań tribologicznych terminu polarności powierzchni, definiowanej jako stosunek składowej polarnej SFE do jej wartości całkowitej.

Naprężenia własne wyznaczono metodą dyfrakcji rentgenowskiej w trzech punktach (co 120°) na powierzchniach cylindrycznych próbek z każdej partii. Wartość średnią wykorzystywano następnie do dalszej analizy.

Kryterium identyfikacji zacierania był gwałtowny i fluktuacyjny wzrost współczynnika tarcia pod stałym obciążeniem. Procedurę przykładania obciążenia pokazano na Rys. 2.



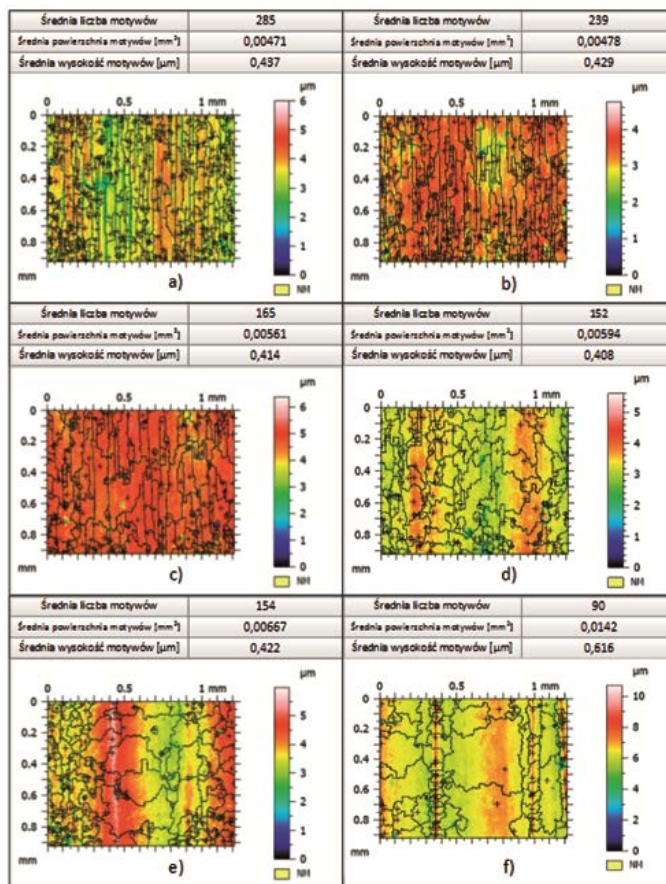
Rys. 2. Kinematyka i geometria węzła tarcia w badaniach zacierania (a), procedura przykładania obciążenia (b), identyfikacja współczynnika tarcia w zależności od czasu i obciążenia (c)

Fig. 2. Kinematics and geometry of the scuffing investigations (a), procedure of load application (b) and coefficient of friction versus time and load (c)

Badania wykonywano w warunkach smarowania jednokropłowego za pomocą oleju przekładniowego z 5% dodatkiem siarczku olefinowego jako dodatku EP. Prędkość poślizgu pomiędzy obracającymi się cylindrami a prostopadłościennymi przeciwpółkami żeliwnymi (EN-GJL 300) wynosiła 0,5 m/s. W celach statystycznych próby zacierania powtarzano 5-krotnie dla każdej konfiguracji próbek z przeciwpółkami.

WYNIKI I ICH DISKUSJA

Analiza charakterystyk morfologii powierzchni w stanie technologicznym wskazuje na ich dużą zależność od zastosowanego nacisku podczas obróbki nagniataniem. Bardziej szczegółowe informacje dotyczące tych zmian znaleźć można w artykule [L. 13], natomiast na potrzeby tej pracy interpretacja zmian morfologicznych powierzchni ograniczona została do motywów chropowatości oraz parametru V_{vv} . Na **Rys. 3** pokazano przykładowe wizualizacje motywów chropowatości dla próbek z każdej partii wraz ze średnimi wartościami ich podstawowych parametrów, tj. liczby motywów, ich wysokości i powierzchni. Jak można zaobserwować, wzrost nacisku nagniatania przekłada się na spadek liczby motywów i ich wysokości oraz wzrost powierzchni.

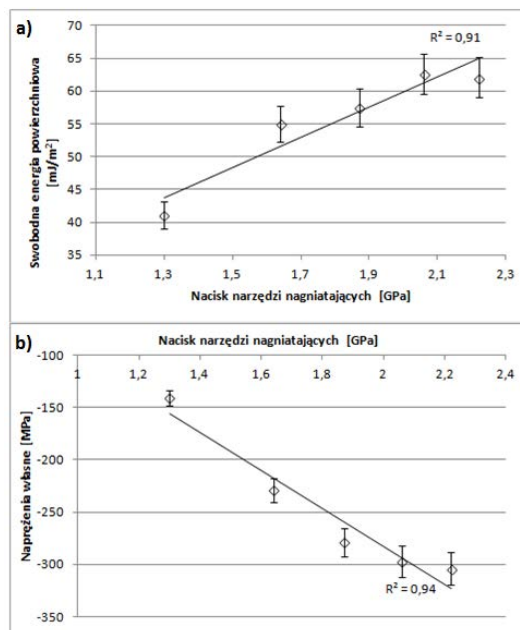


Rys. 3. Widoki motywów, ich średnia liczba, powierzchnia i wysokość dla cylindrów ze stali AISI 4130 nagniatanych z naciskiem: 1.3 (a), 1.64 (b), 1.87 (c), 2.06 (d), 2.22 (e), 2.36 (f) [L. 13]

Fig. 3. Motifs views, their mean number, area and height of AISI 4130 cylinders burnished under a pressure of: 1.3 (a), 1.64 (b), 1.87 (c), 2.06 (d), 2.22 (e), 2.36 (f) [L. 13]

Wskazuje to oczywiście na spłaszczenie powierzchni wskutek nagniatania. Wyjątkiem jest ostatni, szósty poziom nacisku narzędzi nagniatających (2,36 GPa), dla którego obserwujemy wyraźny wzrost wysokości motywów chropowatości. Taki stan rzeczy spowodowany jest osiągnięciem tzw. stanu nasycenia zgniotem, w którym stopień upakowania ziaren osiągnął optymalny poziom, a dalszy zgniot powoduje już rozpoczęcie procesu niszczenia powierzchni. Eliminując ten przypadek z dalszych rozważań możemy stwierdzić bliską zależność między charakterystykami motywów, a spłaszczeniem powierzchni. Dla tych samych powierzchni (w stanie technologicznym), w oparciu o pomiary statycznego kąta zwilżania cieczami wzorcowymi (woda, dijdometan, formamid) wyznaczono wartości SFE oraz jej składowych. W pracy [L. 11] dokonano analizy w oparciu o metodykę Owensa-Wendta, a w pracy [L. 12] o metodykę van Ossa [L. 12].

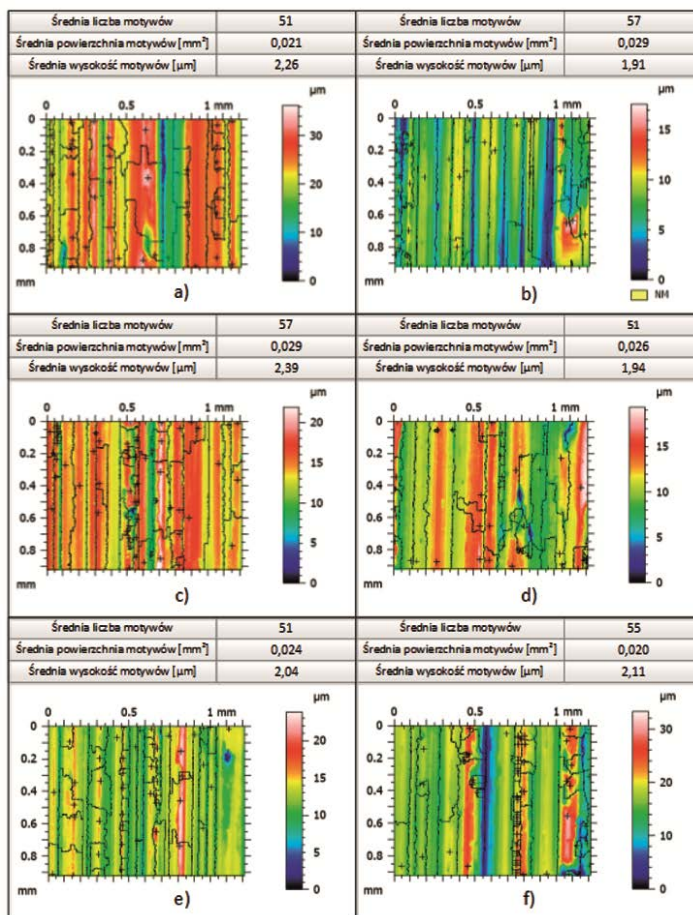
W obu przypadkach zaobserwowano, że wartość SFE wzrasta wraz ze wzrostem nacisku w czasie obróbki (dla pierwszych czterech poziomów nacisku nagniatania, po czym stabilizuje się dla nacisku 2,22 GPa i maleje po osiągnięciu stanu nasycenia zgniotem). Związane jest to zarówno ze spłaszczeniem powierzchni jak i akumulacją energii mechanicznej, która wprowadzana jest do warstwy wierzchniej wskutek obróbki plastycznej na zimno (Rys. 4a). Dodatkowo stwierdzono, że za wzrost ten odpowiedzialna jest głównie składowa polarna SFE.



Rys. 4. Wpływ nacisku narzędzi nagniatających na: swobodną energię powierzchniową (a) i naprężenia własne (b)

Fig. 4. The influence of the pressure of burnishing tools on: surface free energy (a) and residual stresses (b)

Po wykonaniu testów odporności na zacieranie dokonano analizy tych samych parametrów warstwy wierzchniej. Na **Rys. 5** zaprezentowano zmiany, jakie wskutek zacierania charakteryzowały motywy oraz parametry je opisujące.



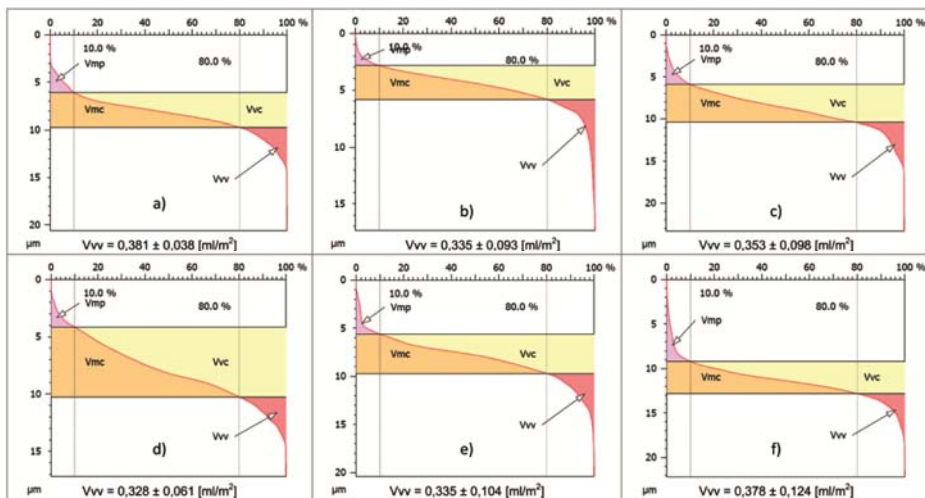
Rys. 5. Widoki motywów oraz ich parametry po próbach zacierania dla cylindrów ze stali AISI 4130 nagniatanych z naciskiem: 1.3 (a), 1.64 (b), 1.87 (c), 2.06 (d), 2.22 (e), 2.36 (f) [L. 13]

Fig. 5. Motifs views and their parameters after scuffing tests for AISI 4130 cylinders burnished under a pressure of: 1.3 (a), 1.64 (b), 1.87 (c), 2.06 (d), 2.22 (e), 2.36 (f) [L. 13]

Najważniejsze spostrzeżenie dotyczy faktu, że niezależnie od stanu technologicznego warstwy wierzchniej (czyli de facto punktu wyjścia – **Rys. 3**) liczba motywów w chwili inicjacji procesu zacierania osiągnęła zbliżoną liczbę 53 ± 4 .

Także parametry charakteryzujące geometrię motywów osiągnęły zbliżone wartości w chwili rozpoczęcia zacierania, tj. powierzchnia motywów:

0,025 ±0,003 mm², a wysokość motywów: 2,15 ±0,2 μm. Taki stan rzeczy świadczy o tym, że prawdopodobnie wszystkie powierzchnie (niezależnie od stanu wyjściowego) w chwili rozpoczęcia zacierania (niezależnie od tego jak długo wcześniej pracowały) osiągnęły pewne krytyczne ukształtowanie rzeczywistej powierzchni styku. Powierzchnia ta musiała charakteryzować się pewną krytyczną pojemnością olejową, która była niewystarczająca do właściwego zasilania strefy stuku w substancję smarującą oraz krytyczną powierzchnią wierzchołków chropowatości, która umożliwia osiągnięcie wystarczających nacisków do przerwania warstwy granicznej. Potwierdzeniem takiego wniosku jest analiza krzywych Abbotta-Firestone'a dla zacieranych próbek, w szczególności zaś ich parametru Vvv (**Rys. 6**).



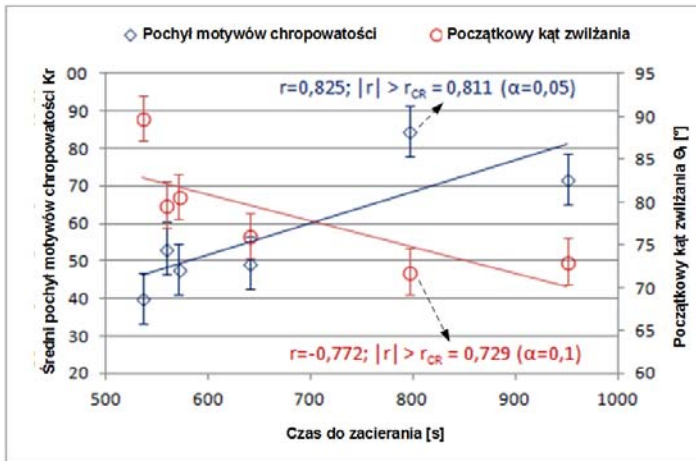
Rys. 6. Parametr Vvv po próbach zacierania dla cylindrów ze stali AISI 4130 nagniatanych z naciskiem: 1.3 (a), 1.64 (b), 1.87 (c), 2.06 (d), 2.22 (e), 2.36 (f) [L. 13]

Fig. 6. The Vvv parameter after scuffing tests for AISI 4130 cylinders burnished under a pressure of: 1.3 (a), 1.64 (b), 1.87 (c), 2.06 (d), 2.22 (e), 2.36 (f) [L. 13]

Także i w tym przypadku stwierdzono osiągnięcie podobnych wartości w chwili rozpoczęcia zacierania ($V_{vv} = 0,352 \pm 0,023 \text{ ml/m}^2$), niezależnie od stanu wyjściowego próbek (w stanie technologicznym Vvv zmieniało się od 0,0683 do 0,0447 ml/m² w zależności od warunków nagniatania).

Rozpatrując kwestię relacji między morfologicznymi charakterystykami powierzchni a jej odpornością na zacieranie, warto zwrócić uwagę na fakt, że nie tylko kwestia pojemności olejowej (co wyraża w istocie Vvv) ma tutaj duże znaczenie. Dodatkowa analiza motywów chropowatości za pomocą parametru charakteryzującego ich pochył Kr prowadzi do wniosku, że także kształt wierzchołków chropowatości ma tutaj znaczenie, przez bezpośredni wpływ na zwilżalność powierzchni olejem i jego właściwą dystrybucją w obrębie strefy styku.

W pracy [L. 14] zbadano wpływ pochyłu motywów chropowatości powierzchni na kąt zwilżania jej olejem stosowanym później w próbach zacierania. Na Rys. 7 pokazano relację tego parametru z dynamicznym kątem zwilżania (w fazie początkowej, zaraz po upadku na powierzchnię próbki) i czasem do wystąpienia zacierania.



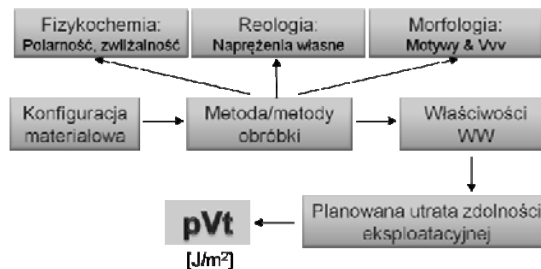
Rys. 7. Zależność czasu do zacierania od początkowego kąta zwilżania oraz średniego pochyłu motywów chropowatości [L. 14]

Fig. 7. Time to scuffing versus mean slope of roughness motifs and initial contact angle [L. 14]

Analiza relacji wzajemnych relacji między odpornością a zwilżalnością olejem i kształtem motywów chropowatości skłania do nieco zaskakującego spostrzeżenia. Okazuje się, że początkowy kąt zwilżania nie przyjmuje najmniejszych wartości dla najbardziej spłaszczonych powierzchni. Można zatem założyć, że dla efektywnej dystrybucji oleju w obrębie styku pary tarciowej lepszym rozwiązaniem jest stworzenie ukierunkowanego rozptyłu oleju w sieci równoległych mikrorowków niż niekontrolowane spłaszczenie powierzchni i rozptył substancji smarującej w przypadkowy sposób. Wniosek ten znalazł także potwierdzenie w literaturze, w pracy [L. 17]. Dla określenia zdolności powierzchni do zwilżania za pomocą olejowych środków smarowych zaproponowano wprowadzenie terminów powierzchniowej „olejofobii” lub „olejofilii” [L. 14]. Warto jednak pamiętać, że znaczenie zwilżalności może mieć różny charakter w zależności od rodzaju interakcji środka smarowego z powierzchnią. Dla formulacji smarowych nieaktywnych powierzchniowo lub oddziałujących z powierzchnią fizycznie zjawisko zwilżalności może odgrywać kluczową rolę. W przypadku środków smarowych chemicznie reagujących z powierzchnią w grę wchodzi także inne czynniki, np. polarność powierzchni [L. 11÷12]. W zależności od konfiguracji tribosystemu należy mieć świadomość ewentualnych synergizmów [L. 14] lub antagonizmów różnych czynników w kontekście

odporności na zacieranie. Dodatkowo, zastosowanie środków smarowych aktywnych powierzchniowo stwarza niebezpieczeństwo zużywania korozyjnego powierzchni. Fakt ten rozpoznano w pracy [L. 12], gdzie stwierdzono, że wzrost polarności powierzchni rzeczywiście przekłada się na wzrost odporności na zacieranie dla oleju z dodatkiem siarczku olefinowego, jednakże równolegle następowała akceleracja zużywania korozyjnego powierzchni. W takich przypadkach należy zidentyfikować kompromisową wartość polarności, optymalną z punktu widzenia obydwu mechanizmów niszczenia powierzchni.

Przeprowadzony przez autora cykl badań [L. 11÷16] dotyczących podejścia topologicznego do kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej pozwolił wyselekcjonować te jej parametry, które mają największe znaczenie w kreowaniu odporności na zacieranie. Na tej podstawie zaproponowano prosty schemat (Rys. 8) podejścia do technologii warstwy wierzchniej dla materiałów par trących szczególnie narażonych na zacieranie. W ocenie autora dalszy rozwój tej metodyki może doprowadzić do osiągnięcia całkowitej kontroli nad inicjacją procesu zacierania, oczywiście w obrębie zadanych wymuszeń zewnętrznych. W tym przypadku wykorzystać można klasyczną metodę iloczynu pV (nacisk \times prędkość) rozszerzoną o czas, podczas którego czynniki te będą oddziaływać na elementy pary trącej. Pojawia się zatem koncepcja iloczynu pVt (nacisk \times prędkość \times czas) jako uniwersalnego wyznacznika zdolności eksploatacyjnych węzła tarcia. Idea takiego podejścia do formowania warstwy wierzchni musi zostać skonfrontowana z różnymi konfiguracjami materiałów pary trącej oraz rodzaju oleju zastosowanego do jej smarowania (z uwzględnieniem planowanego reżimu smarowego).



Rys. 8. Schemat podejścia topologicznego do kształtowania warstwy wierzchniej z punktu widzenia odporności na zacieranie

Fig. 8. The diagram of the topological approach to the surface layer forming from the scuffing performance point of view

Fakt konfiguracji materiałowej jest zagadnieniem o tyle interesującym, że jego wpływ na przebieg procesu tarcia (w konsekwencji zużycia, także jego katastroficznych postaci) może mieć różnoraki wpływ. Podstawową sprawą jest tutaj kwestia zdolności materiałów do adhezji jako zjawiska bazowego do powstawania szcpeń adhezyjnych między materiałami, które w skrajnych

przypadkach ewoluują do skali makro inicjując zacieranie. Już w pracy Coffina [L. 1] zwrócono uwagę na różną wzajemną skłonność metali do adhezji. Wiąże się to najczęściej z szeroko rozumianym podobieństwem materiałów, które dla tzw. zacierania gorącego określane jest regułą Hume'a-Rothery'ego. Zakłada ona, że możliwość powstania roztworu stałego dwóch metali możliwe jest, jeżeli spełnione zostaną cztery warunki: zbliżone wartości wartościowości, elektryczności i promieni atomowych oraz podobieństwo sieci krystalicznej. Posługiwanie się tą regułą ma jednak swoje ograniczenia związane z tym, że nie można jej zastosować, gdy nie dochodzi do przekroczenia temperatury topnienia metalu (a więc przypadek tzw. zacierania zimnego) oraz faktem, że trudno ją zastosować do materiałów innych niż czyste pierwiastki. W przypadku stopowych materiałów konstrukcyjnych reguła ta może być swego rodzaju „kierunkowskazem” w kwestii doboru materiałów, jednakże nie będzie w sposób jednoznaczny determinować zdolności materiałów do szepiania. Dla typowych materiałów konstrukcyjnych o charakterze stopowym (stale, żeliwa, mosiądze, brązy itd.) zagadnienie to należy rozpatrywać indywidualnie, tym bardziej że dodatkowym czynnikiem może tutaj okazać się również nie tylko wzajemna, tarciowa interakcja materiałów, ale i ich oddziaływanie z substancją smarującą. Przykładowo w pracy [L. 15] przedstawiono badania, w których analizowano odporność na zacieranie żeliw (szarego i sferoidalnego) w różnych konfiguracjach materiałowych i smarowych. Rezultaty przeprowadzonych eksperymentów wskazały na szereg bardzo interesujących faktów. Na przykład stwierdzono, że niewielki dodatek niklu do żeliwa sferoidalnego wywołuje pewien synergiczny efekt różnych właściwości materiału (poprawa plastyczności i wytrzymałości mechanicznej przy jednoczesnym obniżeniu przewodności cieplnej), które w konsekwencji przekładają się na jego znaczącą odporność na zacieranie. Innym przykładem (także rozpoznany w pracy [L. 15]) istotnej roli konfiguracji materiałowej w inicjacji procesu zacierania mogą być próby zacierania skojarzeń stalowo-stalowych i stalowo-mosiężnych smarowanych olejem z dodatkiem ZDDP. Nie ulega wątpliwości pozytywny wpływ tego dodatku na odporność na zacieranie stalowych elementów węzłów tarcia. Także konfigurowanie stali ze stopami miedzi ma bardzo pozytywny charakter. Jej tarciowe przenoszenie na powierzchnię stali wskutek tarcia generuje warstewkę ochronną zabezpieczającą skojarzenie przed zacieraniem. Jednakże wprowadzenie obu tych elementów do tribosystemu (skojarzenie stal–mosiądz, smarowanie z dodatkiem ZDDP) spowodowało gwałtowny spadek odporności na zacieranie. Mikroskopowa obserwacja zatartych powierzchni wskazała na antagonizm w oddziaływaniu tych dwóch czynników. Przenoszona tarciowo miedź blokuje powstawanie ciągłej warstwy granicznej na bazie ZDDP (i odwrotnie). W konsekwencji powstaje mozaikowa powierzchnia fragmentów warstwy granicznej ZDDP i tarciowo przeniesionej miedzi. Nieciągłość obu warstw powoduje ich nieskuteczność w ochronie powierzchni przed inicjacją zacierania.

Należy mieć jednak świadomość pewnych niebezpieczeństw, jakie wiążą się z ewentualnym wykorzystaniem koncepcji „pVt”. Jeżeli rzeczywiście udało by się osiągnąć jej zastosowanie już na etapie wdrożeniowym, stanowiłoby to pewien asumpt do nadużywania tak uzyskanej wiedzy do przedwczesnego planowania utraty zdolności eksploatacyjnej węzła tarcia (co znane jest współcześnie chociażby z rynku sprzętu elektronicznego).

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań [L. 11÷16] oraz ich dyskusji w tym artykule stwierdzono, że możliwe jest kreowanie odporności na zacieranie w oparciu o podejście topologiczne do świadomego kształtowania jej właściwości na etapie technologicznym oraz kontrolowaniu jej możliwości eksploatacyjnych, wykorzystując koncept limitów „pVt”. Zgodnie z ideą podejścia topologicznego odporność na zacieranie można kształtować, rozpoznając dla tribosystemu optymalnej interakcji pomiędzy parametrami morfologicznymi, reologicznymi oraz fizykochemicznymi warstwy wierzchniej. Rozpoznano, że istnieją pewne niezmiennie elementy morfologiczne, osiągające zbliżony poziom w chwili inicjacji procesu zacierania. Elementy te, nazwane inwariantami zacierania, to motywy chropowatości (ich liczba, powierzchnia i kształt) oraz parametr V_{vv} . Znajomość ich wartości dla konkretnego tribosystemu pozwala technologicznie tak „oddalić” się od tego poziomu, aby optymalnie wykorzystać geometryczne ukształtowanie powierzchni, szczególnie w kontekście dystrybucji oleju i jego objętości w strefie styku oraz ukształtowania wierzchołków chropowatości odpowiedzialnych za naciski oddziałujące na film olejowy lub warstwę graniczną. Z fizykochemicznego punktu widzenia odkryto kluczową rolę polarności powierzchni, jeżeli węzeł smarowany jest środkiem smarowym z dodatkami AW/EP. W tej grupie parametrów warto pamiętać o wpływie zwilżalności powierzchni na odporność na zacieranie i jej ewentualnej (pozytywnej lub negatywnej) interakcji z polarnością. Jako optymalny parametr reologiczny zaproponowano naprężenia własne, które mają determinujący wpływ na siły kohezji decydujące o tribologicznej wytrzymałości warstwy wierzchniej (szczególnie jeżeli procesy zużyciowe mają adhezyjną etiologię). W oparciu o te właściwości i zaproponowaną koncepcję limitów „pVt” wydaje się możliwym przewidywanie a nawet kontrolowanie momentu rozpoczęcia katastroficznego zużywania się węzła tarcia. Fakt ten oczywiście może mieć ogromne znaczenie serwisowe dla wszystkich tarciowo współpracujących materiałów i pozwolić przewidywać poważne uszkodzenia, które wymagają kosztownych napraw lub nawet całkowitego wyeliminowania obiektu technicznego z dalszej eksploatacji. Jednocześnie „oppanowanie” tej metodyki w praktyce stwarza zagrożenie planowego, skróconego ograniczania trwałości eksploatacyjnej maszyn i urządzeń.

LITERATURA

1. Coffin L.F.: Some metallurgical aspects of friction and wear, w: Friction and Wear, Elsevier, New York 1959.
2. Semenov A.P., The phenomenon of seizure and its investigation, Wear, vol. 4, 1961, 1–9.
3. Enthoven J., Spikes H.A., Infrared and visual study of the mechanisms of scuffing, Tribology Transactions, 1996; 39: s. 441–447.
4. Lee S.C., Cheng H.S., Experimental validation of critical temperature-pressure theory of scuffing, Tribology Transactions, vol. 38, 1995, s. 738–742.
5. Hershberger J., Ajayi O.O., Zhang J., Yoon H., Fenske G.R., Evidence of scuffing initiation by adiabatic shear instability, Wear, vol. 258, 2005, s. 1471–1478.
6. Hsu S.M., Gates R.S., Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism, Tribology International, vol. 38, 2005, s. 305–312.
7. Yamamoto Y., Hirano F., Relation between scuffing resistance and the increase in surface hardness during tests under conditions of rolling/sliding, Wear, vol. 63, 1980, s. 165–173.
8. Wojciechowski Ł., Nosal S., Wpływ nagniatania naporowego na odporność na zacieranie, Tribologia, vol. 213, 2007, s. 411–420.
9. Nosal S., Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych, Rozprawy (nr 328), Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.
10. Mathia T.G., Louis F., Maeder G., Mairey D., Relationship between surface states, finishing processes and engineering properties, Wear, vol. 83, 2015, s. 241–250.
11. Wojciechowski Ł., Mathia T.G., Conjecture and paradigm on limits of boundary lubrication, Tribology International, vol. 82 (Part B), 2015, s. 577–585.
12. Wojciechowski Ł., Mathia T.G., The polarity of metallic surfaces in the context of the corrosive and scuffing wear control, Tribology International, vol. 90, 2015, s. 473–480.
13. Wojciechowski Ł., Mathia T.G., Proposal of invariant precursors for boundary lubricated scuffing, Wear, vol. 340–341, 2015, s. 53–62.
14. Wojciechowski Ł., Kubiak K.J., Mathia T.G., Roughness and wettability of surfaces in boundary lubricated scuffing wear, Tribology International, DOI: 10.1016/j.triboint.2015.04.013.
15. Wojciechowski Ł., Eymard S., Ignaszak Z., Mathia T.G., Fundamentals of ductile cast iron scuffing at the boundary lubrication regime, Tribology International, vol. 90, 2015, s. 445–454.
16. Wojciechowski Ł., Mathia T.G., Functional obsolescence of boundary lubricated metallic frictional pairs: scuffing case, International Journal of Fracture Fatigue and Wear, vol. 3, 2015, s. 208–214.
17. Kubiak K.J., Wilson M.T.C., Mathia T.G., Carval Ph., Wettability versus roughness of engineering surfaces, Wear, vol. 271, 2011, s. 523–528.

Summary

The proposition of the topological approach to the technological creation of the surface layer's scuffing performance is presented in this article. It was recognized, based on the cycle of experiments, that the scuffing performance depends on the interaction between rheological, physical-chemical, and morphological properties of the surface layer. Some morphological scuffing invariants (parameters developing to the similar level at the time of the process initiation) were experimentally discovered. Motifs, their characteristics, and the V_{vv} (void volume of valleys) parameter were selected as optimal, morphological invariants. The surface polarity was considered as the key physical-chemical surface's property. In the case of the rheological surface's feature, residual stresses were stated as the best representative. Taking into considerations the possibility of all these parameters being created, it was proposed the concept of "pVt" limits (pressure x velocity x time) as the characteristic allowing the prediction or event control of the timing of the scuffing initiation.