



Nieskończona trwałość narzędzi skrawających - teoretyczne rozważania w kontekście tribologii relatywistycznej

Infinite life time of cutting tools - theoretical considerations in context of the relativistic tribology

Jacek Wilkowski^{a,*}, ORCID: 0000-0001-5798-6761
Marek Barlak^b, ORCID: 0000-0003-1416-7461

^aSzkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Nauk Drzewnych i Meblarstwa, Katedra Mechanicznej Obróbki Drewna, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, Polska

^bNarodowe Centrum Badań Jądrowych Świerk w Otwocku, Departament Fizyki Materiałów, Zakład Technologii Plazmowych i Jonowych, ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock, Polska

*Osoba do korespondencji: jacek_wilkowski@sggw.edu.pl

Streszczenie

W artykule opisano szereg zjawisk fizyko-chemicznych zachodzących na styku powierzchni materiałów w kontakcie tribologicznym. Począwszy od ruchu liniowych defektów struktury krystalicznej (dyslokacji), drgań sieci tej struktury, poprzez zjawisko dyfuzji, transferu masy, powstawania „ciał trzecich”, generowania triboplazmy, a kończąc na powstawaniu związków kompleksowych i filmu surfingowego. W celu wytłumaczenia nietypowego przebiegu niektórych zjawisk sięgnięto po założenia tribologii relatywistycznej i termodynamiki układów otwartych. Przedstawione zjawiska były fundamentem dla hipotetycznej idei o nieskończonej trwałości narzędzi skrawających.

Abstract

The article presents a series of physico-chemical phenomena taking place at the surface materials in tribological contact. Starting from the movement of linear defects of crystalline structure (dislocations), vibrations of this structure lattice, through the phenomenon of diffusion, mass transfer, formation of „third bodies”, generation of the triboplasm and ending with the formation of the complex compounds and the surfing film. The assumptions of relativistic tribology and thermodynamics of open systems were used to explain the unusual course of some phenomena. The presented phenomena were the foundation for the hypothetical idea of infinite life time of cutting tools.

Słowa kluczowe: trwałość narzędzia, zużycie narzędzia, WC-Co, materiały drzewne, maszynowa obróbka skrawaniem, relatywistyczna tribologia

Keywords: tool life, tool wear, WC-Co, wood materials, machining, relativistic tribology

Wprowadzenie

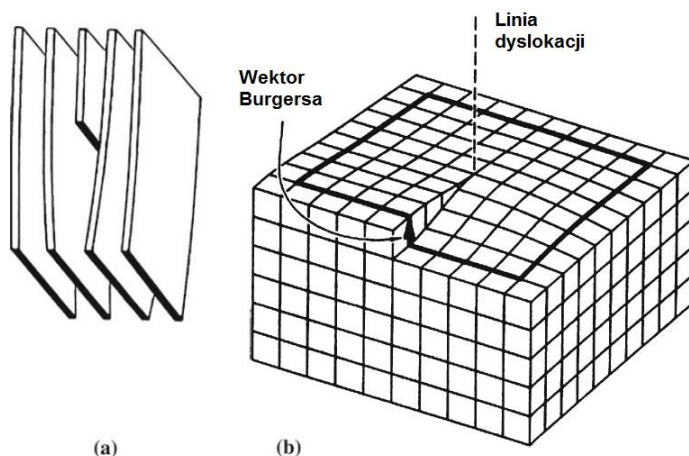
Podstawowym materiałem narzędziowym stosowanym obecnie w maszynowej obróbce materiałów drzewnych jest węgiel spiekany, wytwarzany metodami metalurgii proszków. Należy on do najczęściej wykorzystywanych materiałów na ostrza skrawające przeznaczone do operacji piłowania, frezowania i wiercenia. Węgiel spiekany dla narzędzi do przemysłu meblarskiego składa się w 96% z węglików metali trudno topliwych, głównie wolframu (węgiel wolframu WC), oraz do 4% z metalu wiążącego, którym jest zazwyczaj kobalt (Co) (Wilkowski i Barlak 2018).

Zbiorowe oddziaływanie atomów na siły spójności powoduje powstanie uporządkowanej struktury krystalicznej węgla wolframu. Posiada on sześciokątną sieć krystaliczną. Taka budowa sieci oznacza, że entropia i potencjał chemiczny zmniejszają się w stosunku do ośrodka wyjściowego. Innymi słowy, tworzenie się struktury krystalicznej jest zdeterminowane przez zasadę minimum energii potencjalnej. Pełna energia pojedynczego kryształu jest mniejsza niż łączna energia jego poszczególnych składników, więc procesowi krystalizacji towarzyszy wyzwolenie energii w postaci „ciepła utajonego” (Prokhorov 1992).

Analiza parametrów fizycznych kryształu (temperatura topnienia, wrzenia, współczynnik rozszerzalności cieplnej, sublimacja, ściśliwość, stała sieciowa) pozwala na uzyskanie ogólnej charakterystyki siły spójności sieci krystalicznej. Duże siły spójności przejawiają z reguły kryształy o wysokiej temperaturze topnienia i wysokim cieple sublimacji. Temperatura topnienia WC mieści się w przedziale 2785-2830°C, natomiast temperatura wrzenia jest najwyższa z pośród znanych związków i wynosi 6000°C.

Kryształ doskonały ciała stałego składa się z atomów ułożonych w przestrzeni tak, że tworzy sieć krystaliczną wyglądającą tak samo, gdy patrzy się na nią z różnych kierunków i jest wyidealizowanym modelem fizycznym, pewną abstrakcją matematyczną. Model taki ma pomóc naukowcom w badaniu różnych zjawisk poprzez uproszczenie obiektów świata rzeczywistego. Rzeczywiste kryształy różnią się od idealnej struktury kryształów doskonałych obecnością dużej liczby defektów w postaci pustych przestrzeni (pustki Smekala), mikropęknięć, niejednorodności składu chemicznego, defektów punktowych (wakansów lub defektów Schottky'ego, defektów Frenkla) czy dyslokacji (Akhmatov 1963, Lyubimov i Ryzhikov 2006, Kana 1968). Brytyjski fizyk Griffiths uważa, że „ciało stałe jest zbiorem pęknięć i jeśli nie uwzględni się nieregularności struktury, współczesna teoria ciała stałego nie będzie w stanie adekwatnie i ilościowo ocenić jego właściwości fizycznych” (Akhmatov 1963).

Dyslokacje są defektami struktury krystalicznej wzdłuż pewnej linii. O powstawaniu dyslokacji podczas wzrostu kryształów decydują głównie trzy mechanizmy: naprężenia termiczne wywołane fluktuacjami w fazie stałej oraz nadmierne wysycenie sieci wakansami. Najprostsze typy dyslokacji to dyslokacje graniczne i spiralne (Lyubimov i Ryzhikov 2006). Na Rys. 1 przedstawiono schematy defektów liniowych sieci krystalicznej w postaci dyslokacji granicznej, wzdłuż której łamie się i ulega przerwaniu „półpłaszczyzna” krystalograficzna (Rys. 1a) oraz dyslokacji spiralnej (Rys. 1b) powstającej w wyniku przemieszczania się fragmentów kryształu równoległe do przerwanej „półpłaszczyzny”. Na Rys. 1b wskazano elementy geometryczne opisujące dyslokację w postaci: linii dyslokacji i wektora Burgersa. Defekt sieci wywołany obecnością półpłaszczyzny można scharakteryzować za pomocą wieloboku (w poniższym przypadku jest nim wrysowany kwadrat) otaczającego obszar dyslokacji. Wielobok ten nazywa się konturem Franka-Burgersa. Kontur ten w kryształcie nie zawierającym dyslokacji jest zamknięty, gdyż na wszystkich bokach równoległych ma jednakową liczbę odstępów sieciowych, natomiast w obszarze zawierającym dyslokację kontur nie zamyka się. Brakujący do zamknięcia konturu odcinek nazywa się wektorem Burgersa. Wartość i orientacja wektora Burgersa względem linii dyslokacji jest cechą charakteryzującą dyslokację (Okoniewski 1974).



Rys. 1. Schematy defektów liniowych sieci krystalicznej: a) dyslokacja graniczna, b) dyslokacja spiralna (Lyubimov i in. 2013)

Fig. 1. Schemes of linear crystal lattice defects: a) boundary dislocation, b) helical dislocation (Lyubimov et al. 2013)

Położenie dyslokacji w kryształcie nie jest stałe. Mogą się one przemieszczać przez poślizg pod wpływem naprężeń i prowadzić do plastycznego odkształcenia kryształu. Mogą również w trakcie ruchu oddziaływać na inne dyslokacje, wzmacniając je lub unicestwiając. Równoległe zmienia się całkowita energia kryształu (Akhmatov 1963). Istnieją jednakże przyczyny, np. defekty strukturalne lub obce wtrącenia, które wywołują zakotwiczenie w

pewnych punktach dyslokacji będących w ruchu. Tak działają defekty punktowe, które koncentrują się wokół dyslokacji tworząc „chmurę” lub „atmosferę” Cottrella. Obce atomy tworzące defekty punktowe wywołują w sieci krystalicznej naprężenia sprężysto-rozciągające (ekspansja) lub ściskające (kontrakcja) i przyczyniają się do powstania atmosfery Cottrella, która wpływa hamująco na ruch dyslokacji, co w efekcie powoduje również umocnienie materiału. Uruchomienie dyslokacji zakotwiczonej w atmosferze Cottrella wymaga zwiększenia przyłożonej siły (Okoniewski 1974). Między innymi tym zjawiskiem tłumaczona jest zwiększona trwałość narzędzi skrawających materiały drzewne po procesie implantacji jonów (Wilkowski i in. 2019, 2021, 2022).

Tak więc, struktura materiałów krystalicznych różni się od swojego idealnego modelu (kryształu doskonałego) poprzez istniejące defekty sieci krystalicznej. Mogą one mieć decydujący wpływ na fizyczne, chemiczne i mechaniczne właściwości materiałów. Materiały inżynierskie są chemicznie bardziej aktywne niż kryształy doskonałe, ale ich wytrzymałość jest wielokrotnie mniejsza (Lyubimov et al. 2013).

Ponadto, układ atomów w sieci krystalicznej podlega ciągłym fluktuacjom i zmianom pod wpływem działania zewnętrznych czynników siłowych. Niestety, te dynamiczne procesy rzadko są brane pod uwagę przy konstruowaniu modeli strukturalnych i teoretycznych służących do rozwiązania problemów inżynierskich, m.in. związanych ze zużywaniem się i trwałością narzędzi skrawających.

Dynamiczne procesy zachodzące w kryształach ciał stałych

Oddziaływanie zewnętrzne na polikrystaliczne ciało stałe, takie jak w przypadku działania siły skrawania podczas obróbki ostrzem z węglika spiekanego wywołuje odpowiedź w postaci propagacji oscylacji sprężystych w sieci krystalicznej. Energia drgań sieci krystalicznej lub energia fal sprężystych jest wielkością kwantową i jest nazywana fononem, podobnie jak foton jest kwantem fali elektromagnetycznej (światła). Zatem termiczne drgania atomów w sieci krystalicznej można uznać za temperaturowe wzbudzenie fononów. Zgodnie z prawem Plancka, które leży u podstaw mechaniki kwantowej, energia każdego rodzaju oscylacji pola elektromagnetycznego jest proporcjonalna do iloczynu $h\nu$, gdzie h to stała Plancka, a ν to częstotliwość oscylacji. Jak wynika z powyższego energia drgań sprężystych w sieci krystalicznej, podobnie jak energia pola elektromagnetycznego jest skwantowana.

Kolejnym procesem dynamicznym zachodzącym w sieci krystalicznej ciała stałego i mającym duży wpływ na jego właściwości mechaniczne jest dyfuzja. Nie jest ona wywołana jakąś konkretną siłą lecz wynika z chaotycznego ruchu termicznego atomów. Podstawą opisu dyfuzji są prawa Ficka, które pokazują związki między obserwowalnym przepływem dyfuzyjnym, a gradientem stężeń, tłumacząc, że w przyrodzie występuje tendencja do równomiernego rozkładu stężeń w całej objętości substancji. Jednakże, równowaga termodynamiczna w substancji w stałej temperaturze i ciśnieniu jest określona przez

minimum energii swobodnej, co więcej, ten wymóg jednorodnego rozkładu stężeń nie jest obowiązkowy (Lyubimov i Dolgoplov 2010).

Dyfuzja powoduje nieuchronną zmianę składu chemicznego materiału i jego właściwości mechanicznych, w tym powstawanie defektów punktowych na skutek tworzenia się koncentatorów naprężeń w wiązaniach. Drgania sprężyste pojawiające się w materiale pod wpływem działania sił zewnętrznych zmieniają jego strukturę krystaliczną.

Analiza wpływu dyslokacji na przebieg dyfuzji w polikrystalie jakim jest WC-Co jest dość trudna ze względu na dużą liczbę dyslokacji i niepewność ich rozkładu przestrzennego. Jednak to powstające i przemieszczające się dyslokacje najbardziej modyfikują właściwości kryształu. Obecnie uważa się, że dyslokacje brzegowe znacznie przyspieszają ruch atomów w kryształach (Lyubimov et al. 2013).

Jak napisano wcześniej, to ruch dyslokacji jest najistotniejszym procesem dynamicznym wpływającym na strukturę krystaliczną materiału. Dyslokacje poruszają się po powierzchniach ślizgowych i prowadzą do plastycznego odkształcenia kryształu. Powierzchnia ślizgowa odpowiada osi dyslokacji i wektorowi Burgersa. Ruch ślizgowy dyslokacji nazywa się konserwatywnym, gdyż nie wytwarza, ani nie absorbuje defektów punktowych i nie zmienia objętości kryształu. Jednak dyslokacje graniczne mogą „wychodzić” z pierwotnych płaszczyzn ślizgowych i „wznosić się” („wspinać”) w wyniku absorpcji defektów punktowych, działając jak „pochłaniacz” wakansów. W procesie odwrotnym dyslokacje graniczne działają jako źródła wakansów. W tym wypadku, tworzenie i pochłanianie defektów punktowych zmienia objętość kryształu (Kana 1968).

Procesy zachodzące podczas tarcia

Jeżeli do styku ciał stałych w kontakcie tribologicznym (tarciovym) przyłożona jest siła styczna, to praktycznie natychmiast w kierunku działania siły pojawia się względna dyslokacja o wielkości 0,1-1,0 μm . Przemieszczenia te, poprzedzające poślizg, są w niektórych przypadkach odwracalne, a w innych nieodwracalne. Oznacza to, że procesy spężyto-plastyczne na dużą skalę występują jeszcze przed rozpoczęciem poślizgu kontaktowego (Akhmatov 1963).

Zatem naprężenia mechaniczne zniekształcają sieć krystaliczną warstwy wierzchniej ciała stałego, powodując powstawanie dyslokacji. Region maksymalnych naprężeń mechanicznych na granicy faz jest strefą, w której koncentrują się dyslokacje. Dyslokacje pod wpływem efektu tarcia zbliżają się do powierzchni ciała stałego. Z zależności (1 i 2) wynika, że rosnąca liczba dyslokacji zwiększa plastyczność materiału i zmniejsza jego granicę plastyczności:

$$\rho_d = a_e \varepsilon_p / b \quad (1)$$

gdzie: ρ_d - liczba dyslokacji na jednostkę objętości kryształu (gęstość dyslokacji), a_e - współczynnik doświadczalny, ε_p - odkształcenia plastyczne powodujące powstanie dyslokacji, b - moduł wektora Burgersa.

Niezależnie od tego, jaki mechanizm powoduje naprężenia w kryształach, skutkuje on odkształceniem, które w ogólnym przypadku będzie częściowo sprężyste, a częściowo plastyczne. Względna wartość każdej z tych składowych zależy od granicy plastyczności materiału:

$$\varepsilon_p = (\sigma - \sigma_Y)/E \quad (2)$$

gdzie: σ_Y - granica plastyczności materiału, E - moduł sprężystości.

Powoduje to rozszerzenie obszaru kontaktu zgodnie ze wzorem Bowdena-Tabora (Chikhos 1982):

$$A_F = N/\sigma_Y \quad (3)$$

$$A_F = N/HB$$

gdzie: A_F - rzeczywista powierzchnia styku, N - obciążenie, σ_Y - granica plastyczności bardziej miękkiego materiału, HB - twardość bardziej miękkiego materiału w miejscu styku.

Powierzchnie styku w tribokontakcie zbliżają się do siebie w wyniku wygładzenia mikronowych nierówności, co zwiększa rzeczywistą powierzchnię styku. Ponieważ rzeczywista powierzchnia styku rośnie, zwiększa się oddziaływanie adhezyjne i to wielokrotnie więcej w porównaniu z podobnymi siłami w styku statycznym. Siła tarcia wykonuje pracę, która jest równa:

$$A_{Fr} = fN\vartheta t \quad (4)$$

gdzie: A_{Fr} - praca tarcia, f - współczynnik tarcia, N - obciążenie normalne, ϑ - prędkość przesuwu powierzchni w tribokontakcie, t - czas tarcia.

Praktycznie cała praca tarcia jest zużyta na wytworzenie ciepła (ponad 90% wartości pracy) (Kostetsky 1976). Przepływ ciepła w tarcu aktywuje ruch dyslokacji, zwiększa ich zdolność do pokonywania potencjalnych barier i masowego pojawiania się na powierzchni. Towarzyszy temu rosnąca plastyczność materiału, której charakterystyką liczbowa jest przesunięcie odkształceniowe. Jego wartość odpowiada wyrażeniu (Kana 1968):

$$Y_{\Leftrightarrow} = \rho_d b l_{md} \quad (5)$$

gdzie: Y_{\Leftrightarrow} - przesunięcie odkształceniowe, ρ_d - gęstość dyslokacji, b - moduł wektora Burgersa, l_{md} - średnia odległość przebyta przez dyslokacje.

W materiałach będących w tribokontakcie pojawia się niejednorodne pole rozkładu temperatury (gradienty temperatury), a taki stan jest podstawowym katalizatorem procesu dyfuzji. Badania wykazały, że współczynniki dyfuzji rosną w warunkach tarcia o 10 rzędów wielkości w porównaniu do warunków statycznych (Kostetsky 1976, Lyubimov i Ryzhikov 2006).

Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, entropia w układzie zamkniętym rośnie i dąży do maksymalnej wartości równowagi, podczas gdy generowanie entropii dąży do zera. W przeciwieństwie do układu zamkniętego, w układzie otwartym może istnieć stała entropia i stała wartość jej generowania. Nadwyżka entropii powinna być ze stałą intensywnością usunięta z układu. Zdaniem Bershadskiego (1989) tribosystem składający się z dwóch wzajemnie oddziałujących powierzchni jest typowym otwartym układem termodynamicznym.

Głównymi kanałami rozproszenia energii w układzie tribologicznym jest przenoszenie materii i ciepła. Materiały pękają pod wpływem temperatury i naprężeń wywołanych dyslokacjami, co wywołuje transfer masy (tzw. „ciała trzecich”) w kierunku pojawiającego się defektu w strukturze krystalicznej, celem jego wypełnienia. Pojawienie się „ciała trzeciego” oznacza zmniejszenie współczynnika tarcia i ograniczenie zużycia. Bezpośredni kontakt pomiędzy ciałami stałymi zostaje zastąpiony bardziej korzystnym oddziaływaniem poprzez „ciała trzecie”. Tak więc, tribosystem może podlegać ewolucji, przy czym najbardziej sprzyjające warunki to pojawienie się „trzeciego ciała”, gdy proces dyfuzji rozwija się z maksymalną intensywnością (Chikhos 1982, Chichinadze 1995, Polyakov 1988a).

Efekty relatywistyczne

Ogólna teoria względności różni od klasycznej mechaniki Newtona przede wszystkim oszacowaniem geometrycznych własności przestrzeni i czasu. W teorii Newtona uważa się, że przestrzeń jest euklidesowa, a ciała mogą poruszać się krzywoliniowo tylko pod wpływem działania sił zewnętrznych. Teoria względności zakłada natomiast, że przestrzeń jest nieeuklidesowa, a ciała mogą poruszać się po trajektoriach pokrywających się z najkrótszą odległością między dwoma punktami przy danej krzywiznie przestrzeni (Hawking i Penrose 2007).

Przeźren relatywistyczna ściśle wiąże się z pojęciami „czas” i „równoczesność”. Einstein twierdził, że pojęciu jednoczesności nie należy przypisywać żadnych wartości absolutnych. Dwa zdarzenia obserwowane jednocześnie z jednego z układów współrzędnych nie będą postrzegane jako jednoczesne, gdy obserwuje się je z układu poruszającego się względem układu obserwowanego (Einstein 1965). A zatem, jeśli dwa zdarzenia w jednym układzie współrzędnych wystąpią jedno po drugim z pewnym interwałem czasowym $\Delta t'$, to te dwa zdarzenia są rozdzielone w innym układzie poruszającym się względem pierwszego z prędkością ϑ , przedziałem czasu Δt równym:

$$\Delta t = \Delta t' / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (6)$$

gdzie: c' - prędkość światła.

Powyższy efekt wynika z równań transformacji Lorentza. Zdaniem Lorentza, każde poruszające się ciało powinno kurczyć się w kierunku swojego ruchu. Jeśli prędkość tego ruchu jest równa v , to skurcz powinien być proporcjonalny do mnożnika:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c'^2}}} \quad (7)$$

Tak więc, ciało stałe o długości $\Delta l'$, znajdujące się w jednym układzie współrzędnych uzyskuje nową długość, poruszając się względem tego układu z prędkością v w drugim układzie:

$$\Delta l = \Delta l' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c'^2}} \quad (8)$$

Zależność (8) nazywamy kontrakcją długości Lorentza (Barannikov i Firsov 2009).

Jeżeli transformacje Lorentza wnoszą do układu fizycznego istotny wkład, to relatywistyczne efekty zaczynają automatycznie odgrywać znaczącą rolę w zmniejszaniu rozmiarów, kształtowaniu przestrzeni, opóźnieniu czasu i zależności masy od prędkości. Oznacza to, że system tribologiczny, niezależnie od własnej prędkości, może ewoluować zgodnie z prawami teorii względności (Lyubimov i in. 2013).

Mikromechanizmy przeciwtarciowe

Działanie tarcia determinuje termiczną aktywację powierzchni materiałów trących, której towarzyszy ruch dyslokacji. Uważa się, że ta „wspinaczka” dyslokacji w kierunku powierzchni materiałów jest najbardziej typowym procesem strukturalnym zachodzącym podczas tarcia (Bakley 1986).

Ciepło tarcia stanowi do 99% całkowitej energii, która częściowo jest magazynowana na powierzchniach trących (Kostetsky 1976). Ekstremalnym stanem warstwy powierzchniowej jest wzbudzony stan metastabilny zwany triboplazmą. Przejście materiału z początkowego stanu ustalonego w triboplazmę jest podobne do zmian zachodzących w substancjach podczas ogrzewania. Wraz ze wzrostem temperatury ciało stałe topi się, a następnie odparowuje. Jeśli temperatura nadal rośnie, następuje jonizacja atomów gazu. Pojawia się nowy wysokoenergetyczny stan gazowy nazywany plazmą, w którym w przybliżeniu

występuje równa liczbą jonów dodatnich i elektronów, co decyduje o kwazineutralności plazmy (Heinke 1987).

Triboplazma jest niestabilna jak inne rodzaje plazmy i ma krótki czas trwania wynoszący około 10^{-8} s, a jej temperatura odpowiada 10^4 K i jest dobrze skorelowana z energią emitowanych elektronów (Lyubimov i in. 2013).

Aktywacja powierzchni ciała stałego przez siły tarcia, wysoką temperaturę i przejście materiału do stanu triboplazmy rozszerzają możliwości różnych przemian chemicznych. Ponieważ tribosystem jest otwartym układem termodynamicznym, w którym entropia może się zmniejszać, przemiany chemiczne mogą zachodzić w kontakcie tarciovym z dodatnimi zmianami entropii (Heinke 1987), a efekty tarcia triboplazmatycznego przyspieszają reakcje tribochemiczne od 300 do 8000 razy (Kouzharov 1991).

Stwierdzono, że obecność w strefie tribokontaktu pierwiastków z bloku *d* z nieobsadzoną powłoką elektronową (żelazo, kobalt, nikiel, miedź) zmniejsza współczynnik tarcia i zużycie powierzchni trących (Heinke 1987, Kouzharov 1991). Jednym z wyjaśnień tego zjawiska jest fakt, że wiele pierwiastków z tej grupy jest typowymi akceptorami elektronów, które łatwo tworzą kompleksy z ligandami. Termin „ligand” służy do oznaczenia grup atomów lub cząsteczek otaczających centralny atom tworząc związek kompleksowy, czyli taki w którym jeden z atomów tworzy więcej wiązań niż pozwala na to jego walencyjność (Cartnell i Fowls 1978).

Procesy przechodzenia elektronów i tworzenia związków kompleksowych należą do kategorii plazmowej transformacji chemicznej materiałów podczas tarcia. Procesy te prowadzą do powstania powierzchniowego filmu, jako jednego z najbardziej efektywnych czynników redukcji tarcia i tempa zużycia trących powierzchni (Lyubimov i in. 2013).

Zgodnie z prawem Arreniusa, aby zaszła reakcja chemiczna, reagenty powinny pokonać barierę energetyczną (potencjalną) równą energii aktywacji. Przemiany pierwiastków chemicznych są zgodne z prawami mechaniki kwantowej, której prawidłowości przejawiają się w tak zwanym „efekcie tunelowym”. Efekt ten związany jest z zachowaniem cząstek swobodnych opisywanych w mechanice kwantowej przez funkcję falową ψ , proporcjonalną do $\exp(i\frac{W}{\hbar}t)$, gdzie W jest energią tych cząstek, a gdy cząstki przechodzą przez barierę potencjału, funkcja falowa redukuje się do $\exp(i\frac{W-U}{\hbar}t)$, gdzie U jest wartością bariery potencjału. Należy zwrócić uwagę na to, że nawet jeśli $U > W$, prawdopodobieństwo, że cząstki znajdują się poza barierą potencjału jest większe od zera, czyli $|\psi|^2 > 0$ i na tym właśnie polega efekt tunelowy (Lyubimov i in. 2013).

Pojawienie się opisanych powyżej efektów relatywistycznych zwiększa prawdopodobieństwo efektu tunelowego, co przyspiesza generowanie związków kompleksowych (Lyubimov i Dolgopulov 2011).

Warstwa związków kompleksowych wykazuje wysoką smarowność i ułatwia ślizganie się powierzchni, jak w przypadku ślizgania się deski surfingowej na fali, stąd efekt ten

nazywany jest „efektem surfingowym”. Związki kompleksowe zaadsorbowane na powierzchni trącej tworzą „błonę” lub „film surfingowy”. Film surfingowy pełni funkcje wymiany masy pomiędzy trzecim ciałem a otoczeniem i posiada właściwość samoodtworzenia. Ulega zniszczeniu pod wpływem sił tarcia i pojawia się ponownie, pozostaje stabilny, wytrzymując procesy tribodestrukcji i utleniania (Polyakov 1989). Analiza obrazów wykonanych za pomocą skaningowego mikroskopu tunelowego pokazuje, że filmy surfingowe mają strukturę kwazikrystaliczną, inną niż struktura tribopowierzchni, na której występują (Lyubimov i Dolgopolov 2011).

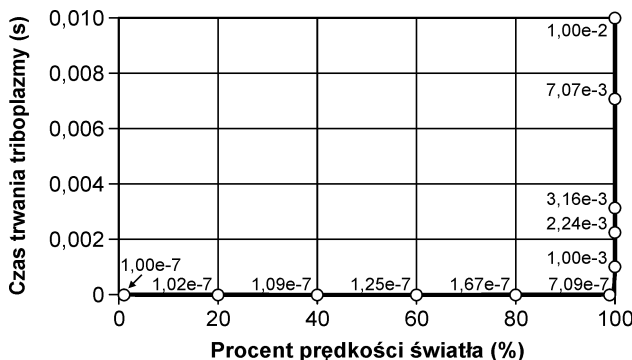
Tworzenie się filmu surfingowego na powierzchni polikrystalicznej ciała stałego wymaga pokonania bariery potencjału na granicach międzykrystalicznych. Grubość granic międzykrystalicznych jest porównywalna z długością fali de Broila w strukturach metalowych wzbudzanych tarciowo z ruchomymi granicami międzyziarnowymi. Z reguły można przyjąć, że energia aktywacji ruchliwości elektronów przy pokonywaniu bariery potencjału jest zmniejszona w wyniku działania mechanizmu termicznego i dodatkowo mechanizmu tunelowego. Zwiększa to prawdopodobieństwo zajścia powierzchniowych reakcji chemicznych. Na podstawie powyższych rozważań można przyjąć, że efekty tunelowe wnoszą dość istotny wkład w tribochemiczną syntezę związków kompleksowych (Lyubimov i in. 2013).

Droga do nieskończonej trwałości narzędzi skrawających

Bazując na omówionych powyżej obserwacjach, należy stwierdzić, że uzasadnione jest wprowadzenie poprawek relatywistycznych do obliczeń mikromechanizmów tarcia i zużycia oraz uwzględnienie efektów relatywistycznych przy konstruowaniu modeli wyjaśniających zjawiska obserwowane podczas tarcia. Potwierdza to bardzo wysoki stopień mechanicznej aktywacji trących powierzchni (tribopowierzchni), skutkujący w szczególności pojawianiem się stanów wzbudzonych w postaci plazmy, co można wyjaśnić absorpcją przez tribopowierzchnię energii dyslokacji. Deryagin wykazał, że skupiska dyslokacji poruszają się w kierunku powierzchni ciała stałego i wywołują jego mechaniczną aktywację, której towarzyszy emisja egzoelektronowa (Lyubimov i in. 2013).

Super wzbudzony stan plazmy powstający w procesie tarcia (triboplazmy) ma krótki czas trwania wynoszący około 10^{-8} s, jednak z punktu widzenia zewnętrznego obserwatora trwa znacznie dłużej ze względu na spowolnienie czasu lokalnego. Przepływ czasu różni się w układach odniesienia będących względem siebie w ruchu i spowalnia zgodnie ze szczególną teorią względności (równanie 6). Czas jest uwzględniony w wielu prawach fizycznych i jest całkiem naturalne, że wymiar czasowy wpływa na ewolucję różnych procesów. Efekt ten jest najczęściej nieistotny i uzasadnione jest jego pomijanie w opisie wielu procesów. Istnieje jednak pewna kategoria zjawisk fizycznych, w których celowe jest uwzględnienie dylatacji czasu. Można przyjąć, że efekt ten intensyfikuje niezwykłą aktywność fizyczną i chemiczną tribopowierzchni.

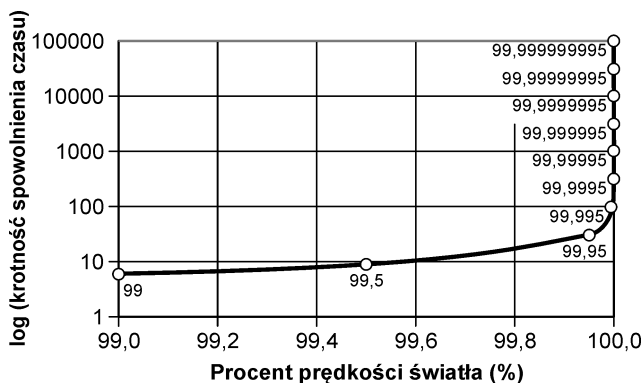
Na Rys. 2 przedstawiono zależność czasu trwania triboplazmy od prędkości dyslokacji wyrażonej w procentach prędkości światła z uwzględnieniem zjawiska dylatacji czasu. Widzimy, że gdy nie uwzględniamy tego zjawiska, czas trwania triboplazmy jest równy 10^{-8} s, natomiast przy prędkości dyslokacji równej 60% prędkości światła, czas trwania dyslokacji wydłuża się o 25%, przy 80% prędkości światła, wydłuża się o 67%. Wielokrotne przyrosty czasu trwania triboplazmy nastąpią przy prędkościach zbliżających się do prędkości światła (powyżej 90% prędkości światła). Pokazano je na Rys. 3 przedstawiając krotność spowolnienia czasu w skali logarytmicznej. W wyniku dylatacji, krotność spowolnienia czasu może osiągać wartości powyżej 100 tys. razy dłuższe, czyli czas trwania triboplazmy z 10^{-8} s wydłuża się do 10^{-3} s. Ten efekt tłumaczy dlaczego reakcje tribochemiczne zdążają do końca, a nowe związki chemiczne powstają, pomimo tego, że ich pojawienie się w innym przypadku byłoby mało prawdopodobne.



Rys. 2. Zależność czasu trwania triboplazmy od prędkości dyslokacji wyrażonej w procentach prędkości światła (z uwzględnieniem zjawiska dylatacji czasu)

Fig. 2. Relationship of the triboplasm life to the dislocation rate given as a percentage of the light speed (including the phenomenon of time dilation)

Zdaniem wielu fizyków entropia jest „strzałką czasu”. Amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla, L. Cooper tak wyjaśnia to twierdzenie: „Idea, że system zmienia się podczas dowolnego procesu fizycznego od stanu bardziej uporządkowanego do mniej uporządkowanego, dostarcza nam kierunku czasowego, którego wcześniej brakowało. Równanie ruchu w mechanice newtonowskiej jest odwracalne. Jednokierunkowy ruch planet po swoich orbitach nie jest w żaden sposób lepszy od przeciwnego... Jest jednak jasne, że zidentyfikowany kierunek istnieje wśród innych, bardziej złożonych zdarzeń: łatwiej jest zaparkować samochód niż wyjechać z parkingu, łatwiej jest rozbić szybę niż ją naprawić, łatwiej jest rozrzucić kostki do gry niż je złożyć, łatwiej jest zabić człowieka niż go ożywić.” (Cooper 1973).



Rys. 3. Wpływ prędkości dyslokacji wyrażonej w procentach prędkości światła na krotność obserwowanego spowolnienia czasu w ujęciu tribologii relatywistycznej

Fig. 3. Effect of the dislocation rate given as a percentage of the light speed on the multiplicity of observed time deceleration in terms of the relativistic tribology

Podstawowa teoria termodynamiki układów otwartych przewiduje możliwość braku wzrostu entropii lub nawet jej zmniejszenia. Możliwe jest uniknięcie wzrostu entropii poprzez wymianę energii układu termodynamicznego z otoczeniem. Entropia ulega znacznie większemu zmniejszeniu podczas procesów przenoszenia masy. Im intensywniejszy jest transfer masy, tym mniej rośnie entropia, a idąc tokiem rozumowania L. Coopera, tym bardziej widoczna jest relatywistyczna możliwość opóźnienia czasu. Tezy te zostały potwierdzone przez badaczy, choćby w termodynamice czarnych dziur. Gdy czarna dziura oddziałuje z przestrzenią kosmiczną, wzrost entropii w niej i wokół niej jest zerowany, co praktycznie odpowiada zatrzymaniu czasu (Hawking i Penrose 2007).

Spontaniczna koncentracja energii fali triboplazmy w małym obszarze przestrzeni skutkuje kolapsem falowym (redukcją). Zapadaniu się plazmy towarzyszy powstawanie pustki przypominającej dysk, o zredukowanej gęstości, w której oscylujące pole elektryczne zostaje „zablokowane” z wartością maksymalną w centrum. W ten sposób układ staje się jak „czarna dziura”. Ocena prawdopodobieństwa tego zjawiska i jego następstw jest jednym z najtrudniejszych problemów tribofizycznych (Barannikov i Firsov 2009).

Reakcje chemiczne zachodzące w tribopłazmie charakteryzują się dużą różnorodnością i specyficznymi cechami powstałych w nich produktów. Stwierdzono tworzenie się związków kompleksowych pierwiastków z bloku *d*, z nieobsadzoną powłoką elektronową (żelazo, kobalt, nikiel, miedź), z organicznymi i nieorganicznymi ligandami (Heinke 1987, Kouzharov 1991). Prawie wszystkie metale są akceptorami elektronów, podczas gdy większość produktów destrukcji tribologicznej jest donorem elektronów. Działają one jak ligandy, sprzyjające powstawaniu związków kompleksowych (Polyakov 1988b).

Tribosynteza związków kompleksowych dotyczy aktywowanego kompleksu o strukturze dyssypatywnej (uporządkowanej, samoorganizującej się) trwającej w ułamkach mikrosekund i wymagającej ciągłego pompowania energii przez siły tarcia. Według

Polyakowa struktura dysypatywna oznacza „przeźnięć lub strukturę czasoprzestrzenną istniejącą i krążącą w nieskończenie długim czasie pod warunkiem stałego dopływu energii i materii” (Polyakov 1989). Jednak mając na uwadze, że kontakt nierówności powierzchni trących trwa około 10^{-4} - 10^{-3} s, bardziej uzasadniona jest hipoteza o zintensyfikowaniu aktywności tribochemicznej z powodu relatywistycznego wkładu do prawdopodobieństwa przejścia tunelowego, co opisano powyżej.

Na bazie związków kompleksowych na powierzchniach trących adsorbowana jest warstwa ochronna tzw. filmu surfingowego. Film surfingowy posiada właściwość samoodtwarzania. Procesy powstawania filmu surfingowego i destrukcji powierzchni trących zachodzą w przybliżeniu z tą samą szybkością, dyktującą dynamiczną stabilność struktury surfingowej (Polyakov 1988b).

Im więcej dyslokacji dociera do powierzchni trących, tym silniejsze wytrącanie jonów i ich klasteryzacja, a tym samym procesy tworzenia się warstw powierzchniowych (filmu surfingowego).

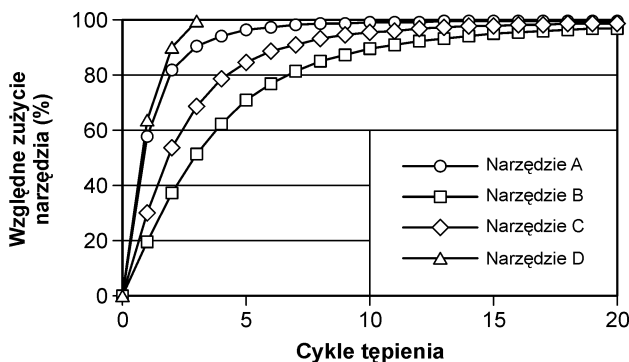
Schemat blokowy zjawisk fizyko-chemicznych zachodzących w procesie tarcia podczas skrawania materiałów przedstawiono na Rys. 4. Widzimy, że tak przedstawiony termodynamiczny układ otwarty dąży do samoregulacji i ograniczenia entropii, a tym samym do redukcji współczynnika tarcia i wzrostu trwałości powierzchni trących. Przy zachowaniu dynamicznej stabilności wytwarzania struktury surfingowej, tempo powstawania filmu surfingowego zrównuje się z tempem jego destrukcji, co w efekcie prowadzi do zahamowania procesu zużyciowego. Odnosząc powyższe stwierdzenia do procesu obróbki wiórowej i zużycia narzędzi skrawających taki efekt prowadził by do nieskończonej trwałości ostrza.

Praktyczne zobrazowanie hipotetycznej idei nieskończonej trwałości ostrza pokazano na Rys. 5, który przedstawia krzywe zużycia trzech przykładowych narzędzi (A, B i C) o trwałości dążącej do nieskończoności. Na przedstawionym wykresie (Rys. 5) względne zużycie narzędzia 100% wyznacza asymptotę poziomą dla krzywych zużycia tych narzędzi, tzn. krzywe będą dążyły do końca okresu trwałości narzędzi lecz nigdy go nie osiągną, gdyż z matematycznego punktu widzenia stanowi ona granicę dla ich funkcji trwałości. Krzywa zużycia narzędzia D obrazuje przypadek, w którym dominującym mechanizmem zużyciowym nie jest tarcie, lecz kruche pękanie. Pozioma linia względnego zużycia 100% nie jest asymptotą dla funkcji zużycia tego narzędzia.



Rys. 4. Schemat blokowy zjawisk fizyko-chemicznych w procesie tarcia podczas skrawania materiałów

Fig. 4. Block diagram of physical and chemical phenomena in the friction process during material cutting



Rys. 5. Hipotetyczne krzywe zużycia narzędzi o nieskończonej trwałości
Fig. 5. Hypothetical wear curves for tools with infinite life time

Dynamiczna stabilność wytwarzania struktury surfingowej może być istotnie zakłócona w wyniku obecności tlenków. Gromadzenie się związków kompleksowych jest możliwe tylko wtedy, gdy powierzchnia trąca jest wolna od warstw tlenków. Kompleksy wolą występować na powierzchni młodej niż na tlenku (Boushkova i Garnovskii 1990).

Podsumowanie

W warunkach procesu tarcia, dyslokacje przyspieszają wraz ze zbliżaniem się do powierzchni trących (tribopowierzchni). Oznacza to, że wpływ efektów relatywistycznych (spowolnienia czasu, zmiany wymiarów) podczas ich ruchu nasila się. Warstwy powierzchniowe ciał stałych uczestniczących w tarcu aktywnie wymieniają energię z otoczeniem, stają się więc klasycznym przykładem otwartych układów termodynamicznych, w których najbardziej prawdopodobne jest ograniczenie wzrostu entropii.

Prawidłowości spowolnienia czasu podczas oddziaływania tarcowego między ciałami stałymi są zatem określone przez dwie podstawowe teorie: szczególną teorię względności i termodynamikę układów otwartych. Obszarem, w którym efekty te powinny być najbardziej widoczne, są warstwy powierzchniowe biorące udział w tarcu.

Powierzchnia ciała stałego w kontakcie tribologicznym jest aktywowana przez siły tarcia i wysoką temperaturę oraz ciągle dopływającą energię dyslokacji, co skutkuje przejściem materiału do stanu triboplazmy, w którym rozszerzają się możliwości różnych przemian chemicznych, potęgowane relatywistycznym efektem spowolnienia czasu. W wyniku tych przemian powstają związki kompleksowe i tworzy się film surfingowy, a skutkiem jest obniżenie współczynnika tarcia i tempa zużycia powierzchni. Opisane zjawiska mogą zachodzić również w materiale ostrzy narzędzi skrawających, w kontakcie tribologicznym z materiałem obrabianym. Drogą do nieskończonej trwałości narzędzi skrawających jest zachowanie dynamicznej stabilności tempa wytwarzania filmu surfingowego z tempem jego destrukcji, w nieskończenie długim czasie pod warunkiem stałego dopływu energii i materii.

Literatura

Akhmatov A.S., 1963: *Molecular Physics of Boundary Friction (Physical-Mathematical Literature, Moscow)*, 472.

Bakley D., 1986: *Surface Phenomena During Adhesion and Friction Interaction (Moscow, Mashinostroyeniye)*, 360.

Barannikov A.A., Firsov A.V., 2009: *Main Concepts of Modern Physics*, 349.

Bershadskii L.I., 1989: Interaction between structural mechanism and dissipative flows in kinetic (non-Coulomb) wear and friction. *J. Frict. Wear* 10(2), 358-364.

Boushkova E.S., Garnovskii A.D., 1990: Coordination compounds of metals containing organic ligands as effective additives to materials. *Wearlessness*, 151-170.

Cartnell E., Fowls G.V.A., 1978: *Valence and Structure of Molecules (English translation) ed. by M.V. Bazilevsky (Chemistry, Moscow)*, 360.

Chichinadze A.V., 1995: *Fundamentals of Tribology (Science and Technology, Moscow)*, 778.

Chikhos Kh.X., 1982: *System Analysis in Tribonics (Mir, Moscow)*, 348.

Cooper L., 1973: *Classic Physics (Mir, Moscow)*, 479.

Einstein A., 1965: *Collection of Scientific Works (Nauka)*, 517.

Hawking S., Penrose R., 2007: *Nature of Space and Time (Amfora)*, 186.

Heinke G., 1987: *Tribochemistry (Mir, Moscow)*, 635.

Kana R., 1968: *Physical Science of Metals, vol. 3 (Mir, Moscow)*, 483.

Kostetsky V.I., 1976: *Surface Strength of Materials in Friction (Tekhnika, Kiev)*, 283.

Kouzharov A.S., 1991: *Coordination tribochemistry of selective transfer. Doctor of Engineering Science, Dissertation. Rostov-on-Don*, 42.

Lyubimov D.N., Dolgoplov K.N., 2010: *Difusive Processes in Friction (IP Bouryhin V.M., Shakhty)*, 148.

Lyubimov D.N., Dolgoplov K.N., 2011: *Friction and Theory of Relativity: Time Abnormalities Tribosystems (Fbgou Vpo Yurgues, Shakhty)*, 126.

Lyubimov D.N., Dolgoplov K., Pinchuk L., 2013: *Micromechanisms of Friction and Wear, Introduction to Relativistic Tribology. Springer- Verlag Berlin Heidelberg.* <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35148-8>

Lyubimov D.N., Ryzhikov V.A., 2006: *Phys. Chem. Processes in Friction: Manual. Novocherkask: South Russ, State Eng. Univ.* 147.

Okoniewski S., 1974: *Podstawy fizyczne technologii materiałowej. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa*

Polyakov S.A., 1988a: Theoretical analysis of main mechanisms of evolution of tribosystems during selective transfer. *Durability of Machinery Rubbing Parts, Issue 3 (Mashinostroyeniye, Moscow)*, 3-27.

Polyakov S.A., 1988b: Self-organization of selective transfer structure. *Durability of Machinery Rubbing Parts, 3: 45-95.*

Polyakov S.A., 1989: Terminology of selective transfer. Durability of Machinery Rubbing Parts, 4, 11-15.

Prokhorov A.M., 1992: Physical Encyclopedia 3 (Sov. Encyclopedia, Moscow), 672-672c

Wilkowski J., Barlak M., 2018: The lifetime of cemented carbide blades during wood-based panels milling. *Biuletyn Informacyjny OB-RPPD* 3-4, 118-128, in Polish. <https://doi.org/10.32086/biuletyn.2018.06>

Wilkowski J., Barlak M., Werner Z., Zagórski J., Czarniak P., Podziewski P., Szymanowski K., 2019: Lifetime improvement and the cutting forces in nitrogen-implanted drills during wood-based material machining. *Wood and Fiber Science* 51(2): 209-220. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-021>

Wilkowski J., Barlak M., Böttger R., Werner Z., Konarski P., Pisarek M., Wachowicz, J., Von Borany J., Auriga A., 2021: Effect of nitrogen ion implantation on the life time of WC-Co tools used in particleboard milling. *Wood Material Science & Engineering* 1-12. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1900391>

Wilkowski J., Jegorowa A., Barlak M., Werner Z., Zagórski J., Staszkiwicz B., Kurek J., Kruk M., 2022: Effect of nitrogen ion implantation on the tool life used in particleboard CNC drilling. *Materials* 2022, 15, 3420. <https://doi.org/10.3390/ma15103420>

Artykuł recenzowany / Reviewed paper

Zgłoszony / Submitted: 09.06.2022

Opublikowany online / Published online: 30.06.2022