Stanisław NOSAL*

KSZTAŁTOWANIE ODPORNOŚCI NA ZACIERANIE ADHEZYJNE Z WYKORZYSTANIEM WYBRANYCH MODELI

FORMING ADHESIVE SEIZING RESISTANCE BASED ON THE SELECTED MODELS

Słowa kluczowe:

modele zacierania, odporność na zacieranie, metody obróbki

Key words:

seizing models, seizing resistance, machining methods

Streszczenie

Zacieranie należy do tribologicznych procesów niszczących, które są niedopuszczalne. W pracy przeanalizowano wybrane modele zacierania adhezyjnego (Kosteckiego, Bloka i kinetyczny) w aspekcie sformułowania na ich podstawie przesłanek dotyczących kształtowania odporności na ten rodzaj uszkodzenia. Stwierdzono, że na podstawie modelu Kosteckiego można zdefiniować odporność na zacieranie (zimne i gorące). Model Bloka dotyczy zacierania gorącego i stwarza takie przesłanki projektowania skojarzeń, aby bilansowało się w nich

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, tel.: (61) 647 58 52; stanislaw.nosal@put.poznan.pl.

ciepło generowane z ciepłem dyssypowanym. Zacieranie traktowane jest najczęściej jako zachodzące nagle, co utrudnia określenie postulatów dotyczących przeciwdziałania. W modelu kinetycznym założono, że do zacierania nie dochodzi nagle, ale w kilku etapach, co umożliwia sformułowanie takich postulatów. Wychodząc z tego założenia, przeanalizowano efektywność przeciwzatarciową obróbek: zwiększających pojemność olejową powierzchni i spełniających postulat przerywania styku tarciowego, wytwarzających warstwę wierzchnią o dodatnim gradiencie wytrzymałości na ścinanie oraz kształtujących twardość warstwy wierzchniej (bez zmiany składu chemicznego).

WPROWADZENIE

Zadaniem tribologii jest m.in. wskazywanie, jakie potencjalne właściwości należy nadać trącym się elementom, aby w określonych warunkach użytkowania osiągnąć oczekiwane efekty trwałościowe i energetyczne. Do tribologicznych procesów niszczących, niedopuszczalnych, a niekiedy również niebezpiecznych, należy zaliczyć zacieranie adhezyjne. Zależnie od obiektu, w którym występuje, może spowodować znaczne straty materialne, jak również może stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia ludzkiego. Na zacieranie narażone są skojarzenia słabo smarowane, w których występuje tarcie ślizgowe i toczno-ślizgowe. Należy rozróżnić zacieranie i zatarcie **[L. 1]**.

Zacieranie adhezyjne można określić jako postępujące uszkadzanie warstwy wierzchniej trących się elementów spowodowane przeniesieniem się tarcia z powierzchni w głąb tej warstwy wskutek powstawania i niszczenia ognisk zacierania adhezyjnego. Postępujące z coraz większą intensywnością zacieranie adhezyjne może doprowadzić do unieruchomienia skojarzenia, czyli do zatarcia.

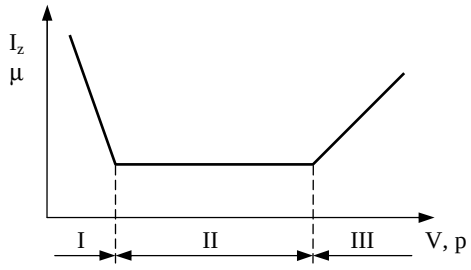
Celem pracy jest określenie możliwości kształtowania odporności na zacieranie adhezyjne na podstawie wybranych modeli.

ANALIZA MOŻLIWOŚCI KSZTAŁTOWANIA ODPORNOŚCI NA ZACIERANIE ADHEZYJNE NA PODSTAWIE WYBRANYCH MODELI

Model Kosteckiego

Kostecki **[L. 2]** sformułował prawo adaptacji strukturalnej, zgodnie z którym dla skojarzeń wszystkich materiałów istnieje taki zakres wymuszeń zewnętrznych (nacisków, prędkości i temperatury), w którym tarcie oraz intensywność zużywania mają ustalony charakter i są nawet o kilka rzędów wielkości mniejsze niż poza tym zakresem **(Rys. 1)**. Szerokość tego zakresu – obszar II na **Rys. 1** i jego położenie na skali wymuszeń zależą od rodzaju trących się materiałów, składu i właściwości środowiska itd. Stabilizacja i minimalizacja inten-

sywności zużywania w obszarze II są możliwe dzięki adaptacji strukturalnej warstwy wierzchniej trących się materiałów do warunków tarcia. Adaptacja ta polega na przebudowie struktury wyjściowej warstwy wierzchniej w nową strukturę o dużej wytrzymałości i stabilności energetycznej. Zachwianie równowagi dynamicznej między tworzeniem a usuwaniem warstewek reakcyjnych (struktur wtórnych wg Kosteckiego) zapoczątkowuje zacieranie adhezyjne.



Rys. 1. Schemat ilustrujący prawo adaptacji strukturalnej Kosteckiego [L. 2]; I – zacieranie adhezyjne zimne, II – tarcie i zużywanie ustalone, III – zacieranie adhezyjne gorące

Fig. 1. Scheme illustrating Kostecki's structural adaptation law [2]; I – cold adhesive seizing, II – stabilized friction and wear, III – hot adhesive seizing

Przejście od tarcia zewnętrznego zlokalizowanego głównie w warstewkach reakcyjnych do tarcia wewnętrznego zachodzącego w materiale jest możliwe w dwóch przypadkach, mianowicie wówczas, gdy parametry wymuszenia zewnętrznego (p, V):

– nie wystarczają do takiej aktywacji warstwy wierzchniej, która umożliwia powstanie trwałych warstewek reakcyjnych i wówczas zachodzi zacieranie adhezyjne zimne (obszar I na **Rys. 1**),
– przekraczają wartości krytyczne i powodują zachwianie stabilnej równowagi między tworzeniem a usuwaniem warstewek reakcyjnych i wtedy następuje zacieranie adhezyjne gorące (obszar III na **Rys. 1**).

Czynnikiem aktywującym zacieranie adhezyjne zimne jest odkształcenie plastyczne, a zacieranie gorące – ciepło, a ściślej temperatura. W niektórych przypadkach zacieranie zimne może doprowadzić do zacierania gorącego. Dzieje się tak dlatego, że powierzchnie schropowacone wskutek zacierania zimnego silnie się nagrzewają podczas tarcia, powstają więc warunki do zacierania gorącego.

Z modelu Kosteckiego wynikają dwa ważne wnioski dotyczące kształtowania odporności węzłów na zacierania adhezyjne:

1) model ten umożliwia zdefiniowanie odporności na zacieranie: są to dopuszczalne wartości wymuszeń zewnętrznych – prędkości i nacisków, przy których występuje zużywanie ustalone – **Rys. 1**; zatem zwiększanie odpor-

ności na zacieranie polega na rozszerzaniu zakresu dopuszczalnych wartości p i V, w którym występuje zużywanie ustalone,

2) zacieranie nie występuje, jeśli tarcie ma charakter zewnętrzny i jest zlokalizowane w strefie przypowierzchniowej; stąd wynika przesłanka, że odporność na zacieranie (w określonym przedziale p i V) zapewnia wytworzenie metodami obróbki powierzchniowej takiej strefy.

Model Bloka

Zgodnie z modelem Bloka **[**za **L. 4]** przerwanie ciągłości warstewki smarnej następuje wówczas, gdy dla danej kombinacji materiałów pary trącej i chemicznie nieaktywnego smaru następuje przekroczenie określonej temperatury krytycznej w strefie kontaktu tarciowego. Warunek wystąpienia zacierania według Bloka wyraża się następująco:

$$T_{\Sigma} = T_p + T_b \geq T_{kr},$$

gdzie: T_{Σ} – całkowita temperatura w strefie styku, T_p – temperatura trących się powierzchni, T_b – temperatura błysku (chwilowy przyrost temperatury na elementarnych powierzchniach styku), T_{kr} – temperatura krytyczna dla nieaktywnej substancji smarującej i trących się materiałów.

Z wzorów na obliczanie temperatur T_p i T_b dostępnych w piśmiennictwie wynika, że całkowita temperatura T_{Σ} zależy od:

- parametrów wymuszenia zewnętrznego (moc tarcia, obciążenie, prędkość),
- rozwiązania konstrukcyjnego węzła ślizgowego (nominalna powierzchnia styku, dystrybucja ciepła między trące się elementy i ich chłodzenie),
- rodzaju materiałów zastosowanych na elementy pary trącej, zwłaszcza od ich właściwości cieplno-fizycznych i mechanicznych,
- parametrów mikrogeometrii warstwy wierzchniej (niezbędnych do obliczenia wymiaru elementarnej powierzchni styku).

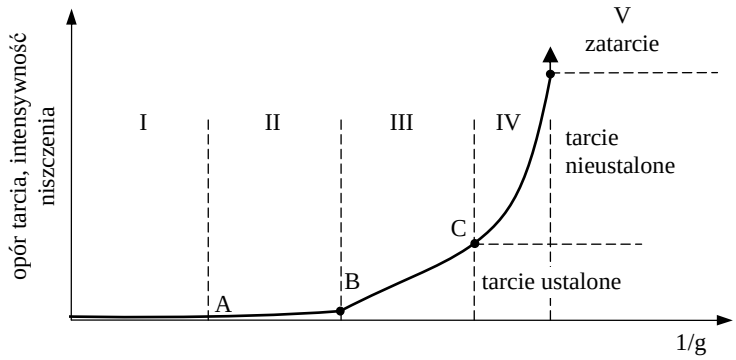
Model Bloka dotyczy zacierania gorącego i odnosi się do silnie obciążonych skojarzeń smarowanych olejem mineralnym bez dodatków uszlachetniających. Na jego podstawie można sformułować ważną przesłankę dotyczącą takiego projektowania skojarzeń, aby bilansowało się w nich ciepło generowane z ciepłem dyssypowanym.

Model kinetyczny

Według modeli zacierania adhezyjnego, opracowanych przez Kosteckiego, Bloka i innych autorów, do zacierania dochodzi nagle, bez etapów pośrednich. Utrudnia to analizę tego procesu i określenie sposobów przeciwdziałania wynikających z jego mechanizmu.

Model kinetyczny zacierania adhezyjnego **[L. 5]** został oparty na formalnych pojęciach i zasadach kinetyki chemicznej, zgodnie z którymi:

a) przy zmianie wymuszeń zewnętrznych działających na układ fizyczny, traktowany jako system elementów strukturalnych, przechodzi on od jednego stanu równowagi do drugiego,
b) przemiana powyższa nie przebiega bezpośrednio, ale składa się z wielu etapów, które wyznaczają jej mechanizm.



Rys. 2. Etapy (I–V) przechodzenia węzła ślizgowego od tarcia płynnego do zatarcia przez punkty krytyczne (A÷D) w funkcji malejącej w czasie grubości warstewki smarnej (1/g) [5]; I – tarcie płynne, bez zużywania, II – tarcie graniczne, zużywanie tribochemiczne, III – tarcie mieszane, zużywanie adhezyjne, IV – zacieranie adhezyjne, V – zatarcie, A – przerwanie ciągłości warstewki smarnej i zniszczenie warstewki reakcyjnej, B – utworzenie mikrosczepień adhezyjnych, C – powstanie ogniska zacierania, D – zatarcie

Fig. 2. Stages (I–V) of sliding pair passing from smooth friction to seizing through critical points (A÷D) in decreasing function during lubricating layer thickness (1/g) [5]; I – smooth friction, no wear, II – mitigated solid friction, tribochemical wear, III – mixed friction, adhesive wear, IV – adhesive wear, V – seizure, A – lubricating layer continuity break and reactive layer damage, B – adhesive micro-tacking creation, C – seizure source occurring, D – seizure

Odnosząc te założenia do węzła ślizgowego, to jego przejście od jednego stanu równowagi, czyli tarcia płynnego, do drugiego, którym jest zatarcie, wymaga pewnego czasu i odbywa się w kilku etapach pośrednich **(Rys. 2)**. Są to:

– tarcie graniczne, podczas którego zachodzi odkształcenie sprężyste i plastyczne nierówności powierzchni oraz zużywanie tribochemiczne,
– tarcie mieszane, które jest przyczyną zużywania adhezyjnego,
– zacieranie adhezyjne, podczas którego tarcie jest zlokalizowane w głębi warstw wierzchnich trących się elementów, powodując ich niszczenie ze zwiększającą się szybkością.

Punkty A, B i C na **Rys. 2** można potraktować jako punkty krytyczne w dochodzeniu węzła ślizgowego do zatarcia, gdyż zachodzi w nich zmiana

rodzaju oddziaływań w strefie kontaktu tarciowego. Ich wyodrębnienie umożliwia sformułowanie postulatów dotyczących kształtowania odporności na zacieranie skojarzeń ślizgowych – **Tabela 1**.

Tabela 1. Postulaty dotyczące ukształtowania warstwy wierzchniej wyprowadzone z kinetycznego modelu zacierania
Table 1. Demands concerning surface layer forming led out of kinetic model of seizing

Punkt krytyczny w kinetycznym modelu zacierania (wg **Rys. 2**)	Postulat odnośnie do warstwy wierzchniej
A. Przerwanie ciągłości warstewki smarnej i niszczenie warstewki reakcyjnej	1. Warstwa wierzchnia przystosowana do współpracy z substancją smarującą 2. Istnienie strefy przypowierzchniowej o dużym dodatnim gradiencie wytrzymałości na ścinanie
B. Utworzenie sczepień adhezyjnych	1. Duża twardość (odporność na odkształcenie plastyczne) 2. Małe opory tarcia o element współpracujący 3. Dobre odprowadzanie ciepła ze strefy kontaktu tarciowego 4. Mała skłonność do sczepiania z materiałem elementu współpracującego
C. Powstanie ogniska zacierania	Przerywanie styku tarciowego

EFEKTYWNOŚĆ PRZECIWZATARCIOWA WYBRANYCH METOD KSZTAŁTOWNIA WARSTWY WIERZCHNIEJ W ASPEKCIE MODELU KINETYCZNEGO ZACIERANIA ADHEZYJNEGO

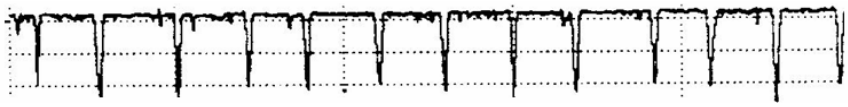
Obróbki zwiększające pojemność olejową powierzchni i spełniające postulat przerywania styku tarciowego

Pojemność olejową powierzchni można zdefiniować jako ilość substancji smarującej, która może być utrzymana przez głębokie doliny chropowatej powierzchni, przypadającą na jednostkę powierzchni. Do obróbek istotnie zwiększających pojemność olejową powierzchni i umożliwiających przerywanie styku tarciowego można zaliczyć m.in. honowanie (gładzenie), „plateau", nagniatanie oscylacyjne, obróbki wytwarzające mikrozasobniki smarowe metodami: mechaniczną, trawienia lub za pomocą lasera. Obróbki te różnią się od strony realizacyjnej, ale pozwalają uzyskać podobny efekt – na gładkiej powierzchni otrzymuje się układ mikrowgłębień będących zasobnikami substancji smarującej i przerywających ciągłość styku tarciowego, co utrudnia powstanie ogniska zacierania.

Wykorzystanie ukształtowania topografii powierzchni do zwiększania odporności na zacieranie jest najbardziej zaawansowane w przypadku tulei cylin-

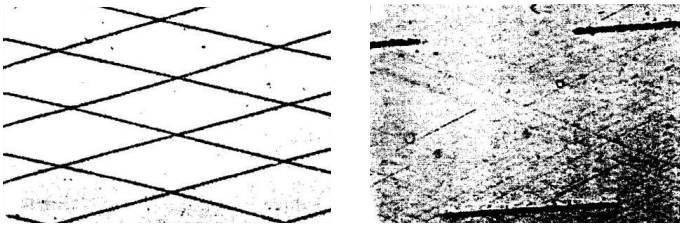
drowych silników spalinowych i ma ścisły związek z rozwojem techniki laserowej **[L. 6–8]**. W wyniku obróbki laserowej można uzyskać:

a) krzyżowy układ rowków – **Rys. 3, 4a**,
b) odcinkowo-spiralny układ rowków – **Rys. 4b**,
c) układ mikrozasobników – **Rys. 5**.



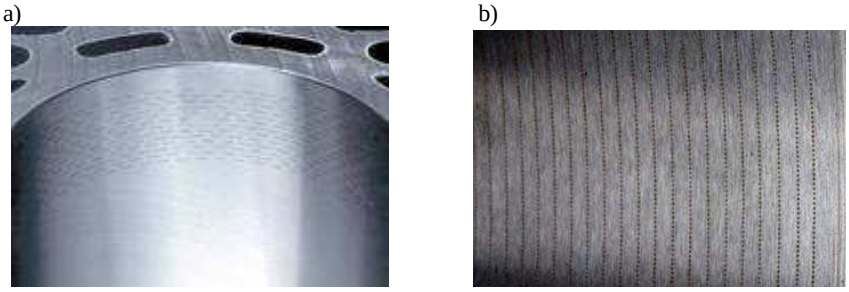
Rys. 3. Profilogram powierzchni po procesie honowania laserowego z krzyżowymi wgłębieniami [L. 9]
Fig. 3. Profilogram of surface after laser honing process with cruciform [L. 9]

a) b)



Rys. 4. Struktura powierzchni po honowaniu laserowym; a) krzyżowa, b) odcinkowo-spiralna [L. 9]
Fig. 4. Structure of surface after laser honing; a) cruciform, b) section-spiral **[L. 9]**

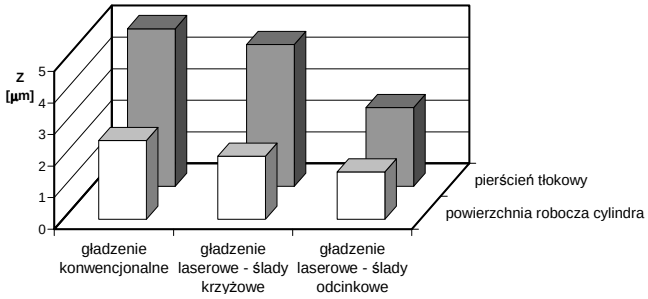
a) b)



Rys. 5. Gładź cylindra z mikrozasobnikami; a – wg firmy GEHRING [L. 10], b – zaprezentowana w pracy [L. 7]
Fig. 5. Cylinder bearing surface with microbunkers; a – acc. to firm GEHRING **[L. 10]**, b – presented in operation **[L. 7]**

Honowanie laserowe umożliwia uzyskanie powtarzalnego profilu chropowatości o założonych parametrach. Badania testowe wykazały, że zdecydowanie zmniejsza ono zużycie pierścieni tłokowych i cylindrów – **Rys. 6**. Właściwości tribologiczne ukształtowanych tą metodą gładzi cylindrów ocenia się najczęściej podczas prób stanowiskowych lub eksploatacyjnych silników. Oce-

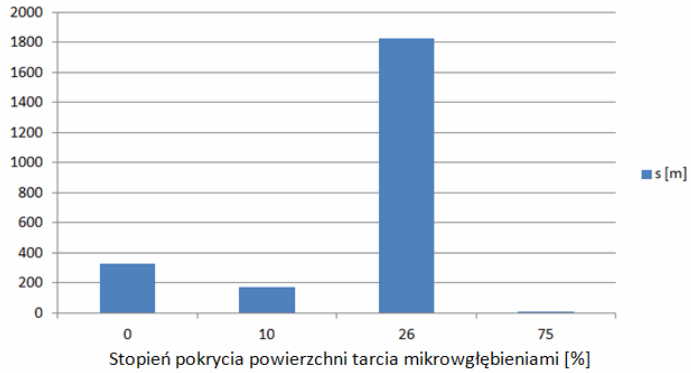
na ilościowa dotyczy głównie wpływu tej obróbki na intensywność zużywania z jednoczesnym odnotowaniem braku oznak zacierania.



Rys. 6. Zużycie pierścieni tłokowych i powierzchni roboczej cylindra po 330 godzinach pracy dla różnych odmian honowania [L. 9]

Fig. 6. Wear of piston rings and cylinder working surface after 330 hours of operation for different honing kinds **[L. 9]**

Według autorów pracy **[L. 8]** stosowanie mikrowgłębień zwiększa grubość filmu olejowego. W czasie przejścia pierścieni przez obszar z mikrowgłębieniami następuje ściskanie w nich oleju i wytworzenie dodatkowego ciśnienia, dzięki czemu zwiększa się grubość filmu hydrodynamicznego. To powoduje, że zmniejsza się skłonność do zacierania i zużycia układu tłok–pierścienie–cylinder.



Rys. 7. Wpływ stopnia pokrycia powierzchni mikrowgłębieniami na drogę do zatarcia skojarzenia [L. 11]

Fig. 7. Influence of surface micro-cavities occurrence degree on way to pair seizure **[L. 11]**

Z badań autorów wielu prac, m.in. **[L. 11, 12]** wynika, że z punktu widzenia odporności na zacieranie duże znaczenie ma stopień pokrycia mikrowgłębieniami powierzchni tarcia **(Rys. 7)** jak również ich wymiary **(Rys. 8)**.

Tozaki i współautorzy **[L. 12]** badali wpływ wielkości rowków prostopadłych do kierunku tarcia na odporność na zacieranie. Rowki wykonano na pła-

skiej powierzchni wycinków pierścienia ze stali stopowej. Współpracowały one z płaską powierzchnią stalowej tarczy (V = 0,3 m/s). Skojarzenie smarowano olejem mineralnym bez dodatków. Wyniki badań przytoczone na **Rys. 8** świadczą o tym, że przerywanie styku tarciowego przez poprzeczne mikrorowki pozwala znacząco (nawet kilkunastokrotnie) zwiększyć odporność na zacieranie, pod warunkiem, że mają one odpowiednie wymiary. Warto też zwrócić uwagę, że wspomniani autorzy uzyskali ponadczterokrotnie większą wartość obciążenia zacierania dla powierzchni bardziej chropowatej (Ra = 4 µm) w porównaniu z powierzchnią o mniejszej chropowatości (Ra = 0,4 µm). Jednak mikrogeometrię powierzchni trących się elementów kształtuje się nie tylko ze względu na odporność na zacieranie, ale również ze względu na odporność na zużycie i inne wymagania.

Parametr	Powierzchnia płaska R_z = 0,4 µm	Duże rowki R_z = 0,4 µm a = 0,6 mm b = 0,3 mm c = 0,5 mm	Małe rowki R_z = 0,4 µm a = 0,06 mm b = 0,03 mm c = 0,005 mm	Małe i duże rowki R_z = 0,4 µm	Powierzchnia płaska R_z = 4,0 µm	Duże rowki R_z = 4,0 µm a = 0,6 mm b = 0,3 mm c = 0,5 mm
Obciążenie zacierania [N]	588	274	2000	9760	2530	2940
Nacisk jednostkowy na występach [MPa]	5	3,4	25	188	21	37
Temperatura powierzchni bezpośrednio przed zacieraniem	67	95	109	162	235	230
Współczynnik tarcia bezpośrednio przed zacieraniem	0,13	0,17	0,13	0,13	0,095	0,145

a – szerokość występu, b – szerokość rowka, c – głębokość rowka.

Rys. 8. Wpływ wymiarów mikrorowków prostopadłych do kierunku tarcia na zacieranie [L. 12]

Fig. 8. Influence of dimensions of micro- grooves perpendicular to friction direction on seizing **[L. 12]**

Warstwę wierzchnią z mikrowgłębieniami można również uzyskać w wyniku trawienia chemicznego lub elektrochemicznego. Interesujący sposób kształtowania gładzi cylindra wykonanego ze stopu aluminium zawierającego kryształy krzemu o wymiarach 20÷50 µm przedstawiono w pracy **[L. 8]**. Po honowaniu cylindry poddaje się trawieniu elektrochemicznemu, po którym uzyskuje się powierzchnię nośną utworzoną z kryształów krzemu wystających około 0,7÷1,5 µm z metalicznego podłoża. Między kryształami krzemu, których powierzchnia stanowi około 80% powierzchni gładzi cylindra, są wgłębienia stanowiące zasobniki oleju smarowego.

Zastosowanie mikrowgłębień do optymalizacji warunków tarcia różnych węzłów jest obecnie przedmiotem wielu badań. W pracy **[L. 13]** badano charakterystykę tarcia łożyska z wgłębieniami wytworzonymi mechanicznie lub przez trawienie chemiczne Wykazano, że optymalizacja wymiarów tych wgłębień, zwłaszcza kształtu i głębokości, ma istotny wpływ na poprawę warunków tarcia. Dotyczy to w szczególności przypadku smarowania olejem o małej lepkości.

W większości przypadków mikrowgłębienia są traktowane jako zasobniki smaru w postaci oleju. Autorka pracy **[L. 14]** zaprezentowała inne podejście. Badała m.in. wpływ ukształtowania sieci mikrowgłębień na skuteczność smarowania smarem stałym (grafenopodobne nanocząstki MoS_2).

Obróbki wytwarzające warstwę wierzchnią o dodatnim gradiencie wytrzymałości na ścinanie

Jeden z ważniejszych postulatów, który powinna spełniać warstwa wierzchnia dotyczy dodatniego gradientu wytrzymałości na ścinanie w funkcji jej grubości.

W odniesieniu do elementów stalowych i żeliwnych węzłów ślizgowych postulat ten może zostać zrealizowany przez modyfikację ich składu chemicznego w strefie przypowierzchniowej lub przez nałożenie warstewki z obcego materiału.

W pierwszym przypadku w wyniku obróbki chemicznej lub cieplno-chemicznej zostaje wytworzona warstewka tlenków, fosforanów lub siarczków żelaza. Proces tworzenia tych warstewek przebiega z bezpośrednim udziałem metalowego podłoża, a elementy ich struktury przenikają w głąb metalu, dzięki czemu uzyskuje się dobre ich związanie.

Ważne miejsce w konstytuowaniu warstwy wierzchniej o dodatnim gradiencie wytrzymałości na ścinanie zajmują warstewki z miękkich metali, takich jak np.: Pb, Sn, Cd, In, Ag, Au, Cu i ich stopy Pb–Sn, Pb–Sn–Sb, Pb–Sn–Cu, Pb–In. Dosyć szerokiemu ich stosowaniu sprzyja technologiczność nakładania umożliwiająca uzyskiwanie równomiernej grubości z wymaganą dokładnością. Warstewki metaliczne mogą być wytwarzane różnymi metodami: galwaniczną, zanurzeniową, przez napylanie próżniowe, nacieranie itd. Ich zdolność do przeciwdziałania zacieraniu zależy od wielu czynników. Najważniejsze z nich to:

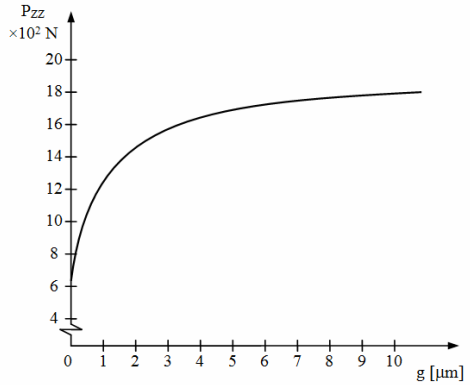
a) grubość warstewki,
b) rodzaj (materiał) warstewki,
c) twardość podłoża.

Pierwsze badania tarcia ciał stałych z miękkimi warstewkami metalicznymi, które przypisuje się F. Bowdenowi wykazały, że bezwzględne wartości współczynnika tarcia nie są stałe i zależą między innymi od grubości warstew-

ki. Współczynnik ten przyjmuje wartość minimalną, jeśli grubość warstewki mieści się w określonym przedziale (0,1÷1 μm).

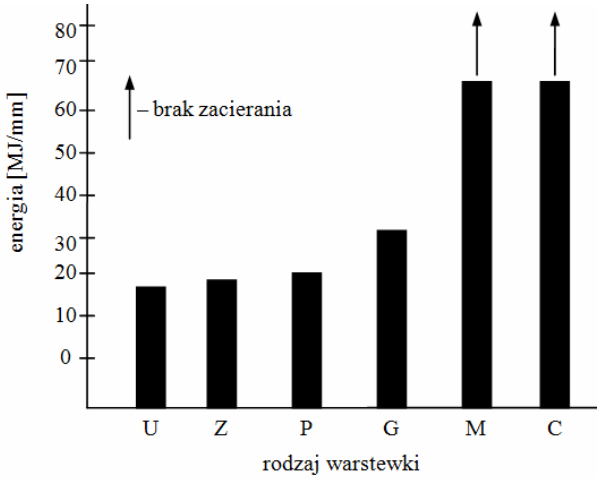
Zdaniem autorów monografii **[L. 15]** miękkie warstewki metaliczne zaczynają przejawiać swoje działanie przeciwzatarciowe, jeśli ich grubość wynosi co najmniej 0,1÷0,2 μm. Ich optymalna grubość zależy przede wszystkim od ich rodzaju i wynosi od kilku do kilkunastu mikrometrów **[L. 5]**.

Suh i współautorzy **[L. 16]** uzależniają grubość warstewki miękkiego metalu od mechanizmu zużywania. Na podstawie teorii zużywania odwarstwiającego stwierdzili oni, że grubość warstewki miękkiego metalu powinna być mniejsza od pewnej wartości krytycznej, ponieważ wtedy utrudnione jest gromadzenie się dyslokacji w warstewce i oddzielanie cząstek zużycia. Stal AISI 1018 pokryta warstewką kadmu o grubości 0,1 μm wykazała trzykrotnie mniejsze zużycie podczas próby prowadzonej w atmosferze obojętnej. Natomiast z badań opisanych w publikacji **[L. 17]** wynika, że optymalna ze względu na odporność na zacieranie grubość warstewki Pb i Sn powinna wynosić 12 μm, a warstewki Pb–Sn–Cu – 16 μm. W celu zwiększenia odporności na zacieranie kół zębatych Terauchi i jego zespół **[L. 18]** nakładali na nie między innymi warstewkę Zn i Cu o grubości 10 μm. Z **Rys. 9** wynika, że w przypadku warstewki miedzi osadzonej galwanicznie odporność na zacieranie adhezyjne zimne zmienia się nieznacznie dla grubości powyżej 3 μm.



Rys. 9. Zależność obciążenia zacierania zimnego (P_{ZZ}) od grubości (g) warstewki miedzi osadzonej galwanicznie na próbkach ze stali 45 o twardości 400 HB [L. 5]

Fig. 9. Dependence of cold seizing load (P_{ZZ}) on thickness (g) of copper layer galvanic deposited on samples of steel of hardness 400 HB **[L. 5]**



Rys. 10. Odporność na zacieranie kół zębatych nawęglanych i hartowanych (720 HV) w zależności od rodzaju warstewki (o grubości ok. 10 µm) [L. 19]; Z – cynkowa, P – fosforanowa, G – grafitowa, M – MoS_2, C – miedziana, U – bez warstewki

Fig. 10. Seizure resistance of toothed wheels being carburized and hardened (720 HV) depending on layer kind (of thickness ab. 10 µm) **[L. 19]**; Z – zinc, P – phosphate, G – graphite, M – MoS_2, C – copper, U – no layer

Jak widać, istnieją istotne różnice co do optymalnej grubości warstewek z miękkich metali nakładanych w celu zwiększenia odporności na zacieranie. Na **Rys. 10** przedstawiono odporność na zacieranie kół zębatych, na których wytworzono różnego rodzaju warstewki. Każda z tych warstewek, spełniając postulat dodatniego gradientu wytrzymałości na ścinanie, zwiększyła odporność na zacieranie, chociaż w różnym stopniu.

Obróbki kształtujące twardość warstwy wierzchniej (bez zmiany składu chemicznego)

Jeden z ważniejszych postulatów wyprowadzonych z kinetycznego modelu zacierania dotyczy twardości warstwy wierzchniej. Związek twardości z zacieraniem adhezyjnym przejawia się w podatności warstwy wierzchniej na:

– aktywację strukturalną wskutek odkształcenia plastycznego,
– oddzielanie warstewek powierzchniowych.

Tak więc utwardzenie warstwy wierzchniej powinno uczynić ją odporniejszą na zacieranie. Zakładając, że kształtowanie twardości stali lub żeliwa odbywa się bez zmiany ich składu chemicznego, to może być ono zrealizowane metodami obróbki cieplnej i nagniatania naporowego.

Badania dotyczące wpływu twardości stali i żeliwa ukształtowanej przez obróbkę cieplną na ich odporność na zacieranie prowadzone są od dawna. W świetle publikowanych wyników badań eksperymentalnych trudno jest ustalić jednoznaczną relację w tym względzie. Na podstawie wyników badań wielu

autorów, przeanalizowanych w pracy **[L. 5]**, można sformułować konkluzję, że zwiększanie twardości stali węglowej metodą obróbki cieplnej zwiększa jej odporność na zacieranie zimne. Nie wywiera natomiast wpływu na odporność na zacieranie gorące, gdyż w tym przypadku generowane przez tarcie ciepło inicjuje w stali przemiany strukturalne, które niwelują korzystny wpływ obróbki cieplnej.

Nagniatanie naporowe jest również tym sposobem obróbki, który pozwala utwardzać warstwę wierzchnią bez zmiany składu chemicznego materiału. Zgodnie z I prawem termodynamiki energia wydatkowana na odkształcenie plastyczne w metalu w części zamieniana jest na ciepło, a częściowo jest w nim akumulowana. A więc metal, na skutek odkształcenia plastycznego na zimno, uzyskuje pewien przyrost energii ponad energię odpowiadającą stanowi równowagi. Energia zakumulowana w metalu stanowi siłę napędową między innymi zjawisk zachodzących na powierzchni odkształconego metalu. Skutkiem podwyższenia stanu energetycznego metalu przez zgniot jest m.in. zwiększona aktywność chemiczna warstwy wierzchniej **[L. 20]**. Wpływ na odporność na zacieranie zimne twardości stali ukształtowanej wskutek zgniotu zależy od sposobu oddziaływania substancji smarującej z powierzchnią metalu podczas tarcia. W przypadku stosowania smarów bez dodatków uszlachetniających odporność ta zmniejsza się; w przypadku obecności tych dodatków – wzrasta.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych modeli, zwłaszcza modelu kinetycznego, można sformułować ogólne przesłanki, ważne z punktu widzenia kształtowania odporności na zacieranie. Jednak żaden z tych modeli oddzielnie ani wszystkie razem nie dają możliwości zestawienia pełnego zbioru zaleceń dotyczących kształtowania odporności na zacieranie skojarzeń ślizgowych. W oparciu o te modele nie można m.in. odpowiedzieć na ważne pytanie: Czy obróbce powierzchniowej należy poddać jeden czy obydwa trące się elementy? Jeśli tylko jeden, to który? Ten problem podjął w swoich badaniach Michalczewski **[L. 21, 22]**. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalił on, że powłoka przeciwzatarciowa powinna być wytworzona tylko na jednym elemencie, tym o większej powierzchni tarcia.

LITERATURA

1. Nosal S., Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
2. Kosteckij B.I., O roli vtorichnykh struktur v formirovanii mekhnizmov trenija smazochnogo dejstvija i iznashivanija. Trenie i iznos, 1980, nr 4, s. 622–637.

3. Poverkhnostnaja prochnost‘ materialov pri trenii, red. B.I. Kosteckij, Tekhnika, Kiev 1976.
4. Kragelskij I.V., Trenie i iznos, Mashinostroenie, Moskva 1968.
5. Nosal S., Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych, Rozprawy nr 328, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
6. Wojciech Napadłek W., Analiza możliwości wykorzystania mikroobróbki laserowej w procesie kształtowania topografii warstwy wierzchniej stalowych tulei cylindrowych azotowanych jarzeniowo, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 13, No. 4, 2006.
7. Bogdanowicz Z., Marczak J., Napadłek W, Rycyk A., Mikrozasobniki olejowe – metoda laserowego drążenia oraz próby aplikacji, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 14, No. 2, 2007.
8. Kurzyna Z., Lejda K., Woś P., Przegląd metod kształtowania topografii powierzchni gładzi cylindrów silników spalinowych, [in:] Visnik Nacionalnogo Transportnogo Universitetu na Transportnoj Akademii Ukraini, 2012, 16–21.
9. Klink U., Laserhonen für Zylinderlaufbahnen, MTZ Motortechnische Zeitschrift, 1997, nr 9.
10. www.gehring.de (dostęp 05.2015).
11. Koszela W., Gałda L., Dzierwa A., Pawlus P., Sęp., Wpływ kieszeni smarowych na zatarcie pary ciernej stal–brąz, Tribologia, 2009, nr 3, s. 51–58.
12. Tozaki Yasyoshi i in., The effect of surface grooves on the interface temperature and scoring limit under boundary lubrication, in: Proc. Jap. Int. Tribol. Conf., Nagoya 1990, s. 475–480.
13. Lu X., Khonsari M.M., An experimental investigation of Dimple Effect on the stribeck curve of journal bearings, Tribology Letters 2007, 27, s. 169–176.
14. Wiśniewska-Weinert H.M., Kompozyty z siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi, Open Access Library, 2012, 9(15).
15. Kragelskij I.V., Ljubarskij I.M. i in., Trenie i iznos v vakume, Mashinostroenie, Moskva 1973.
16. Jahanmir S., Suh N.P., Abrahamson E.P., The delamination theory of wear and the wear of composite surface, Wear, 1975, 32, 1.
17. Jia-Jun Liu, Xian-Hua Zhang, Bao-Ling Zhu: The effect of a soft metal-lic plated layer on the tribological behavior of steels under boundary lu-brication, Tribol. Trans., 1991, nr 1(34), s.17–22.
18. Terauchi Y., Kohno M., Nadano H., Nakamoto Y., Scoring resistance of spur gears various coatings, Bull. JSME, 1986, nr 247, s. 235–240.
19. Terauchi Y., Kohno M., Nadano H., Nakamoto Y., Scoring resistance of spur gears various coatings, Bull. JSME, 1986, nr 247, s. 235–240.
20. Wojciechowski Ł., Zmiana aktywności chemicznej warstwy wierzchniej stali 45 wskutek nagniatania naporowego. Tribologia 2007, nr 3, s. 401–410.
21. Michalczewski R., Wpływ konfiguracji materiałowej na odporność na zacieranie smarowanych skojarzeń z elementami pokrytymi powłoką niskotarciową. Tribologia 2009, nr 2, s. 93–106.
22. Michalczewski R., Przebieg procesu zacierania smarowanych wysoko obciążonych skojarzeń ciernych z elementami pokrytymi powłoką WC/C. Tribologia 2011, nr 3, s. 81–104.

Summary

Seizing is a tribological destructive process that is inadmissible. This work analyses selected adhesive seizing models (of Kostecki, Blok and kinetic) in the aspect of formulating the premises concerning the forming on their base the resistance to this kind of damage. It was found that, based on Kostecki's model, the resistance to (cold and hot) seizing can be defined. Blok's model refers to hot seizing and creates premises for planning associations causing the balance of generated and dissipated heat. Seizing is usually treated as occurring suddenly, which makes determining the demands concerning the counteraction difficult. In case of the kinetic model, it was assumed that seizing is not sudden but occurring in stages, enabling the determination of such demands. Based on this assumption, the anti-seizing effectiveness of machining was analysed: increasing the oil surface capacity and meeting the demand of stopping the frictional contact, producing a surface layer of a positive resistance gradient to cutting, and forming the hardness of the surface layer (without the change of the chemical composition).