

Łukasz WOJCIECHOWSKI*

**PROBLEMY KSZTAŁTOWANIA
TECHNOLOGICZNEJ WARSTWY WIERZCHNIEJ
W ASPEKCIE ODPORNOŚCI NA ZACIERANIE.
CZEŚĆ 1 – PROGNOZOWANIE ZACIERANIA**

**PROBLEMS OF TECHNOLOGICAL TREATMENT
OF THE SURFACE LAYER IN THE ASPECT
OF THE SCUFFING PERFORMANCE.
PART I: THE SCUFFING PROGNOSTICATION**

Słowa kluczowe:

odporność na zacieranie, smarowanie graniczne, modele prognostyczne

Key words:

scuffing performance, boundary lubrication, prognostic models

Streszczenie

Artykuł przedstawia przegląd współczesnej wiedzy dotyczącej mechanizmów inicjujących zacieranie i ocenę stopnia jej wykorzystania w prognozowaniu tego procesu. Wyróżniono pięć podstawowych parametrów/właściwości, które

* Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, tel. +48 61 665 23 76, e-mail: lukasz.wojciechowski@put.poznan.pl.

mogą determinować odporność warstwy wierzchniej na ten typ katastroficznego zużywania. Analiza zebranych informacji pozwoliła na stwierdzenie, że w zależności od indywidualnych cech tribosystemu (materiały pary trącej, rodzaj środka smarowego i reżim, w jakim pracuje, środowisko) modele przewidujące początek zacierania mogą bazować na innych przesłankach. Opierając się na takim podejściu do zagadnienia, zaproponowano topologiczną koncepcję kształtowania warstwy wierzchniej o podwyższonej odporności na zacieranie.

WPROWADZENIE

Zacieranie należy niewątpliwie do najbardziej niebezpiecznych oraz kosztownych form zużywania tribologicznego. Wiąże się to przede wszystkim z jego gwałtownym zapoczątkowaniem i bardzo dynamicznym przebiegiem, który w krótkim czasie prowadzi do awaryjnego unieruchomienia węzła tarcia (zatarcia). Ze względu na swoją złożoność problematyka czynników decydujących o inicjacji tego procesu nie została precyzyjnie wyjaśniona. Ma to także odzwierciedlenie w braku uniwersalnej, jednoznacznej definicji charakteryzującej zacieranie. Szczegółowej analizy literaturowej w tym aspekcie dokonał Nosal [L. 1], który proponuje rozpatrywać zacieranie jako patologiczne następstwo zużywania adhezyjnego, które określa jako oddzielanie cząstek materiału wskutek szepiania adhezyjnego na elementarnych powierzchniach styku. Należy jednak zaznaczyć, że zużywanie to jest zlokalizowane tylko w obrębie pojedynczych nierówności, ma zatem charakter „powierzchniowy”, zachodzi ze stałą intensywnością i towarzyszy mu stabilne tarcie. Osiągnięcie przez obszar szepiania pewnego wymiaru krytycznego (powstają tzw. ogniska zacierania) prowadzi do destabilizacji warunków tarcia, jego propagacji w głąb warstwy wierzchniej, a w konsekwencji do dynamicznego rozwoju makroskopowych uszkodzeń w jej obrębie. Biorąc pod uwagę taki mechanizm inicjacyjny, zacieranie można zdefiniować jako uszkodzanie warstwy wierzchniej trących się elementów ze zwiększającą się szybkością spowodowane przeniesieniem tarcia w głąb warstwy wierzchniej wskutek powstawania i niszczenia ognisk zacierania adhezyjnego [L. 1]. W podobny sposób efekty zacierania określa definicja przedstawiona w normie amerykańskiej ASTM G40-13, która charakteryzuje ten proces jako formę zużywania pojawiającą się w niedostatecznie smarowanych systemach tribologicznych, o makroskopowo obserwowalnych zmianach w teksturze, odpowiadających zwykle kierunkowi ruchu elementów węzła tarcowego [L. 2]. Podkreślając aspekt makroskopowości zużywania, warto zwrócić uwagę także na „operacyjną” (a przez to i nieco kolokwialną) definicję zaproponowaną przez Blau’a [L. 3], który fakt inicjacji zacierania wiąże właśnie z możliwością jego wzrokowego potwierdzenia (cyt. ang. „*I’ll know it when I see it*”).

Dokładna synteza literaturowa została przeprowadzona także w pracy [L. 4] (Markov i Kelly), w której autorzy przedstawiają rys historyczny związany z używaniem pojęcia „zacieranie”. Określane jako wstępny etap do katastroficznego zużywania, zacieranie w myśl dokonanej analizy wiąże się z nagłym przerwaniem filmu olejowego w warunkach ekstremalnych wymuszeń zewnętrznych (głównie obciążenie i/lub prędkość). Kryterium wymuszeń zewnętrznych (iloczyn obciążenia i prędkości), znany pod akronimem „pV” znajduje szerokie zastosowanie praktyczne. Najchętniej wykorzystywany jest w przemyśle łożyskowym, gdzie stosuje się go do określania granic stosowności różnych konfiguracji par tarcia w aspekcie zarówno materiałowym, jak i warunków kinematycznych i tribologicznych (smarowanie). W pracy [L. 5] znaleźć można zestawienie danych na temat kryterium „pV” dla różnych kombinacji materiałowych i warunków smarowania w przemyśle łożyskowym.

Rozpatrując zagadnienie zacierania, warto także zwrócić uwagę na zestawienie pewnych zwrotów, często wykorzystywanych zdaniem autorów pracy [L. 4] przy charakterystyce tego procesu: „zużycie katastroficzne” (ang. *catastrophic wear*), „zużycie adhezyjne” (ang. *adhesive wear*), „bezwzględne uszkodzenie” (ang. *gross damage*), „zespawanie” (ang. *solid-phase welding*). Semantyka tych zwrotów pozwala na pewne dwa podstawowe spostrzeżenia: prawdopodobnie adhezyjną etiologię procesu zacierania oraz jego spektakularne, zdecydowanie niszczące efekty.

Obok bardzo ogólnych definicji można doszukać się również prac, w których próbowano nieco uszczegółowić mechanizm zacierania. Przykładowo Ludema [L. 6] zacieranie określa jako proces niszczenia powierzchni przez płynięcie plastyczne, któremu towarzyszy ubytek lub transfer materiału.

Rozpatrując aspekt terminologiczny, należy zwrócić uwagę także na problem samego nazewnictwa procesu zacierania w języku angielskim. Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat w literaturze naukowej pojawiło się przynajmniej pięć terminów, które charakteryzują ten proces niszczenia odpowiadający „zacieraniu” w języku polskim:

- *scuffing* – termin najbliższy „polskiemu” rozumieniu zacierania; zgodnie ze wcześniej podaną definicją normatywną zwraca uwagę na makroskopowe efekty zacierania;
- *scoring* – w większości przypadków termin ten można potraktować jako synonim słowa „scuffing” (dawniej używany głównie w amerykańskim angielskim). Podobny wniosek nasuwa definicja tego procesu w normie [L. 2], według której jest to ciężka forma zużywania tribologicznego objawiająca się powstawaniem zarysowań i bruzd odpowiadających kierunkowi poślizgu;
- *galling* – zwrot, który dotyczy przede wszystkim zacierania w warunkach tarcia suchego. Także doczekał się definicji normatywnej [L. 2], która określa go jako formę niszczenia powierzchni powstającą podczas tarcia ślizgo-

wego, która charakteryzuje się występowaniem lokalnych „schropowaceń” lub „wypukłości” w stosunku do stanu wyjściowego. Może występować płynięcie materiału i/lub transfer materiału (patrz: Ludema [L. 6]);

- *seizure* – ten termin z kolei określa już następstwo zacierania, tj. zatarcie, czyli awaryjne unieruchomienie węzła tarcia. Oczywiście nie dojdzie do zatarcia bez wcześniejszej inicjacji zacierania – zatem zacieranie to proces, zatarcie to jego skutek (konsekwentnie, tak samo wygląda relacja pomiędzy zwrotami „scuffing” i „seizure”);
- *catastrophic wear* – termin zdecydowanie najbardziej ogólny, obejmujący wszystkie ww. procesy. Normatywnie [L. 2] rozumiany jako nagle pojawiające się i przyspieszone uszkodzenie powierzchni lub zmiana kształtu wskutek zużycia tribologicznego w takim stopniu, że trwałość użytkowa części maszyn zostaje istotnie skrócona, a ich funkcjonalność utracona.

Należy zaznaczyć, że norma [L. 2] w jakimś stopniu porządkuje kwestie terminologiczne. Niestety nieznanostwo pewnych drobnych niuansów różnicujących te terminy skutkuje w ich synonimowym traktowaniu i stosowaniu przez naukowców. Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest powstawanie nieporozumień w charakterystyce analizowanych eksperymentów dotyczących zacierania.

Analiza aktualnego stanu wiedzy na temat zacierania zwraca uwagę na fakt dużej ogólnikowości w definiowaniu tego procesu oraz brak uniwersalnych wskazówek dotyczących jego inicjacji. Jednocześnie można zauważyć, że większość z definicji podkreśla patologiczną skalę procesu, którego efekty mają zdecydowanie destrukcyjny wpływ na funkcjonalność węzłów tarcia. Oczywiście wydaje się zatem, że tak praktycznie istotny problem powinien doczekać się dokładnej syntezy także w kontekście mechanizmów, jakie współcześni badacze wiążą z jego aktywacją oraz dynamiką samego przebiegu. W oparciu o to założenie dokonano dyskusji najważniejszych (zdaniem autora) modeli prognostycznych dotyczących zacierania. Szczególną uwagę poświęcono tym modelom, które mają stricte parametryczny charakter i determinują proces w aspekcie osiągnięcia przez węzeł tarcia konkretnej, krytycznej wartości. Takie podejście może mieć, mniej lub bardziej bezpośrednio, przełożenie na praktykę inżynierską i pomóc w kreowaniu określonych, żądanych cech warstwy wierzchniej w kontekście jej odporności na zacieranie.

MODELE TEMPERATUROWE

Modele temperaturowe bazują na określeniu dla materiałów pary trącej i substancji smarującej temperatury krytycznej, o stałej wartości, której przekroczenie spowodować może rozpoczęcie procesu zacierania. Problematyka ta wymaga jednak pewnego założenia, ponieważ wiele z modeli, jakie prezentuje współczesna nauka (zarówno tych bezpośrednio traktujących o zacieraniu, jak i tych dotyczących trwałości warstwy granicznej) w jakiś sposób wiąże się ze

wzrostem temperatury w strefie kontaktu. Na potrzeby tego opracowania jako modele temperaturowe uznawane będą te, które wiążą inicjację zacierania z osiągnięciem temperatury krytycznej. Inne modele powiązane z temperaturą, np. te dotyczące dekompozycji środka smarowego będą wyróżnione w innych kategoriach.

Pierwszy model tego typu został sformułowany przez Bloka [L. 7], który ową temperaturę krytyczną określa jako sumę temperatury powierzchni trących w strefie kontaktu oraz tzw. temperaturę błysku. Wykorzystana tutaj temperatura błysku w rzeczywistości powstaje na elementarnych powierzchniach styku w chwilach przerywania warstwy granicznej i powstania czystego kontaktu metalicznego między elementami węzła tarcia. Czas jej działania jest bardzo krótki (mieści się w zakresie ok. 10^{-3} – 10^{-10} s), ale wartości osiągają bardzo duże wartości (nawet ponad 1000°C). W konsekwencji nie ma możliwości utrzymania bądź odbudowy warstewek chroniących powierzchnię (zarówno tych pochodzenia olejowego, jak i tych „naturalnych” jak tlenki) oraz gwałtownej akceleracji szepiania adhezyjnego. Zastosowanie modelu Bloka ograniczone jest jednak do przypadku silnie obciążonego skojarzenia smarowanego olejem mineralnym bez dodatków uszlachetniających. Pomimo tego kryterium to stało się punktem wyjścia do prowadzenia dalszych badań dotyczących termicznego aspektu zacierania. Bailey i Cameron [L. 8] zaproponowali pewne uproszczenie dotyczące modelu Bloka. Zgodnie z ich propozycją, jeżeli temperatura błysku jest zbliżona do temperatury trących się powierzchni, to tylko ona jest odpowiedzialna za rozpoczęcie zacierania. Natomiast w przypadku gdy temperatura błysku znacząco przewyższa temperaturę trących się powierzchni, to jako kryterium zacierania przyjmuje się temperaturę krytyczną z modelu Bloka. Lee i Cheng [L. 9, 10] zwrócili uwagę na kluczową rolę, jaką dla zmian temperatury w strefie styku ma ciśnienie substancji smarującej. Dla smarowania w warunkach częściowo granicznych i częściowo elastohydrodynamicznych zaproponowano formułę określania koncentracji adsorbatu (informującą o istnieniu i grubości filmu olejowego) na powierzchni metalu zależną właśnie od jej temperatury i ciśnienia hydrodynamicznego oleju. Warto także przeanalizować wzajemną relację pomiędzy tymi czynnikami. Zgodnie z rezultatami eksperymentów zaprezentowanymi przez autorów wzrost ciśnienia oleju w strefie styku powoduje wzrost temperatury także. Tym sposobem powstaje tutaj pewien paradoks, ponieważ wzrost ciśnienia oleju sprzyja koncentracji zaadsorbowanych cząsteczek na powierzchni metalu, natomiast wzrost temperatury przeciwdziała temu procesowi. Reasumując, relacja pomiędzy wzrostem temperatury a wywołującym je wzrostem ciśnienia będzie decydować o powstaniu warunków umożliwiających rozpoczęcie zacierania.

Kolejne modele korelują już temperaturę w strefie styku z wymuszeniami charakteryzującymi pracę węzła tarcia. Drozdov [L. 11] zaproponował koncepcję uwzględniającą już obecność dodatków uszlachetniających w stosowanym

środku smarowym. Model ten zakłada, że warunkiem zabezpieczającym przed inicjacją zacierania jest nieprzekroczenie określonej, krytycznej wartości współczynnika będącego ilorazem temperatury błysku oraz nacisków Hertza. Inne modele wiążą determinującą rolę temperatury w strefie styku, ale w odniesieniu do sprecyzowanej geometrii i kinematyki węzła tarcia. Przykładem może być tutaj praca [L. 12], której autorzy dla specyfiki niektórych przekładni zębatych zaproponowali koncepcję temperatury integralnej. Ma ona odpowiadać temperaturze trących się powierzchni w modelu Bloka, a jej wartość można obliczyć jako średnią temperaturę na odcinku przyporu boku zęba.

MODELE PRODUKTÓW ZUŻYCIA

Ta grupa modeli prognozujących zacieranie wiąże początek tego procesu z zakłóceniem procesu smarowania wskutek pojawienia się w strefie kontaktu tarciovych produktów zużycia blokujących właściwą dystrybucję oleju. Rabinowicz [L. 13] zaproponował podejście, w którym czynnikiem determinującym zacieranie jest wielkość cząsteczki zużycia (określana w tym przypadku średnicą), którą można obliczyć w oparciu o znajomość pracy adhezji pomiędzy trącymi się powierzchniami oraz twardość bardziej miękkiego materiału. Jak można zauważyć, brak tutaj bezpośredniego odniesienia do parametrów eksploatacyjnych węzła tarcia (np. do obciążenia lub prędkości), co stanowi bez wątpienia dyskusyjne założenie. Autor podaje specjalną zależność na obliczenie tzw. luzu średnicowego jaki powinien zostać zapewniony w skojarzeniu, aby nie doszło do zatarcia. Wartość tego luzu powinna być większa niż trzykrotność obliczonej wcześniej średnicy produktu zużycia. Jeżeli jest on mniejszy, istnieje niebezpieczeństwo ograniczenia lub zablokowania przepływu oleju w strefie styku i w konsekwencji inicjacja lawinowego szepiania adhezyjnego. Nieco inaczej kwestię wpływu produktów zużycia na zacieranie określili Enthoven i Spikes [L. 14]. Według tych autorów inicjacji zacierania nie należy doszukiwać się w temperaturze strefy kontaktu, ale w gromadzeniu się w jej obrębie produktów zużycia. Jednakże w przeciwieństwie do Rabinowicza [L. 13] czynnikiem kluczowym nie jest wielkość cząstek zużycia, ale prędkość ich akumulacji w strefie kontaktu. Natomiast sam efekt jest taki sam, tj. zgromadzone cząstki blokują właściwą podaż środka smarowego, którego film po osiągnięciu krytycznej grubości zostaje przerwany, co umożliwia powstawanie szepień adhezyjnych i gwałtowny rozwój katastroficznego zużywania. Rozpatrując modele tej grupy, warto także wrócić do analizy, którą przeprowadził Ludema [L. 6]. W tym przypadku mechanizm zacierania może być generowany w wyniku plastycznego płynięcia tylko jednego wierzchołka nierówności, które powtarzane kilkadziesiąt lub nawet kilkaset razy prowadzi do zmęczeniowego zużywania powierzchni. Tak powstałe produkty zużycia mogą następnie aglomerować w większą całość w strefie kontaktu i prowadzić do niszczenia powierzchni

(wraz z usuwaniem protekcyjnych warstw granicznych oraz tlenków) i/lub blokowania dopływu substancji smarującej. W efekcie dochodzi do metalicznego kontaktu współpracujących tarciowo elementów i następuje dynamiczny rozwój adhezyjnego szepiania. Podobne konkluzje wynikają z badań przeprowadzonych dla mechanizmów krzywkowych w pracy [L. 15]. Tutaj także jako czynnik inicjujący rozpoznano produkty zużywania zmęczeniowego, przy czym ma ono charakter bardziej delaminacyjny niż powierzchniowy. Z uwagi na bardzo specyficzny przebieg zużywania delaminacyjnego, powstającego w głębi warstwy wierzchniej należy przypuszczać, że ogromną rolę dla inicjacji zacierania ma stan naprężeń determinujący kohezję materiału.

MODELE ENERGETYCZNE

Ta grupa modeli wiąże początek zacierania z osiągnięciem przez warstwę wierzchnią krytycznego stanu energetycznego, który umożliwia lawinowy wzrost ilości szepień adhezyjnych. Stan energetyczny warstwy wierzchniej można opisać ilościową charakterystyką jej potencjału termodynamicznego, będącego efektem poziomu energii, jaki zmagazynowany został w elementarnych składnikach jej struktury (atomach, cząsteczkach i łączących je wiązańach) oraz wynikającego z ukształtowania jej sieci krystalicznej [L. 16]. Jedną z pierwszych hipotez dotyczących energetycznej przyczyny zacierania sformułował Semenov [L. 16]. Jest ona oparta na założeniu, że warunkiem koniecznym powstania wiązania metalicznego jest przekroczenie pewnego progu energetycznego, na skutek czego następuje specyficzna reakcja łańcuchowa swoim przebiegiem przypominająca wybuchy cieplne. Autor zaznacza jednocześnie, że samo zbliżenie na odległości atomowe czystych powierzchni jest konieczne, ale nie wystarcza do powstania szepienia, które wymaga dodatkowej aktywacji wskutek m.in. wzrostu temperatury i/lub odkształcenia plastycznego. Inicjacja powstawania wiązań metalicznych zaczyna się w tzw. centrach aktywnych, czyli wszelkiego rodzaju defektach struktury krystalicznej odznaczających się podwyższoną energią powierzchniową. Jeżeli cały proces zachodzi poniżej temperatury rekrytalizacji, szepienie adhezyjne powstaje przede wszystkim wskutek aktywacji mechanicznej, a rolę centrów aktywnych odgrywają głównie dyslokacje. To podejście było następnie modyfikowane przez innych autorów, np. Czichos [L. 17] zaproponował koncepcję energii międzyfazowej jako sumy energii cieplnej i energii mechanicznej (w tym naprężeń własnych) skoncentrowanej w strefie kontaktu. Stwierdzono m.in., że dla wysokich wartości energii cieplnej poziom naprężeń w obszarze styku jest niski (natomiast w przypadku niskich wartości energii cieplnej jest odwrotnie).

Do grupy modeli energetycznych, można zaliczyć także propozycję krytycznej intensywności mocy tarcia „ $pV\mu$ ” (gdzie μ – współczynnik tarcia), którą zaproponował Matveevsky [L. 18]. Warto tutaj zwrócić uwagę na to, że jed-

nostka, jaką posługuje się autor (W/m^2) odpowiada wcześniej wspomnianemu iloczynowi „pV”, który w praktyce przedstawiany jest co prawda w ($MPa \cdot ms^{-1}$), jednak po przekształceniach może zostać wyrażony także w jednostkach mocy na powierzchnię. W grupie modeli energetycznych ciekawą propozycją jest także energia zacierania rozumiana jako praca, jaką musi wykonać węzeł tarcia do inicjacji tego procesu [L. 19]. Propozycja jest o tyle ciekawa, że pozwala na dokładną obserwację (poprzez kombinację momentu tarcia z czasem pracy do zacierania) przejścia od smarowania granicznego do inicjacji zacierania.

MODELE STRUKTURALNE

Ta grupa modeli wiąże podatność na zacieranie ze zdolnością różnych skojarzeń materiałowych do adhezji. Punktem wyjścia do takiego spojrzenia jest praca Coffina [L. 20], który na podstawie badań tarcia różnych metali w warunkach atmosferycznych zbudował klasyfikację par trących według ich skłonności do tworzenia szczepień adhezyjnych. Wyróżniono trzy grupy metali: o pełnej zdolności do szczepiania (np. Cu-Fe), częściowej zdolności szczepiania (np. Al-Fe) oraz ograniczonej zdolności szczepiania (np. Mg-Fe). Podstawą powstawania szczepień jest według autora spełnienie czterech warunków Hume-Rothery’ego, tj. jednakowy typ sieci krystalicznej, zbliżone wielkości średnic atomów (nie więcej niż $10 \div 15\%$), podobieństwo elektrochemiczne (im większe, tym większa zdolność do tworzenia roztworów stałych) oraz wartościowość względna (taka sama dla obu metali także sprzyja tworzeniu roztworów stałych).

Częściową weryfikację tych postulatów, można znaleźć w badaniach Buckleya [L. 21]. Na ich podstawie stwierdzono, że metale o sieci regularnej płasko lub przestrzennie centrowanej odznaczają się dużym współczynnikiem tarcia i dużym zużyciem z widocznymi śladami oddziaływania adhezyjnego. Natomiast dla sieci heksagonalnej stwierdzono wynikający z małej adhezji niewielki współczynnik tarcia, a co za tym idzie stosunkowo niskie zużycie. Wyjaśnieniem takiego stanu rzeczy jest różnica w liczbie możliwych płaszczyzn poślizgu w poszczególnych strukturach. Siatki regularne odznaczają się wyraźnie większą liczbą płaszczyzn poślizgu w stosunku do siatek heksagonalnych. Naturalną konsekwencją będzie zatem wyższa skłonność sieci regularnych do powstawania odkształceń plastycznych, dlatego też charakteryzuje je większe tarcie i zużycie.

Wśród teorii strukturalnych warto zwrócić także uwagę na koncepcję, która wiąże inicjację zacierania z niekontrolowanym pękaniem (ściananiem) adiabatycznym [L. 22]. Proces ten może mieć miejsce w ciężkich warunkach eksploatacji węzła tarcia, np. związanych z dużymi obciążeniami i/lub prędkościami. W takich okolicznościach większość (nawet 90%) pracy tarcia ulega dyssypacji do elementów pary trącej i oleju, powodując lokalne uplastycznienie

wierzchołków chropowatości. Wytrzymałość na ścinanie tych mikrokontaktów staje się dużo mniejsza od naprężeń powstających w strefie styku, przez co dochodzi do ich gwałtownego odkształcania, szczególnie w okolicach dyslokacji. Sam proces zachodzi bardzo dynamicznie i ma charakter adiabatyczny (ponieważ nie ma wystarczającego czasu na wymianę ciepła). Autorzy sugerują, że większość ruchu (lub nawet cały), jaki ma miejsce w strefie styku realizowana jest przez ścinanie w przypowierzchniowych warstwach materiału, a uszkodzenia są raczej konsekwencją ich osłabienia niż powstawania wiązań z współpracującym metalem. To spostrzeżenie nieco zakłóca dominujący pogląd o czysto adhezyjnym charakterze zacierania. Autorzy podają metodykę obliczania krytycznych naprężeń adiabatycznego pęknięcia dla metali zależną od: gęstości, pojemności cieplnej oraz prędkości termicznego uplastyczniania.

MODELE ZWIĄZANE Z TRWAŁOŚCIĄ WARSTWY GRANICZNEJ

Na wstępie do tej grupy modeli należy zauważyć, że kwestia trwałości warstwy granicznej może zależeć od czynników mechanicznych oraz chemicznych. W pierwszym przypadku należy przede wszystkim odnieść się do teorii smarowania elastohydrodynamicznego i wzoru Dowsona-Higginsona, na podstawie którego można obliczyć minimalną grubość filmu olejowego h_{\min} dla wybranego skojarzenia:

$$h_{\min} = 2,65 \left(\alpha^{0,54} \eta^{0,7} E'^{-0,03} \right) \cdot \left(R_e^{0,43} L^{0,13} \right) \cdot \left(u_e^{0,7} w^{-0,13} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- α – ciśnieniowy współczynnik lepkości oleju,
- η – lepkość dynamiczna oleju,
- E' – zastępczy moduł Younga,
- R_e – zredukowany promień krzywizny wierzchołków profilu chropowatości,
- L – długość strefy styku,
- u_e – prędkość,
- w – obciążenie.

Bardzo interesujący jest fakt, jak niewielki wpływ na grubość filmu olejowego mają parametr materiałowy (E') oraz obciążenie (w). Kluczowe są natomiast parametry oleju (α , η) oraz ukształtowanie powierzchni (R_e). Po obliczeniu grubości filmu olejowego obliczyć można ogólny warunek tarcia płynnego, tzw. współczynnik λ :

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{(Rq_1)^2 + (Rq_2)^2}} \quad (2)$$

gdzie:

R_{q1} i R_{q2} – średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości od linii średniej elementów węzła tarcia.

Na podstawie wartości współczynnika λ można przewidzieć, w jakich warunkach smarowania będzie pracować analizowane skojarzenie [L. 23]:

- $\lambda > 3$ – smarowanie hydrodynamiczne,
- $3 > \lambda > 1$ – smarowanie elastohydrodynamiczne,
- $1 > \lambda > 0,5$ – tarcie mieszane,
- $\lambda < 0,5$ – smarowanie graniczne.

W oparciu o otrzymane dla wybranego skojarzenia wartości współczynnika λ można przewidywać/projektować reżim smarowania, uwzględniając ewentualne niebezpieczeństwo inicjacji zacierania (przypadki tarcia mieszanego i granicznego).

Model chemicznej dekompozycji środka smarowego jako preludium zacierania zaproponował Hsu [L. 24]. Idea tego modelu zakłada, że powstające wskutek tarcia rozpuszczalne polimery olejowe są następnie redukowane do produktów nierozpuszczalnych, przy czym nawet 10% z pierwotnej objętości oleju ulega temu procesowi, zanim nastąpi przerwanie filmu olejowego. W modelu tym założono także, że nie ma żadnych ograniczeń dotyczących dyfuzji tlenu, niemożliwe jest parowanie oleju oraz powstawanie ciekłych produktów utleniania o małej masie cząsteczkowej. Obliczona krytyczna temperatura filmu, dla której możliwy jest taki stopień redukcji wynosiła 375°C w warstwie granicznej o grubości 0,06 μm . W innej pracy tej samej grupy badawczej [L. 25] znaleźć można wytyczne związane z chemicznym aspektem prawidłowego projektowania warstwy granicznej. Warstwa taka powinna stanowić kompozycję dwóch podstawowych faz: twardej, która jest odpowiedzialna za przenoszenie obciążenia i miękkiej, która łatwo ulega ścinaniu. Faza twarda jest zwykle produktem reakcji dekompozycji dodatków przeciwzużyciowych dostosowanych do danego materiału (np. ZDDP w interakcji z żelazem). Faza miękka natomiast jest wynikiem reakcji utleniania i polimeryzacji oleju bazowego w katalitycznych uwarunkowaniach powierzchni metalowych. Należy także pamiętać o właściwym, kontrolowanym tempie zachodzenia tych reakcji. Aby zapobiegać zużyciu i ewentualnej inicjacji zacierania, powstawanie filmu musi być szybsze niż jego niszczenie, jednakże nie za szybkie, gdyż grozi to aktywacją zużywania korozyjnego.

PODSUMOWANIE

Dokonany przegląd modeli prognostycznych zacierania adhezyjnego zwraca uwagę, jak wiele czynników może być przyczyną inicjacji tego procesu. W związku z tym, że wszystkie z nich zostały zweryfikowane eksperymentalnie trudno sformułować uniwersalną teorię lub model obliczeniowy dla szeroko rozumianych węzłów tarcia. Faktem dodatkowo utrudniającym analizę tego zagadnienia jest to, że w różnych modelach te same czynniki mają zupełnie inne znaczenie. Przykładowo w grupie modeli pozwalających obliczyć grubość filmu olejowego składowa materiałowa (zastępczy moduł Younga) ma stosunkowo niewielkie znaczenie. Natomiast dla modeli strukturalnych (szczególnie teorii Coffina [L. 20] i Buckleya [L. 21]) aspekt podobieństwa molekularnego materiałów (reprezentowany np. regułą Hume-Rothery'ego) ma absolutnie kluczowy charakter. Wydaje się zatem, że dla różnych geometryczno-kinematycznych uwarunkowań pracy pary tarcia różne parametry/wymuszenia mogą być przyczynkiem do zapoczątkowania katastroficznego zużywania. Pewnej syntezy w tym zakresie dokonali Bowman i Stachowiak [L. 26], według których, żeby doszło do przerwania warstwy granicznej i inicjacji zacierania, muszą być spełnione następujące warunki:

- plastyczna deformacja wierzchołków profilu chropowatości,
- temperatura kontaktu wyższa niż 150°C,
- duże naciski w strefie styku,

dotąd dodatkowo wspomagane przez obecność lub nie powierzchniowych warstw ochronnych (tlenkowych, olejowych itp.), własności materiałowe oraz chropowatość i teksturę powierzchni.

Mnogość wszystkich czynników, które mogą przyczyniać się do inicjacji zacierania skłania do refleksji dotyczącej rzeczywistej potrzeby uniwersalizacji modelowej tego procesu. Z inżynierskiego punktu widzenia logiczniejsze wydaje się opracowanie kompleksowej metodyki kształtowania warstwy wierzchniej na poziomie technologicznym pozwalającej otrzymać optymalną (a nawet planowaną) odporność na zacieranie. W tym celu potrzebna jest identyfikacja inwariantów związanych z rozpoczęciem katastroficznego zużycia i na ich podstawie kreowanie stanu warstwy wierzchniej pozwalającego otrzymać najlepsze osiągi. Duże możliwości w tym zakresie daje topologiczne podejście do problemu, które wyróżnia trzy podzbiory właściwości warstwy wierzchniej (reologiczne, morfologiczne i fizykochemiczne). Pozwalają one określić pewne determinanty wyselekcjonowane z każdego podzbioru, które mają największy wpływ na proces zacierania i na podstawie ich znajomości przewidywać możliwości eksploatacyjne węzłów tarcia.

LITERATURA

1. Nosal S., Analiza pojęć związanych z zacieraniem. Nowa definicja zacierania, MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, 11C/2009, s. 141–150.
2. ASTM G40-13: Standard terminology relating to wear and erosion.
3. Blau P.J., Scuffing: from basic understanding to engine materials testing, DEER Conference, Detroit MI, USA, 12-16.08.2007.
4. Markov D., Kelly D., Mechanisms of adhesion-initiated catastrophic wear: pure sliding, *Wear*, vol. 239, 2000, s. 189–210.
5. Wojciechowski Ł., Mathia T.G., Conjecture and paradigm on limits of boundary lubrication, *Tribology International*, vol. 82, 2015, s. 577–585.
6. Ludema K., A review of scuffing and running-in of lubricated surfaces, with asperities and oxides in perspective, *Wear*, vol. 100, 1984, s. 315–331.
7. Blok H., The flash temperature concept, *Wear*, vol. 6, 1963, s. 483–494.
8. Bailey M.W., Cameron A., The effects of temperature and metal pairs on scuffing, *ASLE Transactions*, vol. 16, 1973, s. 121–131.
9. Lee S.C., Cheng H.S., Scuffing theory modeling and experimental correlations, *Journal of Tribology*, vol. 113, 1991, s. 327–334.
10. Lee S.C., Cheng H.S., Experimental validation of critical temperature-pressure theory of scuffing, *Tribology Transactions*, vol. 38, 1995, s. 738–742.
11. Drozdov Yu.N., Thermal aspects of scoring in simultaneous rolling and sliding contact, *Wear*, vol. 20, 1972, s. 201–209.
12. Winte H., Michaelis K., Scoring load capacity of gears lubricated with EP oils, AGMA technical paper (no. 219.17), Fall Technical Meeting, Montreal, Canada, 1983.
13. Rabinowicz E., Friction seizure and galling seizure, *Wear*, vol. 25, 1973, 357–363.
14. Enthoven J., Spikes H.A., Infrared and visual study of the mechanisms of scuffing, *Tribology Transactions*, 1996. 39: 441–447.
15. Jiajun L., Zhigiang L., Yingian C., The study of scuffing and pitting failure of cam-p tappet rubbing pair, *Wear*, 1990. 140: 135–147.
16. Semenov A.P., The phenomenon of seizure and its investigation, *Wear*, vol. 4, 1961, 1–9.
17. Czichos H., Kirschke K., Investigations into film failure (transition point) of lubricated concentrated contacts, *Wear*, vol. 22, 1972, s. 321–336.
18. Matveevsky R.M., Friction power as a criterion of seizure with sliding lubricated contact, *Wear*, vol. 155, 1992, s. 1–5.
19. 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.
20. Coffin L.F.: Some metallurgical aspects of friction and wear, w: *Friction and Wear*, Elsevier, New York 1959.
21. Buckley D.: *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York 1981.
22. 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.

23. Lorenzo Martin C., Ayaji O.O., Torrel S., Fenske G.R., Erck R.A., Experimental investigation of transition in lubrication regime for thin-film coated surfaces, Proceedings of the ASME/STLE 2012 International Joint Tribology Conference IJTC2012, October 7–10, 2012, Denver, Colorado, USA.
24. Hsu S.M., Shen M.C., Klaus E.E., Cheng H.S., Lacey P.I., Mechano-chemical model: reaction temperatures in a concentrated contact, *Wear*, vol. 175, 1994, s. 209–218.
25. Hsu S.M., Gates R.S., Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism, *Tribology International*, vol. 38, 2005, s. 305-312.
26. Bowman W.F., Stachowiak G.W., A review of scuffing models, *Tribology Letters*, vol. 2, 1996, s. 113–131.

Summary

The article presents a review of modern knowledge concerning mechanisms of scuffing activation and the evaluation of the level of its application in the prediction of this process. Five basic groups (temperature, debris, energetic, structural and boundary layer durability) of parameters/features were selected that can determine the resistance of the surface layer to this type of catastrophic wear. The analysis of acquired data indicated that models representing the interdependence of individual features of the tribosystem (friction pair materials, the type of the lubricating medium and the regime of its operation, and the environment), which are used to predict the onset of scuffing, can be based on different premises. A topological concept of the surface layer with increased scuffing performance was proposed using this approach. Additionally, a brief terminological analysis of the scuffing definitions was carried out. Some inaccuracies appearing in the scientific works in the context of determining scuffing were indicated.