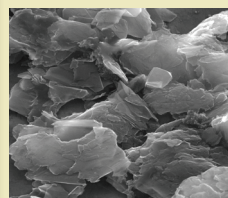
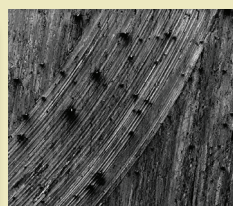
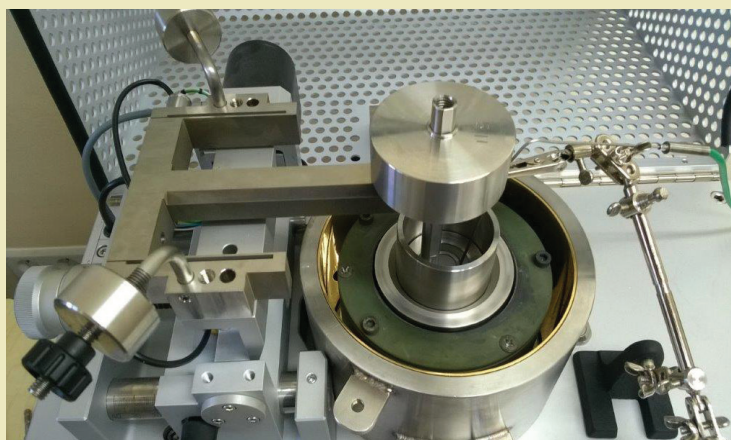




Tribologia

*redakcja
Pasieczko Mychajło
Myroslav Kindrachuk*



MONOGRAFIE

Tribologia

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Podstaw Techniki
ul. Nadbystrzycka 38
20-618 LUBLIN

Tribologia

redakcja
Pasieczko Mychajło
Myroslav Kindrachuk



Politechnika Lubelska
Lublin 2017

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Antoni Świć, Politechnika Lubelska

Autorzy:

Mychajło Pasieczko

Myroslav Kindrachuk

Vasyl Labunets

Krzysztof Dziedzic

Oleh Radko

Yevhen Korbut

Redakcja techniczna: Marcin Barszcz, Krzysztof Dziedzic

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2017

ISBN: 978-83-7947-293-2

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

WSTĘP	9
PODSTAWOWE POJĘCIA TRIBOLOGII.....	11
ROZDZIAŁ I. POWIERZCHNIA CIAŁ STAŁYCH	17
1.1. Powierzchnia idealna i rzeczywista ciała stałego	17
1.2. Energia powierzchniowa	22
1.3. Oddziaływanie pomiędzy powierzchnią ciała stałego a środowiskiem.....	22
1.3.1. Adhezyjne oddziaływanie warstw wierzchnich	22
1.3.2. Adsorpcja i chemisorpcja	24
1.3.3. Oddziaływanie metalu z tlenem	29
1.4. Powierzchnia części maszyn i jej budowa geometryczna	31
1.4.1. Falistość i chropowatość powierzchni ciał stałych.....	38
1.4.2. Właściwości fizyko-chemiczno-mechaniczne warstw powierzchniowych i występujące w nich naprężenia	40
1.4.3. Deformacja metali	40
1.4.4. Naprężenia szczątkowe	43
Literatura	44
ROZDZIAŁ II. MODELOWANIE PROCESÓW TRIBOLOGICZNYCH	46
2.1. Modele warstwy granicznej.....	46
2.2. Modelowanie innych rodzajów tarcia	59
Literatura	66
ROZDZIAŁ III. PODSTAWOWE RODZAJE TARCIA W WĘZŁACH MASZYN.....	67
3.1. Tarcie bez materiału smarowego.....	67
3.2. Tarcie graniczne	68
3.3. Smarowanie płynne, lepko-plastyczne i kontaktowo-hydrodynamiczne	74
3.4. Tarcie przy smarowaniu mieszanym	79
3.5. Tarcie ślizgowe.....	80
3.6. Tarcie toczne	82
Literatura	84

ROZDZIAŁ IV. GŁÓWNE RODZAJE PROCESU ZUŻYCIA.....	85
4.1. Zużycie mechaniczno-chemiczne.....	85
4.2. Zużycie ściernie	90
4.2.1. Pojęcia ogólne	90
4.2.2. Ścierniwa i warunki zużycia ściernego	92
4.2.3. Zużycie powierzchni twardymi ziarnami	94
4.2.4. Zużycie cząsteczkami ściernymi w strumieniu cieczy lub gazu.....	96
4.2.5. Wpływ wilgotności i agresywności środowiska na zużycie ściernie	97
4.2.6. Zużycie ściernie w korozyjno-aktywnych środowiskach....	99
4.3. Zużycie korozyjno-mechaniczne.....	104
4.4. Zużycie erozyjne	111
4.5. Zużycie kawitacyjne	113
4.5.1. Kawitacja hydrodynamiczna	113
4.5.2. Kawitacja wibracyjna	116
4.6. Zużycie kawitacyjno-erozyjne	117
4.7. Zużycie adhezyjne	120
4.8. Zużycie zmęczeniowe	124
4.8.1. Wiadomości ogólne o zużyciu zmęczeniowym	124
4.8.2. Teoria zużycia zmęczeniowego oraz jego mechanizm zużycia	125
4.9. Zużycie wodorowe	126
4.9.1. Istota i definicja zużycia wodorowego	126
4.9.2. Warunki występowania zużycia wodorowego	128
4.9.3. Wpływ wodoru na wytrzymałość oraz kruchość wodorowa.....	129
4.9.4. Rodzaje zużycia wodorowego	131
4.10. Zużycie fretting-korozyjne	134
4.10.1. Wiadomości ogólne	134
4.10.2. Reguły fretting-korozji	138
4.10.3. Metody ograniczające fretting-korozję	141
Literatura	142
ROZDZIAŁ V. WĘZŁY TARCIA.....	144
5.1. Łożyska toczne	144
5.2. Łożyska ślizgowe	145
5.3. Przekładnie zębate	146
5.4. Przekładnie bezstopniowe cierne	148
5.5. Połączenia zębate (wielowypustowe).....	150

5.6. Przekładnia śruba-nakrętka	151
5.7. Mechanizmy krzywkowe.....	151
5.8. Elementy grupy cylindrowo-tłokowe	153
5.9. Urządzenia uszczelniające.....	153
Literatura	154

ROZDZIAŁ VI. URZĄDZENIA STOSOWANE DO BADANIA

PROCESU TARCIA I ZUŻYCIA

ORAZ OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

TRIBOLOGICZNYCH

6.1. Klasyczne urządzenia do badania właściwości tribologicznych.....	155
6.2. Ocena właściwości tribologicznych oraz stanu powierzchni stali narzędziowej do pracy na gorąco 55NiCrMoV6	164
Literatura	172

WSTĘP

Tarcie jest jednym z najpowszechniejszych zjawisk fizycznych w przyrodzie i jednym z głównych procesów występujących w elementach ruchomych. Proces tarcia w maszynach może mieć znaczenie negatywne lub pozytywne. Jest ono zjawiskiem niezbędnym w sprzęgłach ciernych bądź w hamulcach, lecz w większości przypadków jest zjawiskiem negatywnym. Aby móc skutecznie ograniczyć opory tarcia w urządzeniach, należy przede wszystkim poznać zjawiska zachodzące podczas tarcia. Tarcie występuje bardzo powszechnie zarówno w przyrodzie jak i technice. Jest jednym z głównych procesów zachodzących w maszynach.

Procesom tarcia zachodzącym w obrębie układów tribomechanicznych towarzyszą straty energetyczne oraz straty wywołane zużyciem. Zachodzące zużycie powoduje najczęściej konieczność wymiany elementów, zespołów lub całych maszyn. Badania nad procesami tarcia i wdrożenie ich wyników ma duże znaczenie dla poprawy bilansu ekonomicznego i energetycznego przedsiębiorstw wykorzystujących maszyny w procesie produkcyjnym. Prowadzenie badań odporności materiałów na zużycie pozwala konstruktorom w lepszym stopniu przewidzieć zachowanie i trwałość elementów w środowisku pracy. Stanowią one podstawowe narzędzie podczas projektowania elementów części maszyn i urządzeń, tworzenia ich kombinacji, aby w jak najskuteczniejszym stopniu spełniały stawiane im wymagania, zarówno technologiczne, jak i eksploatacyjne.

Rozwój współczesnego przemysłu uwarunkowany jest opracowywaniem nowych innowacyjnych technologii pozwalających zwiększyć wydajność produkcji przy jednoczesnej minimalizacji jej kosztów. Szczególnego znaczenia nabierają problemy związane z niezawodnością maszyn przy jednoczesnym oszczędnym wykorzystaniu materiałów do ich wykonania. Współczesna produkcja stawia wysokie wymagania w tym zakresie. Sama maszyna jest obiektem technicznym najczęściej o złożonej strukturze, której zadaniem jest realizacja określonych funkcji użytkowych. W trakcie jej eksploatacji zachodzi starzenie się poszczególnych elementów w efekcie nieodwracalnych procesów fizycznych i chemicznych. Jednym z najbardziej niepożądanych skutków jest postępujące zużycie spowodowane tarciem. Najczęstszym rozwiązaniem tego problemu jest wzmocnienie roboczych powierzchni elementów maszyn pracujących tarciovo. Efektem tego są nowe materiały i warstwy powierzchniowe odporne na zużycie oraz technologie ich wytwarzania. Zagadnienia te dotyczą bardzo często tylko warstw wierzchnich materiałów. Otrzymywanie na roboczych powierzchniach powłok z określonymi właściwościami przeciwozużyciowymi jest uzasadnione względami użytkowymi i ekonomicznymi.

W zmniejszeniu zużycia spowodowanego tarciem istotne znaczenie mają warstwy wierzchnie par trących otrzymywane zarówno w procesie technologicznym jak i kształtowane w czasie eksploatacji. Aktualny stan wiedzy wskazuje, że na

przebieg tarcia i zużycia elementów maszyn duży wpływ wywierają czynniki związane z otoczeniem (np. wilgotność, rodzaj medium otaczającego, temperatura). Przy pewnej krytycznej wartości tych wielkości osiągnięta zostaje energia aktywacji, powodująca przemiany fazowe i strukturalne w warstwach powierzchniowych. Powstaje eksploatacyjna warstwa wierzchnia. Kształtowanie określonego strukturalno-fazowego stanu eksploatacyjnej warstwy wierzchniej pozwala zmniejszyć intensywność jej zużycia. Według obecnego stanu wiedzy formowanie cienkich struktur wtórnych w warunkach zużycia ciernego wpływa na właściwości tribologiczne. Interpretacje wyników badań utrudnia złożony charakter procesów zachodzących w strefie tarcia. Struktury wtórne są to najczęściej związki chemiczne tlenu o niestechiometrycznym składzie. Podczas tarcia są niszczone, a następnie odnawiają się.

Obecnie problem niezawodności maszyn często jest rozpatrywany w skali mikro lub nano. Zwraca się uwagę na elementarne procesy zachodzące na powierzchni tarcia w parach trących. Wymaga to jednak interdyscyplinarnego podejścia do prowadzonych badań. Zastosowanie współczesnych metod badań powierzchni (głównie mikroskopii i spektroskopii) umożliwia identyfikację oraz nowe spojrzenie na procesy fizyko-chemiczne zachodzące na powierzchni par trących.

PODSTAWOWE POJĘCIA TRIBOLOGII

<i>Antyfrukcyjność</i>	jakościowa charakterystyka właściwości materiałów ciernych, zapewniająca normalną pracę w warunkach tarcia.
<i>Dodatki</i>	to substancje dodawane w niewielkich ilościach do smarów i specjalnych płynów w celu nadania im nowych właściwości lub zmiany istniejących.
<i>Dotarcie</i>	proces zmiany chropowatości powierzchni tarcia oraz fizycznych i mechanicznych właściwości warstw powierzchniowych materiału w początkowym okresie tarcia, które zwykle zachodzą w stałych warunkach zewnętrznych w celu zmniejszenia tarcia i intensywności zużycia.
<i>Droga tarcia</i>	jest to droga od początku przesunięcia do całkowitego zatrzymania współpracujących elementów.
<i>Gradient właściwości mechanicznych</i>	jest to wektor charakteryzujący zmianę właściwości mechanicznych elementu pary tarcia względem normalnej do powierzchni tarcia.
<i>Intensywność zużycia</i>	jest stosunkiem wartości zużycia do przedziału czasu, podczas którego powstało zużycie.
<i>Intensywność zużycia</i>	stosunek zużycia do określonej drogi, w której nastąpiło zużycie, lub do ilości wykonywanej pracy.
<i>Klinowanie</i>	proces wystąpienia i rozwoju uszkodzenia powierzchni tarcia spowodowany adhezją i przenoszeniem materiału.
<i>Kompatybilność</i>	zdolność dwóch lub większej liczby materiałów do wykonywania wspólnych funkcji.
<i>Materiał smarowy</i>	jest to materiał, który wprowadza się na powierzchnię tarcia w celu zmniejszenia siły tarcia i (albo) intensywności zużycia.
<i>Materiały antyfrukcyjne</i>	materiały na pary trące wykorzystywane do pracy w węzłach nośnych lub prowadzących (łożyskach ślizgowych), których współczynnik tarcia wynosi 0,001–0,05 w obecności smarowania i 0,004–0,5 przy jego braku.
<i>Materiały tarciove</i>	materiały przeznaczone lub stosowane do pracy w węzłach, które pochłaniają lub rozpraszają energię kinetyczną (hamulce, sprzęgła, dławiki).

Modelowanie	badanie obiektu modelującego, opartego na jego podobieństwie do obiektu rzeczywistego i jego konstrukcji, co przewiduje jego badanie i przenoszenie otrzymanych informacji na obiekt modelujący.
Największa siła tarcia statycznego	siła tarcia spoczynkowego, przy nieznacznym przekroczeniu, której następuje powstanie ruchu.
Obciążenie jednostkowe	nacisk, równy stosunkowi normalnego obciążenia elementu (siły) do nominalnego obszaru styku, na który działa.
Oddziaływanie adhezyjne (przy tarcu)	powstanie wiązania w procesie tarcia między warstwami na powierzchniach styku z wyraźnie określoną granicą ciał stycznych.
Odporność na zużycie	zdolność materiału do odporności na zużycie w pewnych warunkach tarcia, oszacowana według wielkości, odwrotnej prędkości zużycia lub intensywności zużycia.
Podwójny (dualny) charakter tarcia	teoria tarcia, która rozważa tarcie i zużycie jako objętościowe odkształcenie materiału i wyeliminowanie wiązań międzymolekularnych (miejsc szczepiania), które występują między sąsiednimi obszarami powierzchni tarcia.
Połączenie adhezyjne	miejscowe połączenie dwóch ciał stałych w wyniku przyczepności, które występuje podczas tarcia.
Powierzchnia tarcia	jest powierzchnią ciał, które biorą udział w procesie tarcia. Charakteryzuje się makrogeometrycznymi, mikrogeometrycznymi, fizycznymi, mechanicznymi, chemicznymi i innymi właściwościami.
Praca tarcia	to energia przekazywana przez system termodynamiczny (parę tarcia) do środowiska zewnętrznego i materiałów elementów pary trącej podczas zmiany parametrów zewnętrznych systemu.
Prędkość poślizgu	różnica prędkości ciał w punktach zetknięcia podczas ślizgania.
Produkty zużycia	cząstki materiału oddzielone w procesie zużycia.
Przeciwpróbka	element pary tarcia, który współpracuje z materiałem tarcia (próbką).
Siła tarcia	jest siłą oporu względnego przesunięcia jednego ciała po powierzchni innego pod wpływem siły zewnętrznej.

<i>Ślizganie</i>	ruch dwóch ciał względem siebie, podczas którego ich prędkości na odcinku powierzchni styku są inne według wartości lub kierunku.
<i>Smarowanie</i>	działanie (dostarczenie materiału smarnego do powierzchni tarcia) środka smarnego, który powoduje zmniejszenie siły tarcia i (lub) intensywności zużycia między dwiema powierzchniami.
<i>Struktury wtórne (przy tarcu)</i>	nowe fazy (obiekt cienkowarstwowy), które formują się podczas tarcia w wyniku oddziaływania warstw powierzchniowych ciał stałych, materiałów smarowych i środowiska gazowego.
<i>Tarcie graniczne</i>	tarcie dwóch ciał stałych w obecności warstwy cieczy na powierzchni tarcia o właściwościach różniących się od jej właściwości objętościowych.
<i>Tarcie płynne</i>	tarcie dwóch ciał stałych, oddzielonych warstwą cieczy, w której zachowują się jej właściwości objętościowe.
<i>Tarcie ruchowe</i>	tarcie dwóch ciał, które się wzajemnie przemieszczają.
<i>Tarcie spoczynkowe</i>	tarcie dwóch ciał przy mikroprzemieszczeniach przed przejściem do ruchu względnego.
<i>Tarcie suche</i>	tarcie dwóch ciał przy braku materiału smarnego na powierzchni tarcia.
<i>Tarcie toczne</i>	tarcie ruchowe dwóch ciał stałych, przy którym ich prędkości w punktach zetknięcia są takie same pod względem wielkości i kierunku.
<i>Tarcie wewnętrzne</i>	występuje podczas przemieszczenia części tego samego ciała, które jest związane z dwoma różnymi grupami zjawisk – niesprężystością i deformacją plastyczną.
<i>Tarcie z materiałem</i>	tarcie dwóch ciał przy obecności materiału smarnego wprowadzanego na powierzchnię tarcia.
<i>Tarcie zewnętrzne</i>	zjawisko oporu przeciw przesunięciu względnemu, które występuje pomiędzy dwoma ciałami w strefach oddziaływania powierzchni wraz z rozproszeniem energii.
<i>Teoria tarcia</i>	system przedstawienia podstawowych praw procesu tarcia (zużycia), oparty na jego idealizacji i określeniu wiodącego mechanizmu oddziaływania ciał kontaktujących.

<i>Triboanaliza</i>	rozdział tribologii obejmujący problemy gromadzenia i systematyzacji informacji naukowych na temat podstawowych procesów tarcia, mający na celu prognozowanie wyników oddziaływania kontaktowego ciał stałych w zadanych warunkach.
<i>Tribochemia</i>	bada oddziaływanie powierzchni stykających się z chemicznie aktywnym środowiskiem. Bada problem korozji przy tarcu, podstawy chemiczne selektywnego przenoszenia i oddziaływanie z powierzchnią elementów substancji chemicznie-aktywnych, które powstają w procesie tarcia w wyniku degradacji polimeru lub środka smarującego.
<i>Tribodiagnostyka</i>	zestaw metod i zasobów ciągłej kontroli i sterowania stanem charakterystyk tarciowo-zużyciowych elementów i węzłów tarcia. Najbardziej zaawansowane są: akustyczno-emisyjna, promieniotwórcza, elektrofizyczna, temperaturowa, wibroakustyczna, aerograficzna.
<i>Tribofizyka</i>	analizuje aspekty fizyczne oddziaływania powierzchni kontaktujących się przy ich wzajemnym przemieszczeniu.
<i>Tribologia</i>	nauka o procesach tarcia, zużycia i smarowania.
<i>Tribometr</i>	jest laboratoryjnym urządzeniem pomiarowym do badania wielkości charakteryzujące procesy tarcia, smarowania i zużycia.
<i>Tribometria</i>	obejmuje metody i narzędzia do pomiaru podstawowych parametrów oddziaływania ciernego: siły tarcia, zużycia, temperatury, odkształcenia itd. i jest podstawą wszystkich rodzajów badań eksperymentalnych (modelowych, laboratoryjnych i eksploatacyjnych) w tribologii.
<i>Tribomonitoring</i>	rozdział tribologii, który składa się z tribometrii i tribodiagnostyki.
<i>Tribosystem</i>	złożony system tribodynamiczny, powstały w wyniku współoddziaływania ciał tarcia, a także środowiska pośredniczącego i środowiska zewnętrznego.
<i>Tribotechnika</i>	nauka o oddziaływaniu kontaktowym ciał stałych przy ich ruchu względnym, która obejmuje problematykę tarcia, zużycia i smarowania maszyn. Dzieli się na: tribochemię, tribofizykę i tribomechanikę.

Tribotechnologia	część tribologii, która bada aspekty tribotechniczne tworzenia elementów, obróbki materiałów, uzyskania wymaganych właściwości powierzchni tarcia, węzłów i elementów, stosowania powłok funkcjonalnych, itd.
Uszkodzenie	naruszenie prawidłowego funkcjonowania obiektu lub jego części ze względu na wpływ czynników zewnętrznych, które przekraczają wielkości określone w dokumentacji.
Warstwa tlenkowa (na powierzchni tarcia)	warstwa składająca się głównie z tlenków metali, która formuje się podczas tarcia w wyniku oddziaływania metalu z tlenem pochodzącego z powietrza lub materiałem smarującym.
Warstwy graniczne (warstwy smarujące)	warstwy powstające w wyniku adsorpcji molekuł polarnych węglowodorów na powierzchni ciał stałych (metali) pod wpływem fazy stałej.
Współczynnik tarcia	jest stosunkiem siły tarcia do normalnej współrzędnej sił zewnętrznych działających na powierzchniach ciała.
Wydajność	stan obiektu, w którym jest on w stanie wykonać określone funkcje, zachowując wartości określonych parametrów w granicach ustalonych w dokumentacji normatywnej i technicznej.
Wzmocnienie deformacyjne	wzmacnianie materiału przez odkształcenie plastyczne przy jego obciążeniu powyżej granicy plastyczności.
Zadzior	uszkodzenie powierzchni tarcia w postaci szerokich i głębokich bruzd w kierunku poślizgu.
Zużycie	wynik zużycia w ustalonych jednostkach. Wartość zużycia może być wyrażona w jednostkach długości, objętości, masy itp.
Zużycie (powierzchni tarcia)	proces zużycia i odkształcenia powierzchni styku.
Zużycie wagowe	masa zużytej substancji ΔQ usuniętej z powierzchni o nominalnym polu styku A_a na jednostkę drogi tarcia L .
Zużycie	proces niszczenia i oddzielenia materiału z powierzchni ciała stałego i (albo) gromadzenia jego resztkowych deformacji przy tarcu, co przejawia się w stopniowej zmianie rozmiarów i (albo) kształtu ciała.

<i>Zużycie abrazyjne</i>	zużycie mechaniczne materiałów w wyniku cięcia, skrawania lub bruzdowania ciałami stałymi lub cząsteczkami, które znajdują się w stanie zamocowanym lub wolnym.
<i>Zużycie erozyjne</i>	(odmiana zużycia korozyjno-erozyjnego) to proces niszczenia warstwy wierzchniej elementów maszyn, polegający na powstawaniu ubytków materiału w wyniku oddziaływania cząstek ciał stałych, cieczy i gazów o dużej energii kinetycznej lub prądu elektrycznego.
<i>Zużycie hydroabrazyjne (gazowo-abrazyjne)</i>	zużycie wskutek działania ciał stałych lub cząstek przy ich przepływie w cieczy (gazie).
<i>Zużycie kawitacyjne</i>	zużycie mechaniczne podczas ruchu ciała stałego w stosunku do cieczy, w której pęcherzyki gazu zamykają się blisko powierzchni, powodując miejscowe wysokie ciśnienie uderzeniowe lub wysoką temperaturę.
<i>Zużycie kawitacyjno-erozyjne</i>	złożony proces korozyjno-mechaniczny, który jest efektem mikro-uderzeniowego wpływu cieczy na powierzchni elementów.
<i>Zużycie wodorowe</i>	jest procesem niszczenia metalowego elementu pary tarcia wskutek absorpcji wodoru.
<i>Zużycie zmęczeniaowe</i>	zużycie powierzchni tarcia lub jej obszarów w wyniku powtarzającego się odkształcenia mikroobjętości materiału, które prowadzi do pojawienia się pęknięć i oddzielenia cząstek materiału.

ROZDZIAŁ I. POWIERZCHNIA CIAŁ STAŁYCH

Natura powierzchni, jej skład chemiczny i struktura w dużym stopniu określają charakterystyki tribotechniczne par tarcia [1–11]. Potwierdzone jest to wieloma przykładami. Nawet częściowe pokrycie powierzchni ciała stałego monowarstwą atomów adsorbowanych lub molekuł znacząco wpływa na adhezję i tarcie. Natomiast 1% pierwiastka stopującego zawartego w materiale, przy jego dyfuzji do powierzchni może określić odporność na zużycie danego materiału. To samo można powiedzieć o dodatkach do materiałów smarnych, które oddziałując z powierzchnią ciał stałych, skutecznie chronią je przed różnymi rodzajami zużycia.

1.1. Powierzchnia idealna i rzeczywista ciała stałego

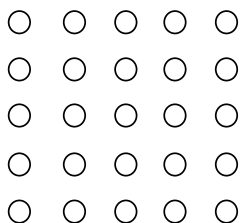
Ciało stałe składa się z atomów. Z kolei atomy składają się z neutronów, protonów i elektronów. Pomiędzy cząsteczkami, z których zbudowane jest ciało stałe, a mianowicie: atomami, molekułami, jonami – w stopniu o różnej intensywności występują oddziaływania, które determinują jego strukturę i właściwości.

Kiedy ciało znajduje się w bardzo niskich temperaturach, jego cząsteczki są zwykle umieszczone w formie poprawnych geometrycznie kształtów. Skoki termiczne nie naruszają tej lokalizacji, ponieważ siły przyciągania są większe niż energia skoków termicznych.

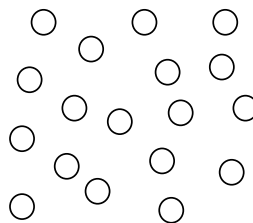
Istnieją dwie odmiany ciał stałych, które różnią się strukturą i własnościami – krystaliczne i amorficzne. Ciała krystaliczne pozostają stałymi, tzn. zachowują swoją formę do określonej temperatury, w której przechodzą do stanu ciekłego. Podczas chłodzenia proces zachodzi w przeciwnym kierunku. Przejście z jednego stanu do drugiego następuje w określonej temperaturze topnienia. Ciała amorficzne (bezpостaciowe) podczas nagrzewania mięknią w dużym zakresie temperatur, stają się plastyczne, a następnie przechodzą w stan płynny. Podczas chłodzenia proces zachodzi w kierunku przeciwnym.

Dla opisu budowy atomowo-krystalicznej używa się pojęcia sieci przestrzennych lub krystalicznych. Sieci krystaliczne reprezentują sobą sieć przestrzenną, w węzłach której znajdują się atomy (jony) tworzące ciało stałe krystaliczne i odpowiadające pojęciu idealnego ciała krystalicznego.

Ciała stałe charakteryzują się uporządkowanym rozmieszczeniem atomów w przestrzeni (rys. 1.1). Natomiast uporządkowanie ciał amorficznych jest chaotyczne (rys. 1.2). Stan krystaliczny ciała stałego jest bardziej stabilny niż amorficzny.



Rys. 1.1. Schemat idealnego krystalicznego ciała stałego

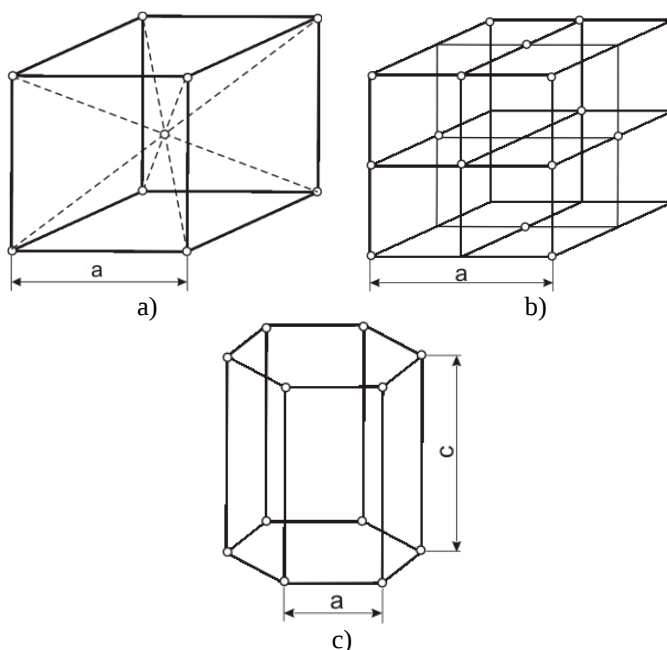


Rys. 1.2. Schemat amorficznego ciała stałego

Na rysunku 1.3 przedstawiono przykłady sieci krystalicznych. Pogrubionymi liniami przedstawiono najmniejszy równoległoscian, którego kolejnym przemieszczeniem w przestrzeni wzdłuż trzech osi można skonstruować wszystkie sieci lub kryształy.

Najmniejsza objętość kryształu, która daje wyobrażenie o strukturze atomowej metalu w całej objętości, nazywana jest elementarną komórką krystaliczną. Istnieje 230 rodzajów sieci krystalicznych, które są zebrane w 32 klasach.

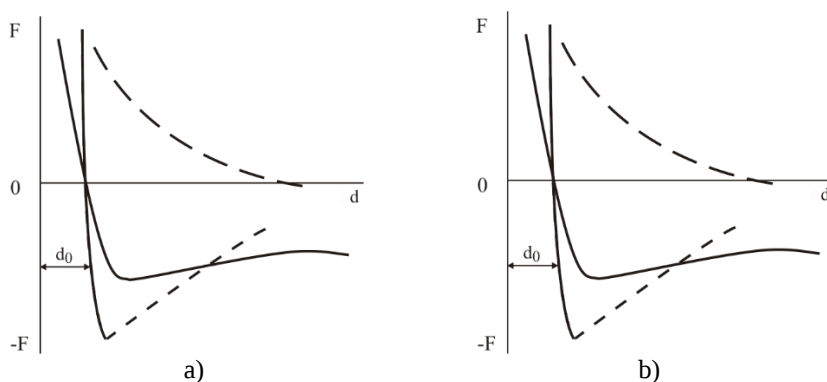
Najbardziej rozpowszechnionymi sieciami krystalicznymi są: regularna (objętościowo centrowana, ściennie centrowana), heksagonalna, tetragonalna, rombowa, romboedryczna, trójskośna, jednoskośna.



Rys. 1.3. Sieci krystaliczne: a) regularna przestrzenie centrowana; b) regularna ściennie centrowana; c) heksagonalna

Typ wiązania, który występuje pomiędzy cząsteczkami elementarnymi w kryształach jest określony przez strukturę elektronową atomów, które oddziałują między sobą. Cząsteczki elementarne w kryształach zbliżają się do określonej odległości, która zapewnia kryształowi najwyższą stabilność termodynamiczną. Odległość, do której zbliżają się cząsteczki zależy od oddziaływania sił, które działają w kryształach. Siły przyciągania występują w wyniku oddziaływania elektronów z dodatnio naładowanym jądrem własnego atomu oraz z dodatnio naładowanymi jądrami atomów sąsiadujących. Siły odpychające powstają wskutek oddziaływania jąder dodatnio naładowanych atomów sąsiadujących w przypadku, kiedy zbliżają się one do siebie.

Siły odpychające powstają przy silnym zbliżeniu atomów i rosną intensywniej, niż siły przyciągania (rys. 1.4). Zrównoważenie sił następuje wtedy, gdy cząsteczki elementarne są zbliżone do odległości d_0 . Zbliżeniu temu odpowiada minimum energii wiązania W , która powoduje, że kryształ staje się termodynamicznie stabilnym. To określa między innymi temperaturę topnienia, odparowywania, moduł sprężystości, współczynnik rozszerzalności liniowej i inne własności.



Rys. 1.4. Zmiana siły oddziaływania (a) i energii wiązania (b) przy zbliżeniu atomów w kryształach

Wszystkie kryształy według charakteru dominującego wiązania dzielą się na molekularne, kowalencyjne, o wiązaniach metalicznych i jonowe. Jednak taki podział jest umowny, ponieważ w niektórych przypadkach może działać więcej niż tylko jeden typ wiązania.

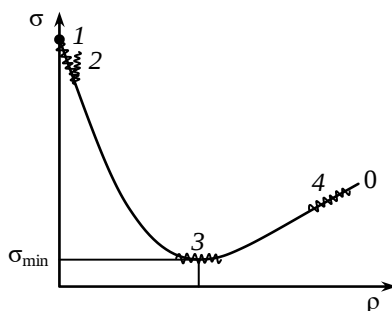
Struktura kryształów rzeczywistych różni się od idealnych. W kryształach rzeczywistych obecne są wady (defekty) co powoduje, że nie ma idealnie prawidłowego rozmieszczenia atomów w całej objętości kryształu.

Defekty w kryształach dzielą się na punktowe, liniowe (dyslokacje), powierzchniowe i objętościowe. Rozmiary defektów punktowych (wg Frenkla i Schottky'ego) są bliskie do odległości międzyatomowej. Długość defektów liniowych jest większa o kilka rzędów od szerokości. Grubość defektów

powierzchniowych jest mała, a ich szerokość i długość są o kilka rzędów większe. Defekty objętościowe (pory, pęknięcia) mają duże wymiary we wszystkich trzech kierunkach.

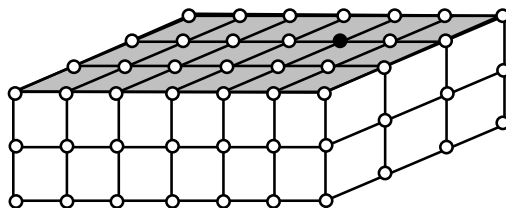
Wszystkie rodzaje defektów zniekształcają sieci krystaliczne i w pewnym stopniu wpływają na właściwości fizyko-mechaniczne materiałów. Szczególnie dużym jest wpływ dyslokacji na wytrzymałość kryształów. Dzięki dyslokacjom ruchomym eksperymentalnie określona granica plastyczności metali jest 100 razy mniejsza od teoretycznej. Ze znacznym wzrostem gęstości dyslokacji i zmniejszeniem ich ruchliwości, wytrzymałość zwiększa się kilkakrotnie, w porównaniu ze stanem wyżarzonym. Wytrzymałość obszarów, które nie zawierają defektów (w tym cienkich "wąsów", otrzymanych przez krystalizację z fazy gazowej) zbliża się do teoretycznej (rys. 1.5).

Właściwości warstw powierzchniowych różnią się zasadniczo od właściwości objętościowych materiału. Różnica między warstwami powierzchniowymi idealnie twardego ciała od warstw rozmieszczonych w głównej objętości wynika z dwóch powodów. Pierwszy to asymetria sił działających na cząsteczki zlokalizowane w warstwach przypowierzchniowych. Drugi spowodowany jest nieskompensowaniem związków tych cząsteczek.



Rys. 1.5. Zależność granicy wytrzymałości od gęstości dyslokacji: 1 – kryształ idealny bez defektów; 2 – kryształy wolne od defektów "wąsy"; 3 – metale wyżarzane; 4 – metale ze zwiększoną gęstością defektów po obróbce

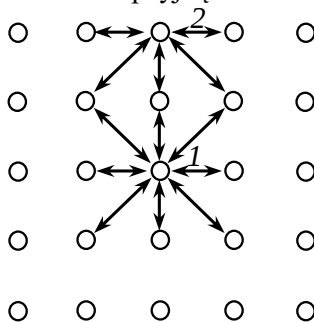
Rozpatrzmy strukturę metalu w skali atomowej. W tym przypadku powierzchnia może być przedstawiona w postaci schematycznej pokazanej na rys. 1.6. Atom metalu, który znajduje się na powierzchni otoczony jest przez atomy sąsiednie o tym samym charakterze. Liczba sąsiadujących atomów w atomie powierzchniowym jest mniejsza i w rezultacie całkowite energie oddziaływania powierzchniowego i objętościowego atomów są różne.



Rys. 1.6. Atom na powierzchni ciała stałego

Oddziaływanie atomu z sąsiadującymi atomami prowadzi do powstania energii wiązania, której wartość determinuje możliwość tworzenia się ciał stałych. Energia ta jest często określana jako energia oddziaływania kohezyjnego, z którą jest powiązanych dużo właściwości fizycznych i mechanicznych ciał stałych, mianowicie: moduł sprężystości, temperatura topnienia, temperatura odparowywania i inne. Należy zauważyć, że przy oddziaływaniu tarciovym dwóch różnych materiałów niszczenie szczepień, które powstają wskutek adhezji w punktach faktycznego ich kontaktu ma z reguły charakter kohezyjny. Jednocześnie wartość energii oddziaływania kohezyjnego pozwala przewidzieć, jakie wartości energetyczne są potrzebne do zniszczenia połączenia adhezyjnego.

Na dowolną cząsteczkę wewnątrz kryształu działają siły od strony otaczających ją cząsteczek (rys. 1.7). Równowaga tych sił będzie równa zero (1). Wiązania cząstek są nasycone, czyli całkowicie skompensowane. Załóżmy, że kryształ rozmieszczony jest w ultra-głębokiej próżni i nad jego powierzchnią nie ma atomów lub molekuł innego środowiska. Na cząstkę kryształu, znajdującą się w warstwie powierzchniowej, działają siły asymetryczne, sumaryczne których są skierowana wewnątrz kryształu (2). Takie oddziaływanie siłowe powoduje zniekształcenia struktury warstwy powierzchniowej i prowadzi do pojawienia się w niej nadmiernej energii potencjalnej, którą nazywamy powierzchnią. Dla cząstek rozmieszczonych w warstwie powierzchniowej charakterystyczna jest nieskompensowalność wiązań. Tak więc cząsteczki, które znajdują się na powierzchni, mają silną zdolność adsorpcyjną.



Rys. 1.7. Siły oddziaływujące na cząsteczki rozmieszczone wewnątrz kryształu (1) i w warstwie powierzchniowej (2)

Energia wiązania atomu powierzchniowego w bezwzględnej wielkości jest nieco niższa od energii oddziaływania kohezyjnego, ponieważ atom na powierzchni ma mniejszą liczbę atomów sąsiednich. Jednakże istnieją jasno określone zależności między tymi wartościami. Wartością energii wiązania atomu na powierzchni jest określona energia powierzchniowa ciał stałych.

1.2. Energia powierzchniowa

Wielkość energii powierzchniowej ciała stałego zależy od jego struktury krystalicznej i od rozmieszczenia płaszczyzn krystalograficznych względem powierzchni. Przykładowo, szczelnie upakowana płaszczyzna $\{111\}$ w kryształcie ściennie centrowanym ma stosunkowo małą energię powierzchniową. Przy tym płaszczyzny o mniej szczelnym upakowaniu (na przykład płaszczyzna $\{110\}$) mają wyższą energię powierzchniową i są bardziej aktywne chemicznie. W konsekwencji są one bardziej aktywne podczas kontaktowania z innymi ciałami stałymi, które są smarowane materiałami i oddziałują ze środowiskim. Analiza wartości energii powierzchniowej orientacji krystalograficznej wskazuje, że wpływa ona na rozmiar i charakter podziału płaszczyzn atomowych. Tak więc, w przypadku metali o budowie ściennie centrowanej łatwiej jest podzielić kryształy według płaszczyzn $\{111\}$ niż według płaszczyzn $\{110\}$. Można założyć, że niszczenie ciał stałych odbywa się wzdłuż płaszczyzn, które są najsłabiej związane. W przypadku kruchego zniszczenia kryształów ściennie centrowanych, takimi płaszczyznami są płaszczyzny $\{111\}$.

Ogólnie biorąc, powierzchnie metali (w szczególności polikryształów) zawierają wiele defektów: granicę ziaren, dyslokację i inne niedoskonałości. W przeciwieństwie do powierzchni monokryształów o stałej orientacji, orientacja polikrystaliczna zmienia się od ziarna do ziarna. Ze zmianami orientacji ziaren, zmienia się ich energia powierzchniowa. Ponadto metale o zdefektowanej strukturze mają nadmierną wartość energetyczną.

1.3. Oddziaływanie pomiędzy powierzchnią ciała stałego a środowiskiem

1.3.1. Adhezyjne oddziaływanie warstw wierzchnich

Pole siłowe przy adhezji tworzące się ładunkiem atomów (jonów, molekuł), z których składa się warstwa powierzchniowa ciał stałych, zmniejsza się wykładniczo ze wzrostem odległości od powierzchni. Praktycznie siły Van der Waalsa znikają na odległości 1-2 nm, więc dla połączenia adhezyjnego koniecznym jest odpowiednie zbliżenie się do siebie powierzchni. Te ostatnie, w większym stopniu, zależą od wytrzymałości i twardości ciała stałego.

Zjawiska adhezyjne odgrywają ważną rolę w badaniach tribologicznych, ponieważ są one źródłem znacznych oporów tarcia, szczególnie w przypadku braku otoczenia smarnego.

Pomimo dużej liczby badań poświęconych zjawisku adhezji, nie ma ogólnie zaakceptowanej hipotezy zjawiska adhezji. W literaturze istnieje kilka teorii. Jeszcze w roku 1724 Dezagulje badając oddziaływanie powierzchni ołowianych stwierdził, że dla miękkich metali plastycznych jest charakterystyczna silna adhezja normalna.

Wszystkie ciała stałe charakteryzują się energią powierzchniową, która ma istotny wpływ na ich właściwości adhezyjne. Jednak niektóre ciała stałe nie wykazują właściwości adhezyjnych. Zjawisko to wciąż nie ma racjonalnego wyjaśnienia. Możemy założyć, że większe znaczenie w zjawiskach adhezji mają odpowiednie kształty geometryczne i ułożenie atomów (jonów) – nośników powierzchniowych ładunków elektrostatycznych.

Według F. P. Bowdena adhezję można osłabić dwoma głównymi czynnikami. Pierwszym z nich jest występowanie warstw tlenkowych lub zanieczyszczonych, które mogą ulec uszkodzeniu w wyniku dużego odkształcenia powierzchni, w szczególności w trakcie procesu przyłożenia naprężeń ścinających albo w degazacji w wysokiej próżni.

Drugim czynnikiem jest wpływ naprężeń sprężystych; nawet w przypadku dobrze oczyszczonych powierzchni adhezja pomiędzy powierzchniami tego samego metalu często bywa mniejsza, niż oczekiwana. Jest to spowodowane utwardzaniem powierzchni podczas tworzenia kontaktu.

Zgodnie z elektryczną teorią adhezji opracowaną przez B.V. Deriagina, siły międzymolekularne działają w odległości mniejszej niż 2 nm, podczas gdy przyciąganie obserwuje się przy odległości do 1000 nm. Tak więc, poza siłami międzymolekularnymi, istotną rolę w połączeniu odgrywa podwójna warstwa elektryczna utworzona wskutek zderzenia dwóch ciał.

Zależność pomiędzy prędkością elektronów, a adhezją określona została przez V. N. Morozowa. Przy rozerwaniu wiązań znikają ładunki w wyniku efektu tunelowego i emisji elektronowej, przemieszczenia ładunków spowodowanych elektroprzewodnością powierzchni i wyładowaniem elektrycznym w gazie przylegającym do powierzchni. Teoria adhezyjna i elektryczna nie wykluczają się ze sobą, teoria elektryczna wskazuje jedynie dodatkowe źródło sił adhezyjnych.

Zgodnie z teorią rekrytalizacji opracowaną przez I.M. Parksema, bezpośredniemu kontaktowi i połączeniu adhezyjnemu metali przeszkadzają warstwy tlenkowe na powierzchni metali i różna orientacja ziaren krystalicznych powstała poprzez obróbkę powierzchniową. W podwyższonej temperaturze (różnej dla różnych metali) występuje migracja atomów jednego metalu w drugi nawet przez warstwy tlenkowe, tworząc wspólne kryształy które łączą dwa ciała.

Teoria energetyczna adhezji O.P. Semenowa oparta jest na ruchu atomów o podwyższonym stanie energetycznym. Zgodnie z tą teorią dla połączenia adhezyjnego koniecznym jest przejście atomów od jednego ciała metalowego do

innego. Wyjście atomu z sieci krystalicznej związane jest z przewyciężeniem progu energetycznego, który zależy od energii wiązania danych sieci krystalicznych. W wyniku przejścia atomów jednego ciała do warstwy powierzchniowej drugiego pomiędzy atomami obu ciał tworzą się wiązania łączące powierzchnie.

1.3.2. Adsorpcja i chemisorpcja

Powierzchnia dowolnego ciała, oprócz ciała znajdującego się w absolutnej próżni, styka się z gazem lub środowiskiem ciekłym. Odnosi się to również do powierzchni stykowych ciał trących, ponieważ kontakt tarcowy ma zazwyczaj charakter dyskretny, czyli odbywa się po występujących chropowatościach powierzchni [1–8].

Jedynie pod warunkiem całkowitego braku na powierzchni ciała stałego (metal) obcych atomów i molekuł, powierzchnia ciała stałego może być uważana za „fizycznie czystą”. Powierzchnię ciała stałego o właściwościach zbliżonych do pierwotnych można otrzymać przez naruszenie jej integralności, silnego narzewnania w wysokiej próżni i innych.

Jednakże, powierzchnia ciała stałego może zachować właściwości powierzchni fizycznie czystej tylko w warunkach wysokiej próżni lub w atmosferze gazu obojętnego. We wszystkich innych przypadkach w wyniku oddziaływania nienasyconych pól siłowych ciała stałego z polami siłowymi molekuł gazowych, powierzchnia ostatniego pokrywa się warstwą substancji zawartych w środowisku. Są to gazy, para wodna, które są zwykle w powietrzu oraz pary innych cieczy, a także substancje rozpuszczone w cieczach i substancjach przylegających do powierzchni ciała stałego. Zjawisko tworzenia się na powierzchni cienkich warstw gazów, pary, substancji rozpuszczonych lub pochłonięcia tych substancji powierzchnią ciała stałego nazywane jest adsorpcją.

Powierzchnie metali znajdujące się w powietrzu natychmiast pokrywają się adsorbowanymi molekułami tlenu i pary wodnej. Na metalach szlachetnych takie warstwy mogą mieć grubość nie większą niż jedną lub dwie odległości atomowe [6–11].

Molekuły aktywne polarne środowiska gazowego lub ciekłego, które zderzają się podczas chaotycznego ruchu cieplnego z powierzchnią ciał stałych, wpadają w jej elektryczne pole siłowe i dołączają się do jej centrów aktywnych, tworząc warstwę zaadsorbowanych zorientowanych molekuł. Największą zdolność do adsorpcji mają surfaktanty (substancje powierzchniowo-aktywne). Są to substancje, których molekuły przy adsorpcji są zorientowane prostopadle do powierzchni (na przykład kwasy organiczne, ich mydła metaliczne, alkohole i smoły). Zwykle adsorpcja jest definiowana jako nadmiar masy adsorbowanego składnika odniesionego do powierzchni jednostkowej warstwy powierzchniowej, która może się znacznie różnić.

Możliwe są dwa rodzaje adsorpcji:

1. Adsorpcja fizyczna wynikająca z sił Van der Waalsa;
2. Adsorpcja chemiczna (chemisorpcja) wynikająca z działania sił wiązania chemicznego pomiędzy materiałem powierzchni ciała stałego (metalem lub tlenkiem) i adsorbującymi na nim za pomocą sił Van der Waalsa molekułami.

Przy chemisorpcji występuje najpierw adsorpcja fizyczna molekuł ze środowiska, a następnie ich reakcja chemiczna z powierzchnią. Adsorpcja i chemisorpcja nazywane są sorpcją. Proces odwrotny adsorpcji, czyli uwalnianie molekuł adsorbowanych, nazywa się desorpcją. Ciało stałe, na którym molekuły adsorbują nazywa się adsorbentem. Substancja adsorbowana na adsorbencie nazywana jest adsorbatem.

Adsorpcja molekuł prowadzi do zmniejszenia energii powierzchniowej. W wyniku tego podczas adsorpcji do środowiska uwalnia się pewna ilość energii, nazywana energią adsorpcyjną, dlatego adsorpcja jest procesem izotermicznym. Intensywność procesu adsorpcji szacuje się ilością zaadsorbowanej substancji.

Pomiędzy tymi dwoma rodzajami adsorpcji istnieje fundamentalna różnica. Adsorpcja fizyczna jest odwrótne. Związek pomiędzy adsorbentem i adsorbatem można stosunkowo łatwo naruszyć przez działanie ciepła lub działanie rozpuszczalnika, w wyniku czego następuje desorpcja molekuł i odnawia się stan pierwotny powierzchni ciała stałego.

Chemisorpcja jest nieodwracalna. Pomiędzy powierzchnią i molekułami adsorbującymi następuje silne wiązanie chemiczne, z utworzeniem nowych związków na powierzchni ciała stałego, które są odporne na czynniki zewnętrzne, nieporównywalnie większe niż fizycznie zaadsorbowane warstwy molekularne.

Ważną właściwością, według której można ocenić typ adsorpcji, jest ciepło, które uwalnia się w tym procesie. W przypadku adsorpcji fizycznej ciepło właściwe jest w przybliżeniu równe ciepłu kondensacji adsorbatu (zwykle poniżej 41,8 J/mol). Ciepło chemisorpcji może osiągnąć 627 J/mol.

Innym wskaźnikiem adsorpcji jest energia aktywacji. Adsorpcja fizyczna nie wymaga energii aktywacji. Zgodnie z teorią aktywowanej adsorpcji, chemisorpcja w mierzalnym stopniu przebiega tylko powyżej zadanej temperatury minimalnej i dla niej powinna być zauważana energia aktywacji.

Tab. 1.1. zawiera dane oparte na pomiarze szybkości chemisorpcji dla różnych metali i gazów. Energia aktywacji nie jest warunkiem niezbędnym występowania chemisorpcji. W przeciwieństwie do adsorpcji, desorpcja jest zawsze aktywowana. Energia aktywacji desorpcji może być również wyznaczona na podstawie wykresu energii potencjalnej adsorbent-adsorbat.

Substancje, które mają tendencję do adsorpcji na powierzchni roztworu i zmniejszania energii powierzchniowej nazywane są substancjami powierzchniowo-aktywnymi. Dążeniu do skoncentrowania molekuł środka

powierzchniowo czynnego na powierzchni roztworu przeciwdziałają siły dyfuzji i ruch cieplny. Gdy siły prowadzące do skupienia się molekuł na powierzchni, są duże, a siły przeciwdziałające (ruch cieplny, dyfuzja) są małe, to molekuły środka powierzchniowo aktywnego mogą utworzyć na powierzchni szczelną adsorpcyjną warstwę monomolekularną.

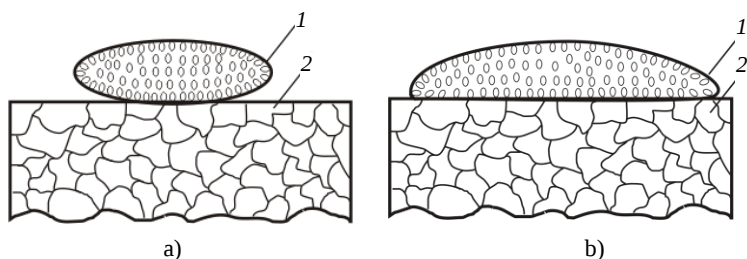
Tabela 1.1. Prędkości chemisorpcji na warstwach metalu

Gaz	Metale, na których występuje chemisorpcja		Metale, na których jest brak chemisorpcji do 0°C
	Nieaktywowana	Aktywowana	
H ₂	W, Ta, Mo, Zr, Fe, Ni, Pd, Rh, Pt, Ba	Ca (?)	Cu, Ag, Au, K, Zn, Cd, Al, In, Sn, Pb
C	Te same, co i z H ₂ oraz Cu, Au, Al	–	Zn, Cd, In, Sn, Pb, Ag, K
C ₂ H ₄	Te same, co i z H ₂ oraz Cu, Au,	Al (?)	Te same, co i z C
C ₂ H ₂	Te same, co i z H ₂ oraz Cu, Au, K	Al (?)	Te same, co i z C, oprócz K
O ₂	Wszystkie metale, oprócz Au	Ag	Au
N ₂	W, Ta, Mo, Ti, Zr, Ba	Fe, Ca (?)	Te same, co i z H ₂ oraz Ni, Pd, Ph, Pt
NH ₃	–	W, Ni, Fe	–
CH ₄	–	Ni, Rh, W, Pt, Pd	–

Na powierzchni roztworu molekuły surfaktantu są zorientowane w odpowiedni sposób do powierzchni w zależności od ich budowy chemicznej i rozkładu ładunków przestrzennych (moment dipolowy). Jeśli wyciągnięte molekuły mają strukturę łańcuchową, to zwykle oś łańcucha molekuły jest prostopadła do powierzchni cieczy. Jeśli zaś molekuła pierścieniowa ma złożoną strukturę mieszaną (łańcuchowo-pierścieniową) rozmieszczenie molekuł na powierzchni może być inne.

Gdy powierzchnia ciała stałego wchodzi w oddziaływanie kontaktowe z roztworem, to pole sił powierzchniowych, przede wszystkim wpływa na molekuły warstwy powierzchniowej roztworu, czyli na molekuły środka powierzchniowo-aktywnego. Przy oddziaływaniu kontaktowym roztworu z ciałem stałym molekuły surfaktantu, nawet przy bardzo niskiej koncentracji w roztworze mają wysoką zdolność adsorpcji na powierzchni ciała stałego, ze względu na ich dużą koncentrację w warstwie powierzchniowej, a także dzięki temu, że w większości są polarne (rys. 1.8). W przypadku adsorpcji dotyczy to tworzenia wiązania między molekułą a powierzchnią.

Warstwa adsorbowana środka powierzchniowo czynnego na ciele stałym jest monomolekularna. Sztucznie można utworzyć warstwę wielomolekularną, w której każda warstwa będzie składać się z równomiernie i jednakowo zorientowanych molekuł. Do metalu będą przyłączone aktywne końce molekuł pierwszego rzędu. Do ich ogonów, ogony molekuł drugiego rzędu oraz do ich aktywnych końców końce molekuł trzeciego rzędu itp. W ten sposób otrzymano warstwy z 1000 warstw molekularnych.



Rys. 1.8. Krople roztworu 1 na powierzchni ciała stałego 2: a) kropla z wysoką lepkością; b) kropla z niską lepkością

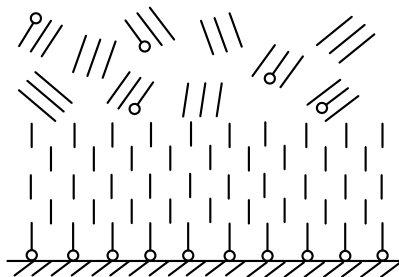
Molekuły środka powierzchniowo-aktywnego, zgodnie z zasadami równania polarności, ustanowionymi przez P.A. Rebintera, adsorbują się tak, że ich część polarna jest skierowana do bardziej polarnej fazy adsorbentu. Procesy adsorpcji są pierwszym etapem tworzenia powierzchni fizycznej – zmodyfikowanej warstwy, która składa się z molekuł obu faz stycznych. Powstawanie warstwy fizycznie zmodyfikowanej jest związane, w niektórych przypadkach, z adsorpcją wzdłuż kapilarów, dyfuzją wzdłuż granic krystalicznych ziaren i tworzeniem roztworów stałych. W innych przypadkach (na przykład w tworzeniu warstwy tlenkowej) przeważają procesy dyfuzji jonów metali przez produkty reakcji i oddziaływania chemicznego na granicy podziału faza stała – gaz. W trzecim przypadku oba mechanizmy zachodzą jednocześnie.

Środowiska ciekłe z molekułami o kształcie wydłużonym tworzą na granicy z metalową powierzchnią strukturę specjalną. Przedstawicielami takich środowisk są smary mineralne i smary roślinne oraz związki, które tworzą tłuszcze zwierzęce. Badania rentgenowskie i elektronograficzne wykazały, że nawet oleje składające się z węglowodorów polinasycionych C_nH_{2n} lub C_2H_{2n+2} , które mają molekuły niepolarne (na przykład oczyszczony olej wazelinowy), tworzą na metalu cienką warstwę poszczególnych warstw z orientacją molekuł prostopadłą do powierzchni metalu.

Adsorpcja w tym przypadku odbywa się pod wpływem polaryzacji nieaktywnych molekuł węglowo-wodnych polem elektrycznym powierzchni metalowej. Jednakże w warstwach istnieją miejsca niewypełnione. Wytrzymałość i trwałość takiej adsorbowanej warstwy jest niewielka. Wystarczającym jest do składu takiego oleju dodać małą ilość (około 0,1%) surfaktantów, żeby utworzyć zaadsorbowaną monowarstwę molekuł

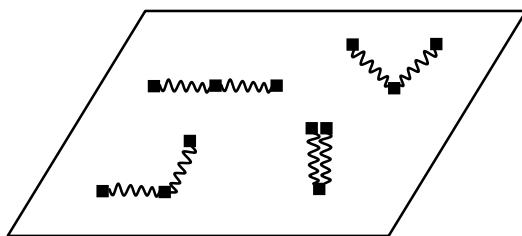
powierzchniowo-aktywnych (rys. 1.9), która jest w stanie nadać orientację znajdującym się powyżej warstwom smaru.

Pomiędzy powierzchnią stałą a grupą aktywną ("głową") molekuł są znacznie słabsze wiązanie orientacyjne Van der Waalsa, a poszczególne warstwy molekuł związane są oddziałującymi między ich grupami ogonowymi CH_3 słabszymi dyspersyjnymi siłami Van der Waalsa. Stosunkowo słaby związek między ogonami molekuł sąsiednich warstw jest przyczyną łatwego poślizgu przy tarcu granicznym pomiędzy stykającymi warstwami adsorpcyjnymi, które należą do dwóch powierzchni ruchomym.



Rys. 1.9. Wpływ zaadsorbowanej monowarstwy molekuł polarnych na orientację molekuł niepolarnych rozpuszczalnika

Charakter adsorpcji i orientacji molekuł na powierzchni stałej określa się przez oddziaływanie aktywnych ośrodków powierzchni z aktywnymi grupami molekuł składników smaru. Lokalizacja tych grup wzdłuż długości molekuł może być równoległa do powierzchni ciała stałego. Taką orientację "leżącą" przyjmują molekuły niepolarne węglowodorów i molekuły łańcuchowe z grupami polarnymi na obu końcach, na przykład dwuwartościowe kwasy tłuszczowe $\text{COOH}-(\text{CH}_2)-\text{COOH}$. Jeśli grupa karboksylowa znajduje się w środku molekuły łańcuchowej, to obie gałęzie mogą zajmować różne miejsca względem normalnej do powierzchni (rys. 1.10).



Rys. 1.10. Orientacja molekuł polarnych z różnym położeniem grup aktywnych przy adsorpcji na powierzchni stałej

Należy zauważyć, że bardzo często tarcie w obecności środka smarnego jest mylnie rozpatrywane wyłącznie pod kątem funkcji warstw adsorbowanych. Tym czasem warstwa graniczna na powierzchni metalu jest bardzo złożonym

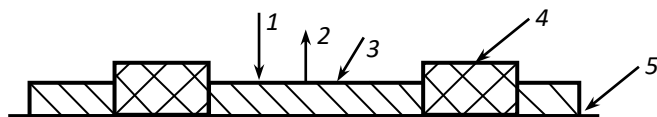
układem. Obejmuje ona oprócz warstw adsorbowanych, warstwy materii organicznej, warstwy tlenkowe i chemisorpcyjne, strefę zdeformowanych ziaren, a wreszcie obszar struktury pierwotnej materiału pary ciekłej. Jednak w każdym konkretnym przypadku budowa tych warstw będzie inna.

1.3.3. Oddziaływanie metalu z tlenem

Tlenki są jednym z rodzajów warstw powierzchniowych dlatego celowe jest szczegółowe rozważanie procesu utleniania.

Charakterystyczne dla powierzchni metalowej są różnego rodzaju niedoskonałości. Należą do nich niedoskonałości wynikające z tendencji metalu do zmniejszenia swobodnej energii powierzchniowej, niedoskonałości krystalograficzne, związane z warunkami tworzenia powierzchni struktury dyslokacyjnej metalu, niedoskonałości chemiczne (zanieczyszczenia itp.). Te niedoskonałości powierzchni kryształu rzeczywistego określają jego zdolność reakcyjną.

Rozważmy oddziaływanie tlenu z powierzchnią takiego metalu jak nikiel. Na rys. 1.11 przedstawiony jest schemat wzrostu wysepki tlenkowej na powierzchni niklu. W pierwszym etapie dwuatomowa molekula tlenu osadza się na powierzchni i dysocjuje na poszczególne atomy. Część atomów ulega desorpcji z powierzchni ciała stałego, a pozostała część chemisorpcji tworząc warstwę tlenku. W tym przypadku warstwą chemosorbowaną jest monowarstwa atomów tlenu na powierzchni ciała stałego. W miejscach o wysokiej energii powierzchniowej następuje proces utleniania wraz z powstawaniem trójwymiarowych wysepek tlenków. Wzrost wysepek występuje do grubości, przy której energia powierzchniowa zmniejsza się o wielkość, wystarczającą do rozprzestrzeniania się utleniania w sąsiednich obszarach.



Rys. 1.11. Wzrost wyspy tlenkowej na powierzchni metalu: 1 – adsorpcja; 2 – desorpcja; 3 – warstwa tlenku chemisorpcyjnego; 4 – wyspa tlenku; 5 – podłoże niklowe

Ostatecznie proces wzrostu wysepek rozpowszechnia się na całą powierzchnię, która pokrywa się warstwą tlenku. Koniecznym warunkiem wstępnym jest obecność energii swobodnej potrzebnej do aktywacji utleniania.

Oddziaływanie tlenu z powierzchnią metalową można przedstawić w następujący sposób. W niskich temperaturach kinetyka łączenia tlenu na powierzchni metalu wynika z przebiegu trzech podstawowych procesów: tworzenia warstwy zdysocjowanego tlenu, adsorbowanego na czystej powierzchni (chemisorpcja); mocowania tlenu molekularnego na powierzchni poprzedniej warstwy (adsorpcja fizyczna); wzrostu warstwy tlenków (reakcja utleniania).

Niezależnie od temperatury, kinetyka tworzenia się pierwszej warstwy adsorbowanej jest spowodowana procesem łączenia atomów tlenu ze względu na znaczącą energię wiązania. Ruchliwość (prawdopodobieństwo migracji) atomów adsorbowanych na powierzchni zależy głównie od trzech czynników: energii wiązania chemosorbowanego, temperatury i energii aktywacji dyfuzji powierzchniowej.

Związek zachodzący między tlenem lub innymi utleniaczami i atomami powierzchniowymi metali, jest czysto jonowy. Zewnętrzna część warstwy adsorbowanej jest naładowana ujemnie, a wewnętrzna – dodatnio. Dzięki energii polaryzacji tworzonej przez pole warstw leżących poniżej metalu, wiązanie przy chemisorpcji jest znacznie silniejsze niż w tlenku.

Grubość warstw tlenkowych, które tworzą się na powierzchni metali nieszlachetnych w temperaturze pokojowej wynosi od 20 do 100 Å. Gdy temperatura wzrasta, grubość warstwy wzrasta i może osiągnąć kilka mikrometrów. Na metalach szlachetnych powstaje tylko cienka warstewka monomolekularna.

Szybkość tworzenia się warstw tlenków zależy od aktywności i temperatury powierzchni metalu oraz intensywności przepływu do niej tlenu. Jest ona określana w ułamkach sekundy. Dla warstwy o grubości 1,4 nm wynosi 0,05 s. Wraz ze wzrostem grubości, wzrost grubości warstwy tlenkowej zachodzi wolniej.

W powietrzu warstwy tlenkowe są formowane bardzo szybko. Tak więc warstwa o grubości 15 Å powstaje ok 0,05 s. Wiele metali (Fe, Cu, Al) w czasie mniejszym niż 5 min. po obróbce cięciem pokrywa się w temperaturze pokojowej warstwą o grubości do 100 Å. W podwyższonych temperaturach czas ten może być znacznie krótszy.

Rozpuszczalność tlenu w metalach jest znacząca rzędu od dziesiątych do tysięcznych części procenta.

W procesach utleniania parametrem decydującym w większości przypadków jest szybkość dyfuzji. Jest ona znacznie ułatwiona w obecności defektów w sieci tlenków (np. nadmiar jonów metali).

Budowa warstw tlenkowych zależy od materiału podłoża. Na czystym metalu lub o niewielkiej ilości domieszek, warstwy tlenków są równoległe do powierzchni wyjściowej metalu. Na czystych metalach o stałej wartościowości (na przykład Al i Ni), warstwy tlenków zwykle mają budowę fazową. Metale o zmiennej wartościowości tworzą warstwę tlenku jednofazową i wielofazową.

Wytrzymałość warstw tlenkowych zależy od materiału podłoża, od stosunku twardości warstw i metalu. Jeśli warstwa ta ma dużą twardość przy miękkim podłożu, to pod wpływem oddziaływań mechanicznych jest ona niszczona ze względu na swoją kruchość. Przykładem jest tlenek glinu – korund (Al_2O_3), który charakteryzuje się wysoką twardością i jest materiałem o wysokiej ścieralności. Stosunek twardości według Vickersa Al_2O_3 i aluminium wynosi 2200:27.

Wysoką wytrzymałość mają warstwy tlenków, których twardość jest bliska twardości metalu, takich jak miedź i stal. W przypadku oddziaływania

mechanicznego na powierzchnię takich metali warstwa ta ulega deformacji wraz z podwarstwą, co przy zbyt dużych obciążeniach chroni ją przed zniszczeniem.

Wytrzymałość warstw tlenkowych zależy również od stosunku parametrów sieci krystalicznych warstw i metalu. Im większa jest różnica parametrów, tym mniejsza jest siła wiązania między warstwą a metalem. W normalnych temperaturach tlenki są ciałami kruchymi, które dość dobrze przeciwstawiają się tylko ścisnaniu.

Istotnym jest pytanie o stosunkach objętościowych między tlenkiem a metalem i naprężeniami powstającymi w tlenkach ze względu na różnicę w jednostkowych objętościach metali i tlenków. W tlenkach zwykle występuje naprężenie ściskające, a w metalu – rozciągające. Obecność tych naprężeń przyczynia się do odwarstwienia tlenków na powierzchni.

Większość materiałów konstrukcyjnych używanych w węzłach tarcia stanowią stopy na osnowie żelaza, stąd rozważono procesy podstawowe utleniania żelaza. Zgodnie z wykresem żelazo-tlen w normalnej temperaturze w żelazie rozpuszcza się około 0,05% tlenu, a w temperaturze 1000 °C około 0,12%. Jeśli utlenianie jest większe od granicy nasycenia, to z roztworu wydzielają się tlenki. Żelazo z tlenem tworzą trzy rodzaje tlenków z różnymi sieciami krystalograficznymi: wiustyt FeO , magnetyt Fe_3O_4 i hematyt Fe_2O_3 . Wiustyt rozpuszczalny jest w żelazie i stabilny w temperaturze powyżej 570 °C; poniżej tej temperatury rozpada się na magnetyt i czyste żelazo:

Magnetyt i hematyt są stabilne w całym zakresie temperatur do punktów topnienia. Warstwa tlenkowa w żelazie składa się z warstw zlokalizowanych od powierzchni do wewnątrz w kolejności odpowiadającej redukcji tlenu w tlenku. W temperaturach poniżej 570 °C warstwa ta może składać się z pojedynczej warstwy Fe_3O_4 , z warstwy zewnętrznej Fe_2O_3 i z warstwy Fe_3O_4 lub z warstw Fe_2O_3 , Fe_3O_4 i FeO . Przy czym rozkład FeO zachodzi od razu po jej utworzeniu.

Należy pamiętać, że żaden z procesów oddziaływania powierzchni nie odbędzie się jako czysto powierzchniowy. To oddziaływanie jest zawsze objętościowe. Procesy fizyczne i fizyko-chemiczne przy oddziaływaniu kontaktowym ciał stałych i przy ich tarcii zachodzą nie tylko w warstwach powierzchniowych, ale często rozpowszechniają się na znaczną głębokość wewnątrz metalu. Kiedy mówimy o adsorpcji, to mamy na myśli powstanie związku pomiędzy molekułą a powierzchnią.

1.4. Powierzchnia części maszyn i jej budowa geometryczna

Oddziaływanie ciał stałych przy tarcii zewnętrznym zlokalizowane jest w najcieńszych warstwach powierzchniowych, które formują się zarówno w procesie obróbki technologicznej, jak i w warunkach eksploatacji. W większości przypadków zniszczenie elementów węzłów tarcia zaczyna się w warstwach powierzchniowych. W związku z tym wzrasta rola powierzchni

elementów w zwiększaniu niezawodności i trwałości węzłów tarcia, co wymaga uwzględnienia jej głównych charakterystycznych cech.

Ciało stałe to złożony układ mikroskopijnych cząstek zawierający nie tylko atomy, molekuly, elektrony, protony, neutrony, lecz także quasicząsteczki – fonony, plazmony, magnony, PI-mezony i inne. Siły łączące między sobą atomy lub molekuly w ciałach stałych są prawie całkowicie elektrostatyczne. Określają one właściwości mechaniczne tych ciał. Cząsteczki tworzące ciało stałe znajdują się w stanie termodynamicznym, na który może wpływać pole magnetyczne, elektryczne, temperaturowe, mechaniczne lub inne pole siłowe. Stan naruszony w wyniku wewnętrznej reorganizacji systemu przechodzi w nowy odpowiadający warunkom zewnętrznym. Odpowiednio zmieniają się parametry charakteryzujące właściwości fizyczne i mechaniczne ciała stałego.

Geometria powierzchni zawiera obrys całego ciała: odchylenia makrogeometryczne, falistość, chropowatość, mikrochropowatości i stopień regularności ich rozkładu.

Odchyleniami makrogeometrycznymi nazywane są te, w których kształt powierzchni odbiega od zadanego. W przypadku płaszczyzn takimi błędami będą między innymi tolerancja płaskości, nieliniowość. Dla części cylindrycznych między innymi to owalność, tolerancja walcowości, beczkowatość.

Odchylenia makrogeometryczne mogą być technologiczne i eksploatacyjne. Makroodchylenia technologiczne mogą być spowodowane niewystarczającą dokładnością obrabiarki, niedokładnym mocowaniem narzędzia, złym wyborem warunków obróbki lub naruszeniem tych warunków, naprężeniami temperaturowymi i deformacjami.

Makroodchylenia eksploatacyjne zwykle spowodowane są nierównomiernym zużyciem wynikającym z nieprawidłowej instalacji elementów w połączeniach ruchowych, wibracjami i przeciążeniami podczas pracy. W zależności od stopnia precyzji wykonania elementów w odpowiednich standardach podane są odchylenia graniczne od płaskości, prostoliniowości, kształtu powierzchni cylindrycznych, bicia promieniowego, równoległości i prostopadłości. Wraz ze wzrostem jakości maszyn i ich niezawodności wzrastają wymagania mechaniczne dotyczące kształtu elementów maszyn.

Mikroodchylenia dzielone są na falistość, chropowatość i submikrochropowatość. Zbiór powtarzających się okresowo występow i zagłębień na powierzchni o odległości mniejszej niż makronierówności i większej niż mikronierówności nazywa się falistością. Może ona być uformowana na powierzchni elementów podczas wytwarzania (falistość technologiczna) oraz podczas eksploatacji maszyn. Przy obróbce, falistość może powstać prostopadle (falistość poprzeczna) i równolegle (falistość podłużna) do ruchu narzędzia skrawającego lub ściernego. Falistość charakteryzuje się wysokością (h), krokiem (l) i promieniem przy wierzchołku fali (R) (tabl. 1.2). Formę falistości, która występuje na powierzchniach elementów maszyn podczas obróbki (rys. 1.12) opisuje się w większości przypadków przez część elipsy. Wierzchołki tych

nierówności są rozmieszczone według wysokości w przybliżeniu na tym samym poziomie. Maksymalny krok lub długość falistości są zwykle uzależnione od wielkości posuwu podczas obróbki. Charakter falistości zależy od warunków wykonania operacji. Może być ona fali S_B i wysokość H_B . Krok fali to odległość między wierzchołkami dwóch sąsiednich fal mierzona na profilu powierzchni. Wysokość fali to odległość między wierzchołkiem fali i jej zagłębieniem. Równa jest ona amplitudzie podwójnej fal.pierścieniową, śrubową, ciągłą lub przerywaną. Falistość zazwyczaj powstaje przy operacjach takich jak: szlifowanie, honingowanie, oscylacyjne dogładzanie, kiedy chropowatość usuwa się tylko na częściach wypukłych powierzchni i pozostaje na wklęsłych. Czasami występuje w przypadku innych rodzajów obróbki.

Falistość charakteryzuje krok fali S_B i wysokość H_B . Krok fali to odległość między wierzchołkami dwóch sąsiednich fal mierzona na profilu powierzchni. Wysokość fali to odległość między wierzchołkiem fali i jej zagłębieniem. Równa jest ona amplitudzie podwójnej fal. Spełniona musi być nierówność $S_B/H_B > 40$. W zależności od typu obróbki powierzchni, S_B zmienia się od 0,25 do $10^4 \mu\text{m}$, a H_B od 0,03 do $500 \mu\text{m}$.

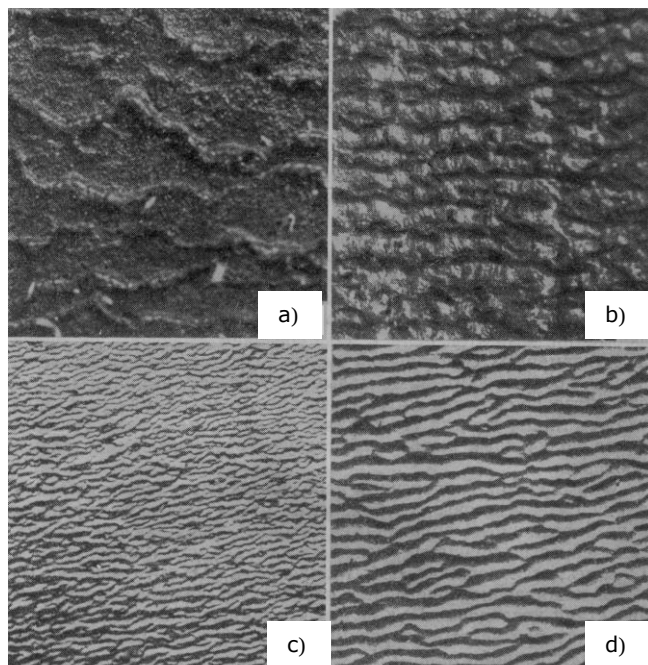
W obliczaniu parametrów styku ciał stałych często używane są promienie krzywizny występow wierzchołków fal:

$$R_B = \frac{S_B^2}{H_B}$$

Promień R_B jest określany z przebiegu fal powierzchni, które otrzymujemy za pomocą urządzeń z wykorzystaniem sondy, na przykład "Kaliber-225" lub Surtronic 3⁺.

Tabela 1.2. Charakterystyki geometryczne falistości

Typ obróbki	Stal			
	Δ	$h, \mu\text{m}$	l, mm	R, mm
Falistość poprzeczna				
Szlifowanie płaskie	5-9	1,25-13	0,75-1,4	15-50
Szlifowanie wewnętrzne	6-9	0,6-4,5	0,5-1,4	10-80
Roztaczanie	5-8	2-3,5	1-1,5	15-50
Falistość podłużna				
Szlifowanie płaskie	5-9	1,2-12	2,4-3,4	45-350
Struganie	4-7	1-12	1-5	95-100
Frezowanie cylindryczne	4-6	7,5-40	1,7-3,4	5-45



Rys. 1.12. Powierzchnia (x20) po tarcu (kierunek od dołu do góry): a) gumy po siatce stalowej nr 12 przy $p = 2 \text{ kg/sm}^2$, $v = 0,3 \text{ m/s}$; b) poliamidu AK-7 po siatce mosiężnej nr 18 przy $p = 10,5 \text{ kg/sm}^2$, $v = 0,4 \text{ m/s}$; c i d) aluminium i cyny o dyspersyjne materiały ściernie przy $p = 10 \text{ kg/sm}^2$, $v = 1 \text{ m/s}$, droga tarcia odpowiednio 200 i 100 km

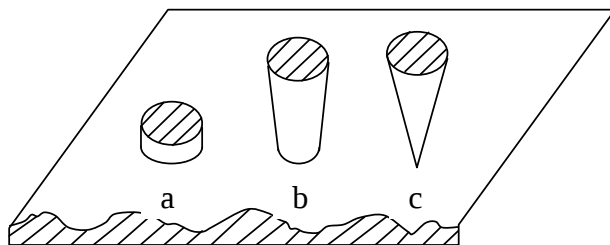
Falistość można oszacować na podstawie przebiegu profilogramu powierzchni. Wygląd powierzchni elementów obrabianych szlifowaniem pokazano na rys. 1.13. Kształt falowy jest bliski sinusoidy.



Rys. 1.13. Wygląd powierzchni (profilogram) ciała stałego obrabianych szlifowaniem

Chropowatość powierzchni to nieregularne mikroodchylenia od kształtu geometrycznego powierzchni falistej ciała stałego. Odchylenia te w porównaniu z powierzchnią fal charakteryzują się stosunkowo mniejszym krokiem. Odległość pomiędzy wierzchołkami mikronierówności jest znacznie mniejsza od długości podstawowej – wielkości pola powierzchni wybranego dla oceny chropowatości powierzchni. Od chropowatości zależy wielkość współczynnika tarcia, odporność ciała na ścieranie, siły statyczne i dynamiczne elementów oraz ich właściwości korozyjne.

Przy współpracy elementów maszyn ważna jest nie tylko wysokość nierówności stykających się powierzchni, ale także promień zaokrąglania zagłębień i występów, kąty nachylenia stron bocznych nierówności, kształty skrzyżowań podstaw występów, czyli konfiguracja chropowatości. Promień zaokrąglania wierzchołków mikronierówności i głębokość ich zanurzenia przy przemieszczeniu stycznym (tangencjalnym) w warunkach tarcia bez smarowania zmienia wielkość zużycia. Są one określone (rys. 1.14) odkształceniem sprężystym (a) i plastycznym (b) lub cięciem materiału (c).



Rys. 1.14. Wpływ zaokrąglania nierówności na charakter oddziaływania stykających się powierzchni

Chropowatość technologiczna powierzchni dla niektórych rodzajów obróbki (na przykład toczenia, frezowania, szlifowania w kierunku ruchu narzędzia i prostopadłym do jego ruchu) jest niejednakowa. Rozróżnia się chropowatość podłużną i poprzeczną. Podczas strugania, toczenia, przeciągania, wiercenia, frezowania cylindrycznego, mikronierówności rozmieszczone są równolegle. Podczas honingowania, oscylacyjnego dogładzania nierówności przecinają się, a przy przycinaniu przekrojów poprzecznych są one rozmieszczone w postaci koncentrycznych kół.

Mikronierówności krzywoliniowe są bliskie do równoodległych krzywych i rozmieszczone losowo. Powstają odpowiednio przy frezowaniu czołowym i obróbce walców na szlifierce walcowej. Powierzchnie o dowolnym położeniu punktowym mikronierówności uzyskuje się w wyniku obróbki ścierno-ciekłej, obróbki strumieniowo-ściernej i obróbki elektroimpulsowej.

Chropowatość eksploatacyjna powierzchni jest podzielona na nierównoważną i równoważną. Chropowatość nierównoważna jest chropowatością przejściową od chropowatości technologicznej do równoważnej i jest typowa dla okresu docierania elementów tribosystemu. Mechanizm jej zmiany zależy od stanu naprężeń w strefie kontaktu mikronierówności. Przy czym deformacje w kontakcie mogą być plastyczne i sprężyste.

W przypadku deformacji sprężystych w obszarach kontaktu, zmiany chropowatości powierzchni są spowodowane ścieraniem powierzchni tarcia stykających się elementów. Przy czym w procesie docierania w strefach kontaktu mikrowystępów ulegają zniszczeniu tylko te, które są poddawane największemu wpływowi sił. W rezultacie pojawiają się nowe mikronierówności, które różnią się

rozmiarem i kształtem od zużytych. Takie oddziaływanie ciał stałych dla węzła tarcia w trakcie określonego czasu pracy prowadzi do pojawienia się chropowatości stałej, która odpowiada minimalnie możliwym współczynnikom tarcia w tych warunkach pracy.

W normalnych warunkach tarcia, równoważna chropowatość powierzchni odnawia się. Mechanizm reprodukcji chropowatości powierzchni jest wciąż niewystarczająco zbadany. Wiadomo, że przy równoważnej chropowatości powierzchni w połączeniach ruchomych obserwuje się minimalne siły tarcia i minimalne intensywności zużycia.

Chropowatość powierzchni szacuje się wysokością mikronierówności profilu powierzchni R_z , średnią arytmetyczną odchylenia profilu R_a , średnim krokiem mikronierówności S_a , maksymalną wysokością mikronierówności R_{max} i promieniem zaokrąglenia wierzchołków mikronierówności R .

W przypadku tego samego rodzaju obróbki powierzchni chropowatość jest zawsze mniejsza niż falistość. Aby nie mylić parametrów falistości i chropowatości, przy ocenie tych ostatnich parametrów używa się profili powierzchni o określonej długości, nazywanych bazową. Długość tego profilu powierzchni jest oznaczona literą L i jest wyznaczana z wykorzystaniem specjalnych tabel.

Wysokość mikronierówności wyznacza się z dziesięciu mikronierówności w zakresie długości bazowej.

Przy szacowaniu chropowatości technologicznej powierzchni dla niektórych rodzajów obróbki R_z określa się wzorem:

$$R_z = H_p + \Delta H$$

gdzie H_p – obliczeniowa wysokość mikronierówności z uwzględnieniem geometrii narzędzia i warunków obróbki; ΔH – odchylenia od obliczeniowej wysokości mikronierówności.

Obliczeniową wysokość mikronierówności określa się w zależności od rodzaju obróbki i jej warunków. Na przykład, podczas ostrzenia wyraża się wzorem.

$$H_p = \frac{S^2}{8 \cdot r_{p3}}$$

gdzie: S – posuw; r_{p3} – promień zaokrąglenia noża przy wierzchołku.

Średnie arytmetyczne odchylenie profilu powierzchni oblicza się według wzoru:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)$$

gdzie y_i – odchylenie profilu powierzchni od linii środkowej w dowolnym przecięciu; n – ilość podziałów profilu powierzchni.

Krokiem mikronierówności S_m nazywa się odległość między dwoma punktami przecięcia podobnych sąsiednich mikronierówności z linią środkową profilu powierzchni.

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_1} S_{mi}$$

gdzie n_1 – liczba występow, używanych do określania (zazwyczaj nie mniej niż 5); S_{mi} – krok dowolnej mikronierówności.

Maksymalna wysokość mikronierówności $R_{\max}$ to odległość między linią wgłębień a linią występow profilu powierzchni. Linie wgłębień i występow to linie proste narysowane na profilu powierzchni w granicach długości bazowej, odpowiednio przez największe wgłębienie i wierzchołek najwyższego występu, równoległe do środkowej linii profilu powierzchni.

Submikrochropowatość powierzchni to odchylenia mniejsze, które mają na powierzchni mikronierówności. Jest ona spowodowana wadami wewnętrznymi (wakancjami i dyslokacjami), nierównomiernością odkształceń poszczególnych kryształów, która występuje w procesie obróbki mechanicznej albo tarcia zewnętrznego, nierównomiernym wzrostem warstw chemisorpcyjnych.

Znaczący wpływ na tworzenie się submikrochropowatości ma środowisko zewnętrzne, które powoduje pojawienie się warstw o różnym składzie i grubości. Ponieważ rozmiary submikrochropowatości są mniejsze przynajmniej o dwa-trzy rzędy niż w mikronierównościach, to ich wpływ na odkształcenia warstw powierzchniowych przy tarcu zewnętrznym można pominąć i brać pod uwagę tylko przy ocenie sił, spowodowanych przez oddziaływania międzycząsteczkowe i międzymolekularne.

Submikroskopowy relief powierzchni ma szczególny charakter występowania. Jego parametry zależą nie tylko od wad wewnętrznych odkształcającego metalu, ale również od rodzaju i wielkości przyłożonych naprężeń, warstw tlenków, warstw adsorbowanych cieczy i gazów.

Ilościowo charakter submikroreliefu jest określany przez wielkość występow i zagłębień, ich formę i częstotliwość rozmieszczenia na powierzchni metalu.

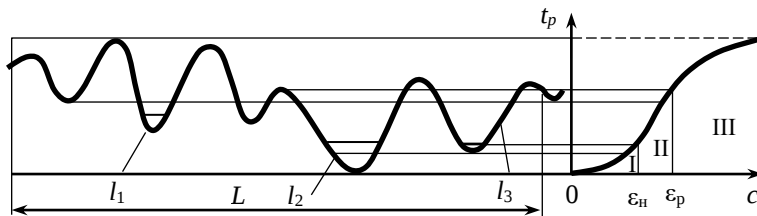
Rozkład w chropowatej warstwie ciała stałego określany jest przez krzywą oporową profilu powierzchni t_p , co pozwala ocenić rozkład wierzchołków mikronierówności według wysokości.

Krzywa t_p jest skonstruowana w następujący sposób. Wybierany jest profil powierzchni (profilogram) z pewną długością bazową L . Profilogram zaleca się mierzyć pod kątem 45° w stosunku do kierunku ruchu narzędzia przy obróbce. W celu uzyskania wiarygodnych danych zaleca się mierzyć co najmniej pięć profilogramów z różnych obszarów powierzchni elementów. Na profilu powierzchni wyprowadzana jest linia średnia, linie zagłębień i występow. Równoległe linie środkowe rysują dowolną liczbę przecięć. Następnie budujemy wykres, w którym wzdłuż osi współrzędnych y odkłada się odległość

rozważanego przecięcia od wierzchołka występu h do wysokości maksymalnej mikronierówności $R_{\max}$, wzdłuż osi x – stosunek całkowitej długości przecięć mikronierówności

$$l_1, l_2, l_3, \dots, l_i, \text{ tzn } \sum_{i=1}^n l_i \text{ do } L.$$

Krzywą oporową profilu powierzchni pokazano na rys. 1.15.



Rys. 1.15. Krzywa oporowa profilu powierzchni

Na krzywej t_p można zaznaczyć trzy obszary. Pierwszy odpowiada $0 < \varepsilon = \frac{h}{R_{\max}} \leq \varepsilon_H$; drugi $\varepsilon_H \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p$ i trzeci $\varepsilon_p \leq \varepsilon \leq 1$.

1.4.1. Falistość i chropowatość powierzchni ciał stałych

Powierzchnie zawsze mają falistość i chropowatość, więc kontakt ciał stałych będzie zachodził w oddzielnych strefach, tzn. będzie to kontakt dyskretny. W celu scharakteryzowania procesu kontaktu ciał stałych, wprowadza się pojęcie nominalnego A_a , konturowego A_c i rzeczywistego A_r pola powierzchni kontaktu. Nominalne pole powierzchni styku pokrywa się z całym polem powierzchni styku elementów. Na przykład rozważmy kontakt między dwoma ciałami stałymi z nominalnie płaskimi powierzchniami. W jednym z ciał powierzchnia styku jest falista i szorstka, w innym jest idealnie równa (płaska). W przypadku pierwszego ciała, nominalne pole powierzchni styku jest równe polu powierzchni stykowej powierzchni falistej A_a , dla drugiego równe jest polu powierzchni prostokąta.

Odształcenie elementów falistości prowadzi do powstania na nich obszarów styku, których łączne pole powierzchni nazywane jest konturowym polem powierzchni styku A_c . Podczas kontaktu elementów posiadających powierzchnie krzywoliniowe, konturowe pole powierzchni styku pokrywa się z polem powierzchni obliczonym na podstawie teorii sprężystości stosując założenia o idealnie gładkich powierzchniach.

Deformując materiał warstw powierzchniowych, mikronierówności powodują zbliżanie się powierzchni ciał stałych. Tak więc sytuacja jest podobna do budowy krzywej oporowej powierzchni. Dlatego, aby ocenić zależność faktycznego pola powierzchni styku od zbliżenia, zwykle wykorzystuje się równanie krzywej oporowej

powierzchni. Jednakże, faktyczne pole powierzchni styku nieznacznie różni się przy tej samej wielkości zbliżeń od pól powierzchni przecięć ze względu na krzywą oporową powierzchni. Krzywa oporowa powierzchni jest charakterystyką geometryczną, która pomija procesy odkształcania mikronierówności. Jednakże procesy te wnoszą niewielką różnicę pomiędzy zależnością pola powierzchni styku od zbliżenia i krzywej oporowej powierzchni.

Elementarne pole rzeczywistej powierzchni styku jest polem powierzchni, w którym zrównoważone są siły międzyatomowe i międzymolekularne przyciągania i odpychania. Łączna powierzchnia obszarów stykowych mikronierówności tworzy rzeczywiste pole powierzchni styku ciał.

Rzeczywiste pole powierzchni styku nie jest duże i zgodnie z danymi pomiarowymi nie przekracza 20–30% konturowego pola powierzchni styku, nawet przy istotnych wartościach obciążeń. Po przeprowadzeniu operacji dopasowania można zwiększyć ten obszar do 70–80%. Podczas współpracy dwóch ciał stałych kontakt odbywa się tylko po największych wierzchołkach mikronierówności powierzchni (dla ciał płaskich ze stali mniej niż 0,01% pola powierzchni stycznych). Pole powierzchni kontaktu zmienia się w zależności od obciążenia, stopnia chropowatości, makrogeometrii i w małym stopniu zależy od rozmiaru powierzchni. Nawet wtedy, gdy ciało jest podane lekkiemu naciskowi, na małych obszarach powierzchni styku powstają jednostkowe naciski, które powodują odkształcenie plastyczne najtwardszych metali.

Kontakt między dwoma powierzchniami może być sprężysty, sprężysto-plastyczny, plastyczny, nienasycony, nasycony.

Kontakt nienasycony to taki rodzaj kontaktu ciał stałych, kiedy liczba kontaktujących się mikronierówności jest mniejsza niż liczba mikronierówności rozmieszczonych na konturowym polu powierzchni kontaktu.

Przy kontakcie sprężystym nienasyconym, obciążenie normalne powodujące zbliżanie się powierzchni określane jest za pomocą wzoru

$$N = \int_0^{\varepsilon} N_i \cdot dn_r$$

gdzie: N_i – obciążenie normalne, które przypada na jedną mikronierówność, rozmieszczoną w dowolnej warstwie; dn_r – liczba mikronierówności z jednakowym zbliżeniem.

Kontakt sprężysty nasycony występuje wtedy, gdy najniższy w obrysie pola powierzchni kontaktu, mikrowystęp będzie stykał się z przeciwciałem.

Kontakt sprężysto-plastyczny jest oddziaływaniem ciał stałych, gdy odkształcenia sprężyste i plastyczne występują w tym samym czasie w pewnej części kontaktujących się mikronierówności w strefach styku. Zdeformowanie plastyczne występuje w punktach kontaktu mikronierówności, gdzie maksymalne naprężenia normalne osiągają ciśnienie jednostkowe plastyczności materiału. W tych przypadkach uzyskuje się kontakt plastyczny.

1.4.2. Właściwości fizyko-chemiczno-mechaniczne warstw powierzchniowych i występujące w nich naprężenia

Charakter kontaktu dwóch ciał stałych, oprócz geometrii powierzchni, zależy od właściwości mechanicznych, fizycznych i chemicznych cienkich warstw powierzchni oraz ich stanu naprężeń. Takie warstwy powierzchniowe, których grubość waha się najczęściej od dziesiątków do setek angstromów, z reguły mają inną strukturę i właściwości niż materiał rdzenia. Różnica właściwości cienkich warstw powierzchniowych od właściwości rdzenia jest spowodowana trzema głównymi czynnikami:

- a) stanem atomów metali w warstwach powierzchniowych, który różni się od stanu atomów w objętości, skutkiem czego jest obecność swobodnej energii powierzchniowej i duża aktywność adsorpcyjna;
- b) sumą oddziaływań mechanicznych, termicznych i fizyko-chemicznych na powierzchnię metalu przy operacjach obróbki technologicznej;
- c) sumą powtarzających się cyklicznych, mechanicznych, termicznych i fizyko-chemicznych wpływów na powierzchnię metalu w warunkach tarcia (eksploatacyjnych).

W procesie obróbki technologicznej w warstwach powierzchniowych powstają stosunkowo wysokie deformacje plastyczne. Lokalne objętości metalu przebywają pod wpływem wysokich temperatur. Na stan powierzchni wpływają działania fizyko-chemiczne środowisk w których odbywa się tarcie, płyny chłodząco-smarujące, tlen z powietrza. W tych warunkach warstwy powierzchniowe zmieniają nagle swoje właściwości.

W warunkach tarcia i zużycia odbywa się kolejna zmiana struktury i właściwości warstw powierzchniowych w związku z wielokrotnymi powtarzającymi się skutkami działania naprężeń normalnych i stycznych. Głównym czynnikiem, który powoduje zmiany właściwości cienkich warstw powierzchniowych przy eksploatacji, jest powtarzająca się deformacja plastyczna, mechanizm której opisany jest przez teorię niedoskonałości kryształów (teoria dyslokacji). Z punktu widzenia tej teorii odkształcenie plastyczne odbywa się poprzez przemieszczenie i rozmnażanie dyslokacji.

Zwiększenie defektów warstw powierzchniowych sprzyja aktywacji procesów dyfuzyjnych, które z kolei wpływają między innymi na procesy utleniania i segregacji.

1.4.3. Deformacja metali

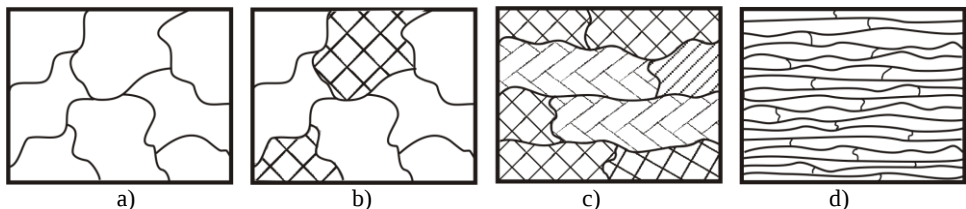
Deformacją nazywana jest zmiana rozmiarów i kształtu ciała pod wpływem sił zewnętrznych. Deformacje są podzielone na sprężyste i plastyczne.

Odształcenia sprężyste po zakończeniu działania przyłożonych sił znikają. W skład odkształceń sprężystych wchodzi odwracalne przesunięcia atomów metali od warunków równowagi.

Odształcenia plastyczne pozostają po zakończeniu działania przyłożonych sił. W składzie deformacji plastycznych leżą nieodwracalne przemieszczenia atomów metali od pozycji wejściowych. Zdolność metali do odkształcenia plastycznego nazywa się plastycznością. Przy odkształceniu plastycznym metali jednocześnie ze zmianą kształtu zmienia się wiele właściwości. W szczególności przy odkształceniu na zimno zwiększa się wytrzymałość.

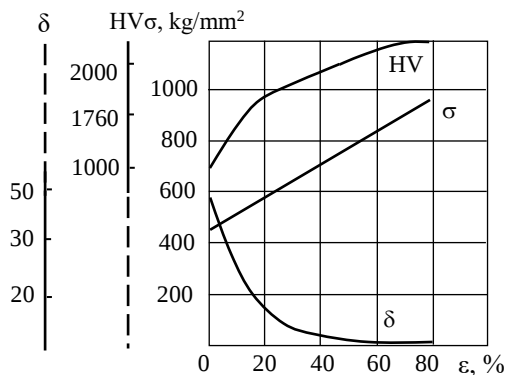
W rzeczywistych kryształach odkształcenie plastyczne odbywa się przez przemieszczenie sekwencyjne dyslokacji. Dyslokacja łatwo porusza się w płaszczyźnie, w której znajduje się linia dyslokacji i jej wektor Burgersa. Przy stałym naprężeniu dyslokacja jest przemieszczana z jednej płaszczyzny atomowej do drugiej, co powoduje kolejne przemieszczenie każdego sąsiedniego "prawidłowego" rzędu atomów. Proces jest powtarzalny, aż dyslokacja dotrze do powierzchni kryształu, a jego górna część przemieści się w stosunku do dolnej na jedną odległość międzyatomową. Jednocześnie na powierzchni krystalicznej utworzy się schodek tak duży jak wektor Burgersa. Ruch dyslokacji zakłócają różne przeszkody takie jak: granice ziarna, powierzchnie międzyfazowe, dyslokacje przecinające płaszczyznę ślizgową. Na tych przeszkodach gromadzą się dyslokacje. Gdy gęstość dyslokacji w klastrze osiągnie pewną (graniczną) wartość, w tym miejscu zaczyna się pęknięcie.

Deformacja polikryształów rozpoczyna się deformacją ziaren natychmiast po kilku cyklach poślizgowych i towarzyszy jej ugięcie i skręcanie płaszczyzn ślizgowych. Podczas gdy ogólna deformacja jest niewielka, około 1%, ziarna deformują się niejednorodnie ze względu na ich odmienną orientację w stosunku do przyłożonych obciążeń. Wraz ze wzrostem odkształcenia różnica między ziarnami zmniejsza się i zmienia się struktura. Ziarna są stopniowo rozciągane w kierunku plastycznego płynięcia (rys. 1.16, c). Wewnątrz ziaren zwiększa się gęstość defektów. W przypadku znacznego odkształcenia powstaje struktura włóknista, w której granice ziaren są ciężko rozróżnialne (rys. 1.16, d), a w metalu pojawia się orientacja krystalograficzna ziaren, która nazywana jest teksturą deformacji. Tekstura deformacji jest wynikiem jednoczesnego odkształcenia ziaren w kilku systemach poślizgu. Zależy ona od typu deformacji, struktury krystalicznej metalu, obecności domieszek i warunków deformowania.



Rys. 1.16. Zmiana mikrostruktury metalu polikrystalicznego przy deformacji (ϵ):
a) 0%; b) 1%; c) 40%; d) 80–90%

Odształcenie plastyczne może wystąpić w różnych temperaturach. Wyróżnia się odkształcenie plastyczne na zimno i gorąco. W wyniku odkształcenia plastycznego na zimno, metal jest wzmacniany, a jego fizyczne i mechaniczne właściwości zmieniają się. Wraz ze wzrostem stopnia odkształcenia (poniżej 0,15-0,2 T_f) właściwości charakteryzujące odporność na odkształcenia wzrastają (σ_e , HRB, itp.), a zdolność do odkształcenia plastycznego – plastyczność (δ i ψ) maleje (rys. 1.17). To zjawisko wzrostu wytrzymałości materiału nazywa się umocnieniem.



Rys. 1.17. Wpływ deformacji plastycznej na właściwości mechaniczne stali

Metal umocniony pochłania 5–10% energii użytej na deformację. Zmagazynowana energia wykorzystywana jest na powstawanie defektów w strukturze krystalicznej (dyslokacje, wakancje, atomy międzywęzłowe). W tym przypadku gęstość dyslokacji wzrasta do 10^9 – 10^{12} cm⁻². Wszystkie defekty budowy krystalicznej zakłócają ruch dyslokacji i w konsekwencji zwiększają odporność na odkształcenia i zmniejszają plastyczność. Najważniejsze znaczenie ma zwiększenie gęstości dyslokacji, ponieważ wynikające podczas tego oddziaływanie między nimi hamuje ich dalsze przemieszczenie. Od początku odkształcenia plastycznego następuje wzmocnienie metali, co jest związane z gromadzeniem się dyslokacji około granic ziaren. Jednakże główne umocnienie przy odkształceniu plastycznym na zimno metali polikrystalicznych jest określone przez charakter wielokrotnego poślizgu w każdym ziarnie.

Przy umocnieniu twardość i opór na rozerwanie wzrastają 1,5–3 razy, a granica plastyczności wzrasta 3–7 razy. Metale z sieciami regularnie ściennie centrowanymi umacniają się silniej od metali z sieciami heksagonalnymi.

Mimo zmniejszenia plastyczności, umocnienie jest powszechnie stosowane w celu zwiększenia wytrzymałości elementów wykonanych metodami obróbki plastycznej na zimno.

Podczas nagrzewania metalu umocnionego zachodzą w nim procesy zdrowienia i rekrytalizacji, co powoduje powrót tych właściwości do właściwości metalu przed deformacją.

Zdrowieniem są nazywane wszystkie zmiany struktury i właściwości, które nie odbywają się poprzez zmianę mikrostruktury zdeformowanego metalu. Czyli rozmiar i kształt ziarna przy zdrowieniu nie zmieniają się.

Rekrytalizacją nazywany jest proces powstawania i wzrostu nowych ziaren o mniejszej ilości defektów struktury. W rezultacie rekrytalizacji powstają całkowicie nowe, najczęściej równoważne kryształy.

W procesie zdrowienia wyróżniane są dwa etapy: odpoczynek i poligonizacja.

Zdrowienie przebiega w temperaturach poniżej 0,2 T_i . Podczas tego następuje zmniejszenie defektów punktowych (wakancji) i ponowna alokacja dyslokacji bez powstawania nowych subgranic.

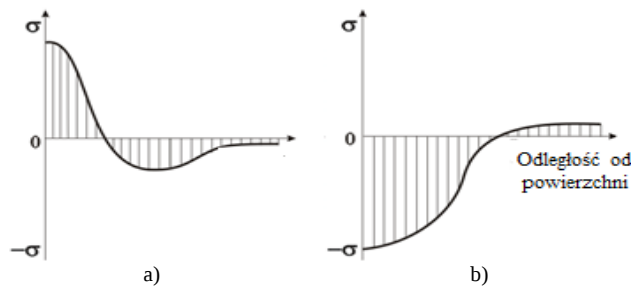
Poligonizacją nazywany jest etap zwrotny przy której występuje rozdrobnienie (fragmentacja) kryształitów na subziarna (poligony) z granicami o małym kącie. Powstają one wskutek poślizgu i pełzania dyslokacji. W rezultacie tego kryształ dzieli się na subziarna, czyli poligony wolne od dyslokacji.

1.4.4. Naprężenia szczątkowe

Ważną cechą stanu cienkich warstw powierzchniowych elementów maszyn jest ich stan naprężeniowy. Pochodzenie naprężeń szczątkowych może być związane zarówno z technologią obróbki jak i z eksploatacją. Naprężenia szczątkowe powstają nie tylko podczas zmiany objętości metalu, ale także w związku z przemianami fazowymi i strukturalnymi w cienkich warstwach powierzchniowych, a także wskutek oddziaływań cieplnych, które powodują deformację szczątkową metalu w lokalnych obszarach warstw powierzchniowych.

Na rys. 1.18 przedstawiono wielkość i znak naprężeń szczątkowych warstw powierzchniowych oraz ich rozkład od powierzchni w głąb metalu dla przypadku obróbki technologicznej i przy eksploatacji elementów maszyn.

W zależności od wielkości obszaru, na którym występują naprężenia, rozróżnia się naprężenia pierwszego, drugiego i trzeciego rodzaju.



Rys. 1.18. Naprężenia szczątkowe w warstwach powierzchniowych stali:
a) przy ostrzeniu; b) przy zużyciu zmęczeniowym

Naprężenia szczątkowe pierwszego rodzaju (makronaprężenia) są zrównoważone w granicach obszarów, których wymiary są porównywalne do wymiarów ciała. W warstwach płasko-równoległych naprężenia pierwszego rodzaju są stałe. Zmieniają się one w kierunku prostopadłym do powierzchni (prawie zawsze występuje gradient naprężeń pierwszego rodzaju na przecięciu, prostopadle do warstwy powierzchniowej).

Naprężenia drugiego rodzaju (mikronaprężenia) zajmują obszary w granicach poszczególnych kryształów lub grupach kryształów. Są one zrównoważone w obszarze jednego lub więcej ziaren krystalicznych i istnieją w płaszczyznach poślizgu.

Naprężenia szczątkowe trzeciego rodzaju (submikroskopowe) są zrównoważone w małych grupach atomów, które leżą na granicy bloków struktury mozaikowej, w płaszczyznach poślizgu i tym podobnych.

Literatura

1. Ахматов А.С., *Молекулярная физика граничного трения*, А.С. Ахматов, М.: ГИФМЛ, 1963, с. 472.
2. Адамсон А., *Физическая химия поверхности*, А. Адамсон, М.: Мир, 1979, с. 568.
3. Боуден Ф.П., *Трение и смазка твердых тел*, Ф.П. Боуден, Д. Тейбор, М.: Машиностроение, 1968, с. 544.
4. Чернець М., *Дослідження та розрахунок трибосистем ковзання, методи підвищення довговічності і зносостійкості*: Т. 1: Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання, М. Чернець, М. Пашечко, А. Невчас, Дрогобич: Коло, 2001, с. 492.
5. *Трение, изнашивание и смазка: Справочник*. В 2-х кн., Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисына, М.: Машиностроение, 1978, Кн. 1, 1978, с. 400.

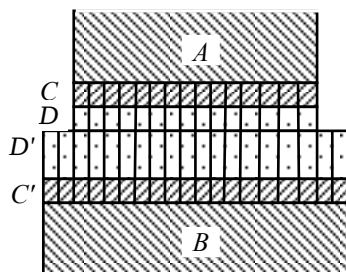
6. Бакли Д., *Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии*, Д. Бакли. Под ред. А.И. Свириденка, М.: Машиностроение, 1986, с. 360.
7. Szczerek M., Wiśniewski M.. *Tribologia i Tribotechnika*. Instytut Technologii i Eksploatacji, Radom 2000.
8. Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa 2002.
9. Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria Powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
10. Kula T., *Inżynieria warstwy wierzchniej*, Łódź 2000.
11. Lawrowski Z., *Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie*, PWN, Warszawa 1993.

ROZDZIAŁ II. MODELOWANIE PROCESÓW TRIBOLOGICZNYCH

2.1. Modele warstwy granicznej

Celem badań warstw powierzchniowych oraz warstw granicznych jest zrozumienie warunków ich powstawania. Ich odporność z reguły zależy od składu chemicznego i struktury. Modele warstwy granicznej i powierzchni tarcia tworzy się na podstawie obliczeń teoretycznych oraz badań eksperymentalnych. Pierwsze modele były przedstawione w bardzo uproszczony sposób. Uważano, że takie warstwy tworzą się na powierzchni metalu i że mają one inne właściwości niż ciecz w fazie objętościowej [1–11].

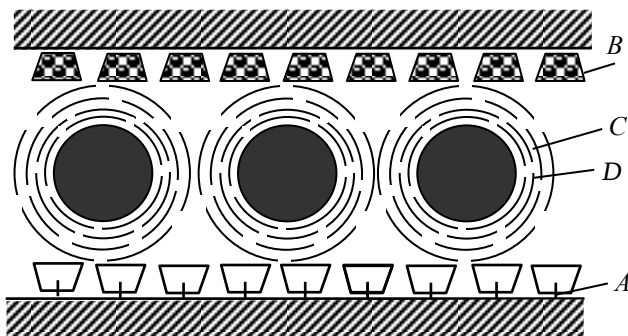
Jednym z najprostszych i jednocześnie ważnych typów struktury granicznych warstw smarnych jest jednorodna struktura warstwowa. Wielu naukowców wyrażało różnorodne przypuszczenia dotyczące wariantu schematu takiej struktury. Wszystkie były bardzo podobne. Uzasadnieniem schematu takiej struktury są wyniki rentgenowskich i elektronograficznych badań. Schematy przedstawiono w pracach Hardi, Walesa, Sauskomba, Wooga, Fiwega i Kluge, Kisskalta, Karplusa oraz innych. Mimo znaczącej wartości prac wymienionych autorów ich ogólny wynik nie wychodzi poza zakres schematu warunkowego struktury warstwy granicznej jako warstwy monokrystalicznej, która rozmieszczona jest na powierzchni metalu, i którą z kolei traktują jako geometrycznie idealną płaszczyznę. W modelach próbowano oddzielić tylko przygraniczną warstwę wskazując kilka jej właściwości. Przykładem takiego modelu jest model Wooga (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Model utworzenia warstw granicznych Wooga:
A – metal; B – warstwa cząsteczek polarnych; C – cząsteczki niepolarne

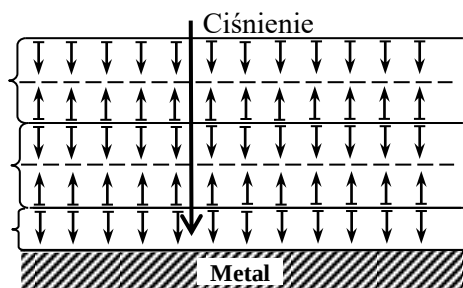
Interesującym także jest model warstwy granicznej zaproponowany przez A.W. Blooma (rys. 2.2). W modelu Blooma polarne cząsteczki smaru tworzą kulistą micelę koloidalną otoczoną elastyczną (sprężystą) powłoką buforową. Kuliste micelle nie pozwalają zbliżyć się kontaktującym powierzchniom, które się zużywają. Tworzą one coś podobnego na kształt łożyska ślizgowego i dzięki temu charakteryzują się małym oporem tarcia. Do utworzenia kompleksów kulistych, według Blooma, szczególnie mają zdolność węglowodory o strukturze

pierścieniowej (np. typu cykloheksanu) czym uzasadnia się dobre właściwości smarów typu naftenowego. Węglowodory parafinowe nie tworzą kompleksów kulistych, a sam proces rafinacji usuwa związki pierścieniowe, przekształcając je na łańcuchowe. Jest to przyczyną pogorszenia się właściwości smarów. Procesy rafinacji niszczą większe micelle, ponieważ izokolid przechodzi w homogeniczną ciecz. Bloom stwierdził, że procesy, które ułatwiają utworzenie kompleksów molekuł polepszają właściwości smarujące środków smarnych. Przykładem jest oddziaływanie elektryczne (woltalizacja).



Rys. 2.2. Model Blooma: A – związane i zorientowane molekuły; B – koloidalne kompleksy molekuł smarów, które wyznaczają jego lepkość; C – przezroczysta solwatyacyjna powłoka, która ma działanie buforowe; D – siły walencyjne powierzchni, które łączą molekuły smaru

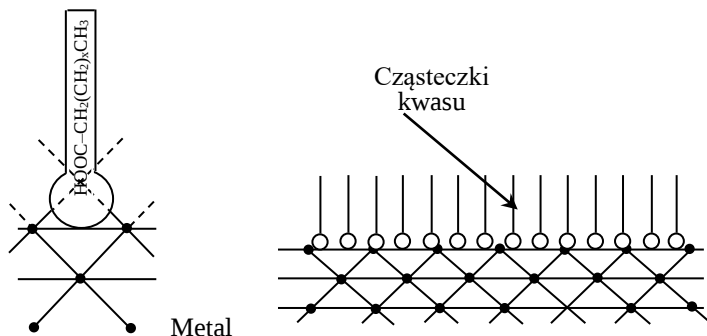
Twierdzenia o uporządkowaniu cząstek oraz ich prostopadłej orientacji do powierzchni spowodowały utworzenie nowych teorii na temat warstwy granicznej. Na rys. 2.3 przedstawiony został model Karplusa na którym grotami strzałek zaznaczono grupy polarne molekuł, a przeciwne końce pokazują grupy CH_3 . W następnych modelach strzałki zamieniono pałeczkami.



Rys. 2.3. Struktura granicznej warstwy smarowej Karplusa

Pałeczka jest umownym symbolem cząstki kwasu tłuszczowego. Wierzchołek pałeczki jest polarną grupą kwasową – COOH , reszta pałeczki – łańcuchem węglowodanu (rys. 2.4), który składa się z oddzielnych węglowodorów CH_2 i kończy

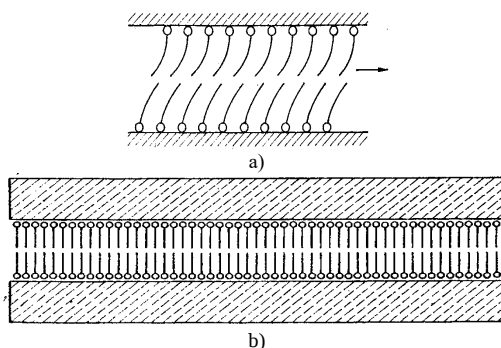
się CH_3 . Molekuły kwasów utrzymują się w stanie zorientowanym na powierzchni metalu wskutek działania słabych sił oddziaływań międzycząsteczkowych.



Rys. 2.4. Orientacja cząsteczek kwasów tłuszczowych na powierzchni metalu

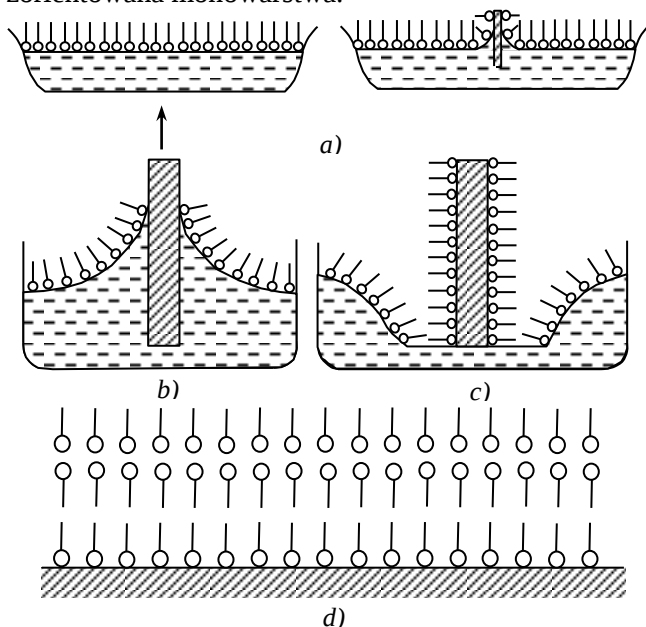
- | – źródło węglowodorowe
- – grupa kwasowa
- – atomy metali (w sieci krystalicznej)
- – wysokie siły międzycząsteczkowe
- – słabe siły międzycząsteczkowe (nadają powierzchni metalu właściwości adsorpcyjne)

Hardy wykorzystuje model pałeczkowy (rys. 2.5), za pomocą którego naocznie demonstruje mechanizm działania smarnych monomolekularnych warstw adsorpcyjnych kwasów tłuszczowych. Wyjaśnia on działanie smarowe warstwy granicznej tak zwaną szczotką molekularną. Przy czym im dłuższe cząstki zaadsorbowane na powierzchni tym większa jest odległość pomiędzy powierzchniami i tym bardziej zmniejsza się wzajemne oddziaływanie. Dlatego też, występuje znaczne zmniejszenie współczynnika tarcia przy obecności kwasów tłuszczowych o długim łańcuchu. Według Hardy'ego i innych naukowców statyczny współczynnik tarcia stal o stal ($f = 0,75 \div 0,80$), albo szkła o szkło ($f = 1$) po naniesieniu na powierzchnie adsorpcyjnych zorientowanych warstw kwasu stearynowego zmniejsza się do 0,1, a dla kwasów tłuszczowych wartość ta jest jeszcze mniejsza.



Rys. 2.5. Model Hardy'ego powstawania warstw granicznych: a) szczotka molekularna w modelu Hardy; b) warstwa graniczna

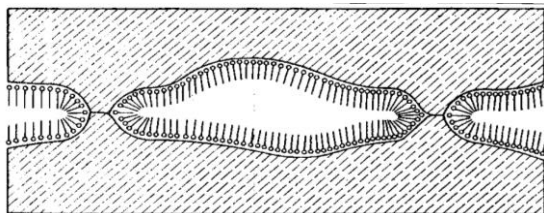
Langmuir przedstawił model przenikania pojedynczej warstwy z powierzchni cieczy na płaską powierzchnię ciała stałego (rys. 2.6). Wystarczy zanurzyć w pojemniku z wodą odpowiednią płytkę i po wytworzeniu na powierzchni wody zorientowanej monowarstwy wyciągnąć ją. W początkowym etapie płytka ciągnie za sobą warstwę wody z zorientowaną monowarstwą. Jednakże, woda szybko spływa pod wpływem siły ciężkości, pozostawiając monowarstwę wody na płycie (rys. 2.6 a, b, c). Ten sposób może być stosowany do wytwarzania wielowarstwowych (multimolekularnych) warstw. W tym celu należy wyjętą płytkę z wody zanurzyć w cieczy (zmniejszając obszar powierzchni wody) pokrytej substancją organiczną. Po zanurzeniu płytki osiada na niej druga monowarstwa molekuł, ale już z innym kierunkiem molekuł (rys. 2.6, d). Grupy metylowe drugiej warstwy są odwrócone w kierunku powierzchni stałej, a karboksylowe polarne – skierowane są na zewnątrz. Tak więc na powierzchni płytki tworzą się dwie monowarstwy połączone między sobą grupami metylowymi. Jeśli nadal będziemy zamurzać płytkę – tworzy się następna odpowiednio zorientowana monowarstwa.



Rys. 2.6. Nałożenie jedno- i wielocząsteczkowych warstw: a) warstwa jednocząsteczkowa; b) nałożenie warstwy jednocząsteczkowej; c) nałożenie warstwy wielocząsteczkowej; d) warstwa wielocząsteczkowa

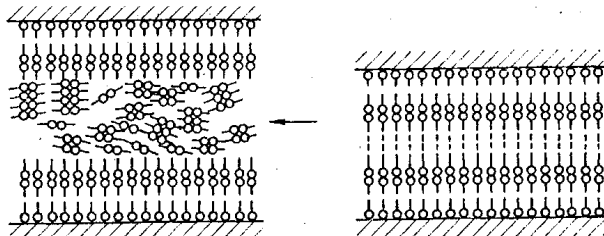
Całkowitą liczbę pojedynczych monowarstw, które tworzą powłokę, można zwiększyć do tysięcy, uzyskując w ten sposób całkowitą grubość warstwy około 2 μm i powyżej. Podobną jednorodną strukturę takiej grubej warstwy multimolekularnej uzyskuje się tylko w określonych warunkach i za pomocą odpowiednich materiałów.

Model Bowdena jest bardzo podobny do modelu Hardy, z tą różnicą, że w nim podkreślono (zauważoną) nieciągłość warstwy granicznej na powierzchniach styku (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Model Bowdena (z uwzględnieniem nieciągłości warstwy granicznej)

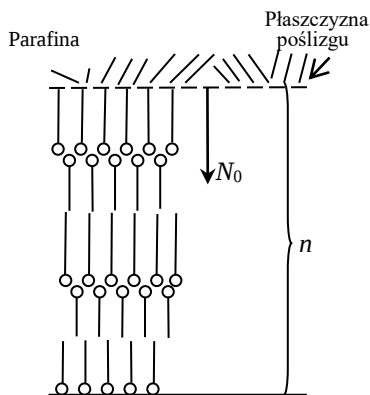
Prace Hardy'ego, Bowdena i Langmuira opublikowane w czasopismach branżowych nie zostały zrozumiane. Zostały zaakceptowane przez specjalistów w sferze produkcji i wykorzystania materiałów smarujących. Właściwości smaru oceniano przede wszystkim w oparciu o jego lepkość, temperaturę utwardzania i zapłon. Natomiast takie właściwości jak smarowanie i utworzenie przez smar warstwy granicznej przez długi czas traktowane było, jako nie mające żadnego praktycznego znaczenia „nowinki naukowe”. Modele warstwy granicznej zaczęły rozwijać się dopiero w pierwszej połowie lat 30. ubiegłego wieku. Przykładem może być przedstawiony model Burstina (rys. 2.8). Podobny model można znaleźć w publikacjach Piłata.



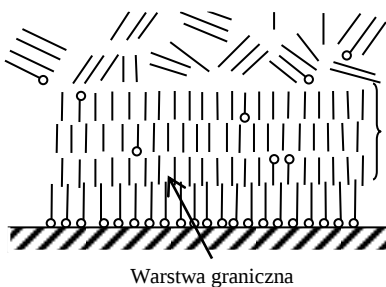
Rys. 2.8. Model Burstina tworzenia warstw granicznych

Przez dłuższy czas wykorzystywane były głównie modele pałeczkowe, mimo tego, że do smarów zaczęto dodawać więcej różnych dodatków smarnych. Na przykład w przypadku smarów EP (extreme pressure) dużą trwałość warstwy granicznej uzyskuje się wskutek dodawania dodatków smarnych o odpowiedniej budowie chemicznej, która różni się od budowy składnika wiążącego, które były przedmiotem klasycznych badań Hardy'ego, Langmuira i Bowdena. Wraz ze zmianą rodzaju związków, które tworzą smarne warstwy graniczne, zmienia się ich zdolność do sorpcji oraz budowa warstwy. Nie jest to w pewnym stopniu odzwierciedlone w podanych w literaturze technicznej modelach warstwy granicznej. Przykładem mogą być modele Deriagina (rys. 2.9, 2.10). W wyniku badań doświadczalnych ujawniono, że w warstwach granicznych o grubości

około $0,1\ \mu\text{m}$ można zauważyć równoległe ułożenie wszystkich molekuł, zwykle prostopadych do powierzchni podłoża stałego. Układ ten jest obserwowany w kwasach tłuszczowych i innych substancjach organicznych. Interesujący jest fakt braku orientacji molekuł w warstwie czystego oleju wazelinowego i pojawienie się tej orientacji w warstwie o grubości $0,1\ \mu\text{m}$ na podłożu metalowym. Zachodzi to w tych przypadkach, gdy do składu oleju wazelinowego dodano małą ilość ($0,15\%$) RPA, np. kwasu stearynowego. Zjawisko to można wytłumaczyć adsorpcją substancji aktywnych na powierzchni metalu, które tworzą zorientowane słupki molekularne mające zdolność do przekazywania tej samej prawidłowej orientacji molekułom umieszczonym nad warstwą oleju wazelinowego. Samodzielnie olej wazelinowy pod wpływem działania stałej substancji nie jest zdolny podobnie się zorientować.



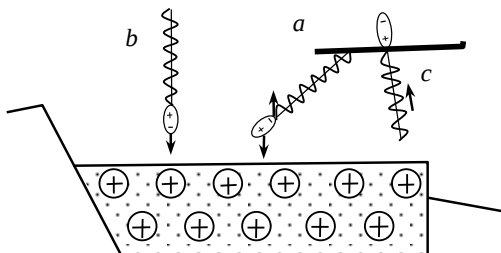
Rys. 2.9. Działanie smarnej warstwy multimolekularnej stearynianu baru pomiędzy szkłem i parafiną



Rys. 2.10. Wpływ zaadsorbowanej monowarstwy molekuł polarnych na orientację molekuł niepolarnych rozpuszczalnika

Teoria warstwy granicznej Achmatowa opiera się na adsorpcji kwasów tłuszczowych na powierzchni metalu. Uważa on, że nasycone kwasy tłuszczowe zbudowane są z skoordynowanych dimerów. Pierwsza najbliższa elementarna warstwa adsorpcji do powierzchni jest bezpośrednio połączona z metalem

grupami polarnych molekuł. Polarne molekuly, wykonując ruch cieplny w środowisku gazowym lub ciekłym stykają się z powierzchnią metalową. Jeśli molekula jest skierowana do powierzchni swoim końcem polarnym, mocuje się ona jednym ze środków ciężkości i orientuje w przybliżeniu pionowym do powierzchni. Mechanizm tego procesu przedstawiono na rys. 2.11.

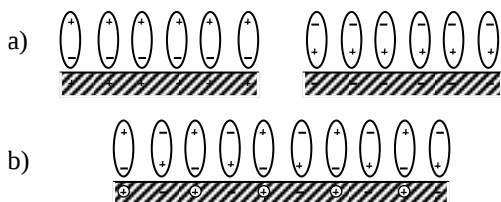


Rys. 2.11. Schemat orientacji molekuł polarnych przy adsorpcji na powierzchni metalu: a – prawidłowo zorientowana molekula przyciągnięta powierzchnią; b – grupa polarna, która zbliża się do powierzchni i podlega działaniu momentu obrotowego; c – nieprawidłowo zorientowana molekula odpychana powierzchnią

Langmuir, Hardy i Dieriajin przypuszczali, że możliwe jest przenoszenie molekuł przez ich obrót o 180° przy przejściu do bardziej stabilnego stanu orientacji. Achmatow uważa, że przejście (przewrócenie) takich niestabilnych zorientowanych molekuł w przestrzeni granicznej pęknięcia z jednej powierzchni na drugą jest prawdopodobne.

Rozpatrując powierzchnię metalu z punktu widzenia schematu Gertsfelda można założyć, że w nasyconej monomolekularnej warstwie grupy karboksylowe oddziałują z prawidłową przemianą mikrocząstek sieci krystalicznej przeciwnych znaków (rys. 2.12).

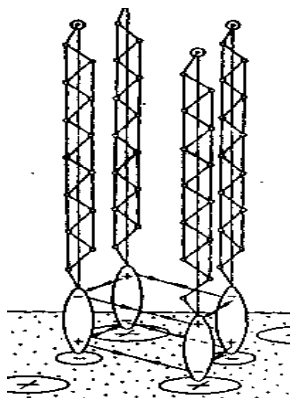
Z tego powodu, sąsiadujące grupy karboksylowe molekuł kwasów tłuszczowych mają prawidłową po kolei dodatnią i ujemną orientację ich momentów elektrycznych. Rys. 2.13 przedstawia schemat tego oddziaływania. Sąsiednie grupy polarne zaadsorbowanych molekuł połączone są między sobą siłami oddziaływania orientacyjnego dipoli, co powinno zwiększyć wytrzymałość takiej struktury. Cztery molekuly kwasów tłuszczowych $(\text{CH}_3\text{CH}_2)_{13}\text{COOH}$ są adsorbowane na czterech sąsiednich aktywnych centrach powierzchni metalu, które mają różne znaki. Dipolowe grupy molekuł COOH są związane pomiędzy sobą siłami orientacyjnymi.



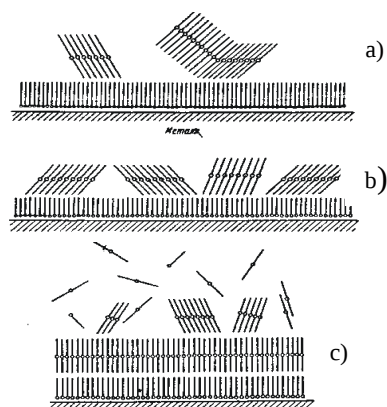
Rys. 2.12. Schemat orientacji dipoli na powierzchniach, naładowanych dodatnio lub ujemnie (a) i na powierzchni metalu (b)

Obecność takiej struktury została potwierdzona przez dobrze znany schemat idealnej warstwy granicznej jako warstwowego układu idealnie prawidłowych molekularnych warstw z całym szeregiem równoważnych powierzchni smarujących o płaszczyznach łatwego poślizgu. Schemat procesu tworzenia multimolekularnej warstwy granicznej z dimerów przedstawiono na rys. 2.14.

Achmatow uważa, że w warstwach granicznych karboksylowe końce molekuł nigdy nie są wolne, chyba że bierze się pod uwagę efekty termiczne lub chemiczne. W związku z tym można więc przyjąć, że po pojawieniu się na metylowej powierzchni poszczególnych dimerów w różnych stanach początkowej orientacji musi nastąpić tworzenie pojedynczych „pakietów” dimerów (rys. 2.14, a). W procesie wzrostu tych „pakietów” w kierunkach prostopadłych do osi dimerów, przyjmują one postać krystalicznych płatków. Nie będą one jednak trwałymi monowarstwami na powierzchni metylowej. Siły o tej samej dyspersyjnej naturze będą aktywnymi momentami, które dążą do tego, aby grupy metylowe z serii dimerycznej zbliżyły się do płaszczyzny monowarstwy metylowej. W wyniku tego oddziaływania pojawia się wysepek rzędu zorientowanych dimerów. Całkiem prawdopodobnym jest, że orientacja tych pakietów nie będzie taka sama (rys. 2.14, b). Jednak wraz ze wzrostem liczby wysepek można się spodziewać, że orientacja zostanie taka sama i bliska do pionowej (rys. 2.14, c).



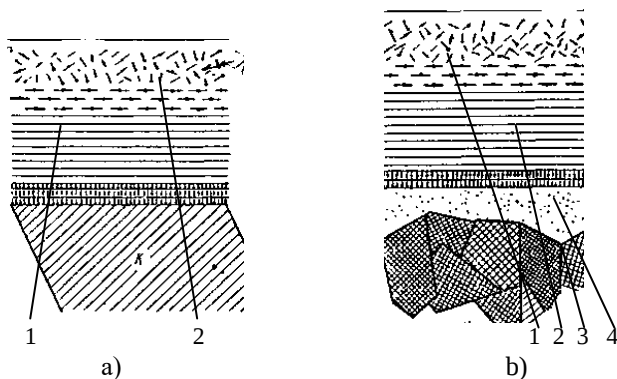
Rys. 2.13. Model Achmatowa adsorpcji cząsteczek kwasu tłuszczowego z uwzględnieniem oddziaływań bocznych między grupami polarnymi



Rys. 2.14. Model Achmatowa utworzenia multimolekularnej warstwy dimerów adsorbowanych molekuł polarnych kwasów tłuszczowych

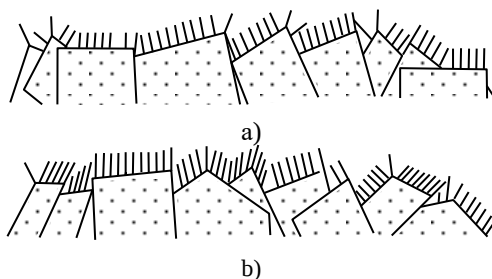
Podany obraz adsorpcji molekuł i tworzenia granicznej warstwy adsorpcyjnej nie wyjaśnia wielu ważnych szczegółów tego procesu, które są spowodowane budową rzeczywistych sieci krystalicznych na powierzchni metalu. W modelach

Achmatowa po raz pierwszy podłoże metalu nie jest czymś nieokreślonym, jest przedstawione na modelach w postaci linii, i rozróżnia się ciała jako mono- i polikrystaliczne (rys. 2.15).

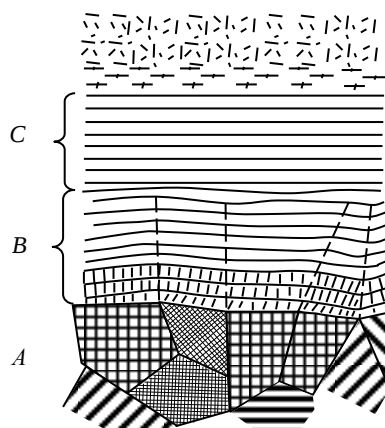


Rys. 2.15. Model Achmatowa utworzenia warstwy granicznej na powierzchni mono- oraz polikryształ: a) adsorpcja na monokryształ; b) adsorpcja na polikryształ; 1 – warstwa graniczna; 2 – monokryształ; 3 – adsorpcja na monokryształ; 4 – warstwa przygraniczna

Achmatow przedstawia również oddziaływanie boczne między grupami polarnymi, jednak nie uwzględnia współdziałania bocznych łańcuchów między sobą (rys. 2.16). W modelach gdzie ciało krystaliczne reprezentowane jest jako mono- i polikryształ (rys. 2.17 i 2.18) zjawisko to jest rozpatrywane w dwóch oddzielnych strefach pomiaru: molekularnej (adsorbowane cząsteczki) i mikrostrukturalnej (polikryształ). Podczas gdy regułą tribologiczną jest rozważenie zjawisk z tej samej strefy pomiaru.

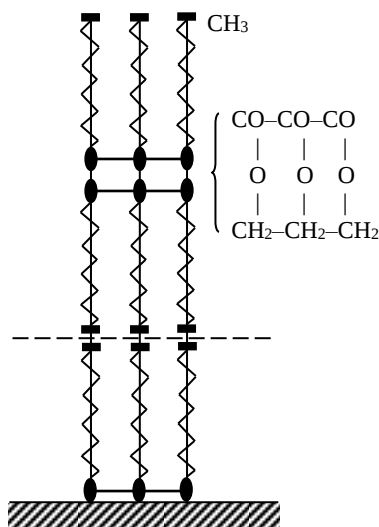


Rys. 2.16. Model Achmatowa warstwy granicznej na powierzchni polikrystalicznej: a) zbudowanej z jednakowych kryształów; b) zbudowanej z mieszanych kryształów



Rys. 2.17. Schemat struktury smarnej warstwy granicznej na powierzchni metalu:
 A – polikrystaliczna powierzchnia metalu; B – polikrystaliczna strefa warstwy granicznej; C – monokrystaliczna strefa

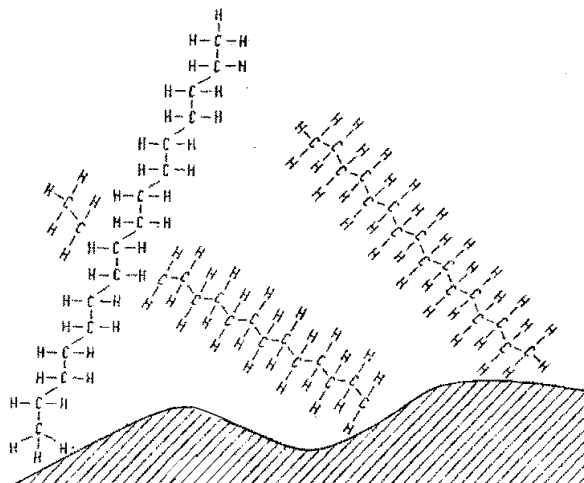
Model Marelina przedstawia obszary warstwy powierzchniowej razem z warstwą graniczną. W modelu tym występują warstwy złożone z dimerów. Znajdują się one powyżej nieznanych związków, które z niewiadomych przyczyn są zwrócone do nich grupami polarnymi, które się wzajemnie nie odpychają. Natomiast końce niepolarne molekuł tworzą płaszczyznę łatwego poślizgu, prawdopodobnie z powodu wzajemnego odpychania.



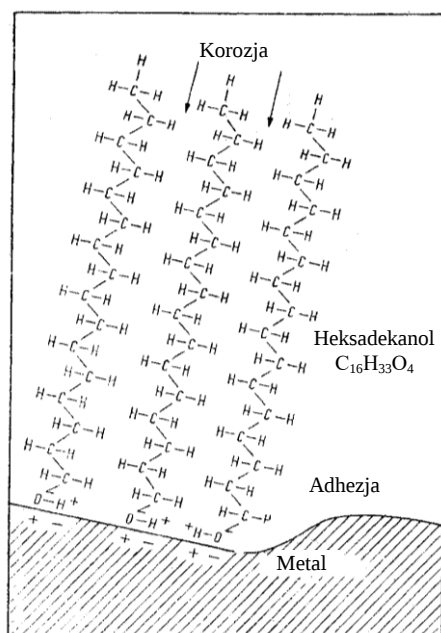
Rys. 2.18. Model Achmatowa adsorpcji tłuszczu (trójglicerynowy kwas tłuszczowy)

Dla chemików bardzo interesującym modelem jest model Godfreya adsorpcji niepolarnego n-heksadekanu (rys. 2.19), polarnego heksadekonolu (rys. 2.20),

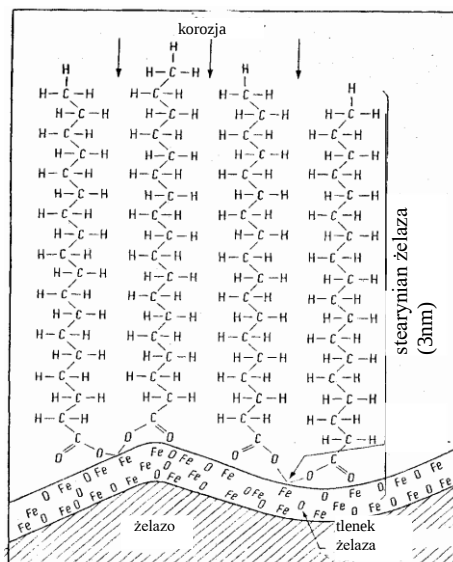
a także chemosorpcji tłuszczów stearynowych z tworzeniem mydła metalicznego na powierzchni żelaza (rys. 2.21).



Rys. 2.19. Model Godfreya adsorpcji niepolarnego heksadekanu na osnowie metalowej



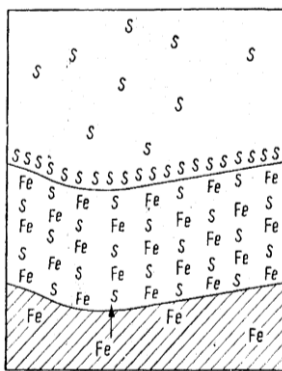
Rys. 2.20. Model Godfreya adsorpcji polarnego heksadekanolu na osnowie metalowej



Rys. 2.21. Model Godfreya chemosorpcji kwasu stearynowego na powierzchni metali (stearynian żelaza)

Modele te uwzględniają boczne oddziaływanie kohezyjne między łańcuchami, a także wpływ tlenku żelaza na chemosorpcję kwasu stearynowego, który absorbuje w tych modelach.

Godfrey przedstawia schemat wpływu smaru chemicznego zawierającego siarkę z utworzeniem na powierzchni FeS (rys. 2.22).

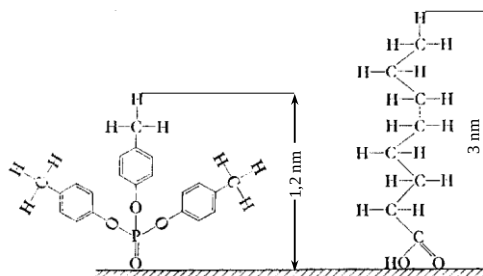


Rys. 2.22. Model Godfreya utworzenia na powierzchni żelaza FeS jako skutek oddziaływania smaru zawierające siarkę

Niepoprawnym będzie stosowanie modeli opartych na węglowodorach, parafinach, alkoholach i kwasach tłuszczowych zwłaszcza w przypadku stosowania dodatków (np. przeciwzużyciowych, zatarciowych i polepszających

właściwości smarne). W literaturze istotne jest omówienie mechanicznego wpływu dodatków smarnych, ale jest to trudne do wykonania w oparciu o substancje, które nie są stosowane jako dodatki.

Takie pytania rozważa Winogradowa, podając uproszczony schemat adsorpcji (rys. 2.23), podczas gdy w przypadku wielu innych dodatków smarnych niewiele wiadomo o ich właściwościach adsorpcyjnych.



Rys. 2.23. Model adsorpcji Winogradowej: a) $C_3PO_4H_9$; b) kwas stearynowy

Modele, oprócz rozważania nad budową warstwy granicznej, mogą bardzo pomóc w ustaleniu mechanizmów ich powstawania. Dla warstwy granicznej przyjmuje się wymóg trwałości i odporności na przerywanie.

Rozważając mechanizm powstawania warstwy granicznej należy zwrócić uwagę:

- co adsorbuje? (rodzaj i budowa cząsteczek),
- na czym adsorbuje? (rodzaj i właściwości powierzchni),
- warunki adsorpcji (temperatura, ciśnienie, czas kontaktu, itd.).

Podczas procesu adsorpcji można zdefiniować kilka ważnych etapów:

- przyciągania cząstek do ciała stałego,
- ich położenie na powierzchni,
- związek cząstek z podłożem.

Podczas zachodzącego procesu adsorpcji można określić kilka ważnych etapów:

- przyciąganie cząsteczek do ciała stałego,
- rozmieszczenie cząsteczek na powierzchni,
- związek cząsteczek z podłożem.

Podczas procesu we wszystkich jego stadiach decydującą rolę odgrywa wzajemny wpływ pomiędzy adsorpcyjnymi cząsteczkami i powierzchnią ciała stałego. Ten wpływ może być bardzo intensywny.

Modele warstwy granicznej powinny umożliwić:

- analizowanie budowy przestrzennej cząsteczek, umożliwiając intensywne oddziaływanie elektrostatyczne oraz elektrodynamiczne z powierzchnią,
- przedstawiać modele powierzchni podstawowych materiałów, które stosuje się dla konstrukcji węzłów tarcia z uwzględnieniem elementów ich budowy (atomy, jony, cząsteczki, itd.), oraz pola sił na tych powierzchniach,
- analizowanie problemów geometrycznego dopasowywania (przestrzennego), które są energetycznie związane z lokalizacją cząsteczek, zaadsorbowanych na powierzchni,
- obliczenia oddziaływania pomiędzy cząsteczkami i powierzchnią, a także oddziaływania bocznego pomiędzy cząstkami.

Prawidłowo zaprojektowane modele warstw granicznych mogą mieć duże znaczenie praktyczne. Powinny one dać możliwość odpowiedzi na pytania:

- jaka ma być wybrana powierzchnia biorąc pod uwagę rodzaj materiału (sposób obróbki powierzchni, centra aktywne), aby utworzyć najbardziej korzystne warunki dla formowania stabilnej warstwy granicznej,
- w jaki sposób struktura krystalograficzna powierzchni i mikro wady wpływają na oddziaływanie cząstek adsorpcyjnych,
- w jaki sposób wybrać rozmiar i budowę przestrzenną cząstki adsorpcyjnej, żeby można było utworzyć stabilną warstwę graniczną na tej powierzchni (geometryczne i energetyczne dopasowywanie),
- w jaki sposób mają być umieszczone ładunki elektrostatyczne, grupy polarne i momenty dipolowe, żeby uzyskać niezbędną orientację przestrzenną cząsteczek na powierzchni,
- jakie jest prawdopodobieństwo przebiegu głównych płaszczyzn poślizgu przy przemieszczeniu smarnych elementów w stosunku do siebie, ponieważ tym są zdefiniowane fizykochemiczne właściwości tarcia granicznego.

Model, który mógłby dać odpowiedzi na te pytania i stworzyć stabilną warstwę graniczną z pożądanymi właściwościami, może być zbudowany w wyniku przeprowadzenia odpowiednich obliczeń, a także badań z wykorzystaniem nowoczesnych metod fizycznych i chemicznych, zwłaszcza takich jak spektroskopia Auger'a, XPS, SIMS, analiza mikrorentgenospektralna i innych.

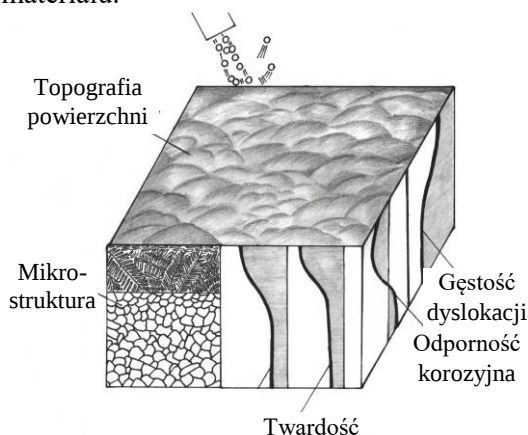
2.2. Modelowanie innych rodzajów tarcia

W skali makro powierzchnia wykonuje podobne funkcje, jak granica ziaren lub bloku mozaiki w skali mikro. Obserwacje te potwierdza się charakterem rozmieszczenia atomów w fizycznie czystej warstwie powierzchniowej, obecnością w niej dyslokacji i płaszczyzn poślizgu, niejednorodnością składu chemicznego, co przejawia się w segregacji elementów zanieczyszczających i składników stopowych, określoną mikrogeometrią powierzchni. W ten sposób

tworzy się odpowiedni stan energetyczny, który jest odpowiedzialny za poziom energii swobodnej.

Odtwarzając rzeczywistą budowę granic ziaren, ułatwiając uwalnianie lub rozpuszczanie fazy wzdłuż nich, uzyskując odpowiedni stopień dyspersyjności struktury i regulując stopień defektności granic, można uzyskać wymagane właściwości materiału. Wiemy, że „krystalograficzna” szerokość granicy ziarna według Fishera wynosi około 5×10^{-8} cm, zaś warstwa międzykrystaliczna z nierównoważną segregacją i zwiększonym poziomem energii swobodnej w stosunku do ziarna ciała wynosi około mikrona, co jest o kilka rzędów wielkości większa. Poziom nadwyżki energii zależy od wzajemnej orientacji kontaktujących ziaren i osiąga wartość maksymalną przy pewnych kątach dezorientacji. Istnieją mocne dowody tego, że w międzykrystalicznej warstwie stopień uporządkowania atomów różni się znacznie od orientacji w objętości ziarna. Oznacza to, że możemy mówić o quasiuporządkowanej, quasiamorficznej budowie granic ziaren.

Jeżeli w cienkich warstwach powierzchniowych materiału tworzyć będziemy pewny strukturalno-fazowy i energetyczny stan to można celowo zmieniać właściwości funkcjonalne materiału (rys. 2.24). Jest to możliwe dzięki formowaniu na powierzchni odpowiednich powłok lub odpowiednich warstw barierowych, które zapewniają istnienie optymalnego stanu termodynamicznego z niezbędnym poziomem właściwości. Dowolny stabilny strukturalno-fazowy stan istnieje dość krótko, przechodząc do nowego poziomu niestabilności wskutek procesów, które zwiększają ogólną entropię i odpowiednio zmniejszają energię swobodną materiału.



Rys. 2.24. Schemat zmiany właściwości funkcjonalnych materiału przy tworzeniu zadanego stanu strukturalno-fazowego i energetycznego powierzchni

W wyniku tego zachodzi następne przejście do nowego, stanu quasistabilnego. Proces ten trwa określony czas, który jest zdefiniowany fizykochemicznymi osobliwościami przepływu odpowiednich przemian

(reakcji). Możliwe jest utworzenie warunków, w których te przemiany będą występować z jak najmniejszą częstotliwością.

Znaczący wpływ na stan powierzchni mają czynniki zewnętrzne między innymi takie jak skład środowiska, temperatura, zwilżalność, poziom nacisków jednostkowych przy tarcia, czas oddziaływania i inne. Aby zapewnić dużą trwałość eksploatacji materiałów koniecznym jest formowanie odpowiedniej kompozytowej dyspersyjnie wzmocnionej struktury gradientowej, tworzyć strukturę drobnoziarnistą lub cienkowłóknistą z jednorodnym rozkładem oraz dużą gęstością upakowań pojedynczych fragmentów struktury. Materiały takie mają bardzo rozwinięte powierzchnie wewnętrzne międzyfazowe i zewnętrzne, na których obserwuje się aktywne procesy adsorpcyjne. W zależności od poziomu zwilżalności i stopnia rozwoju oddziaływań adhezyjnych rozróżnia się procesy tarcia lub korozji.

W procesie tarcia odbywa się zużycie powierzchni materiału czemu towarzyszą złożone procesy fizyko-mechaniczne i chemiczne. To spowodowało powstanie licznych teorii tarcia, które z punktu widzenia mechaniki, fizyki molekularnej, inżynierii materiałowej i termodynamiki próbują wyjaśnić charakter skomplikowanych i różnorodnych zjawisk charakterystycznych dla ścierania. Ponieważ zmiana rodzajów tarcia powoduje zmianę dominujących przy tym procesów. Aby zbudować uogólniony model powierzchni tarcia, koniecznym jest dokładne zbadanie natury tych zjawisk.

Jasno określone procesy mechanochemiczne zachodzą na powierzchniach tarcia. Zjawiska te nie ograniczają się do formowania anomalnie czystych powierzchni wolnych od adsorbowanych zanieczyszczonych warstw lub od powłok chemosorbowanych takich, jak warstwy tlenku. Nie są one ograniczone do czysto mechanicznego procesu aktywacji, który ma miejsce podczas sprężystych odkształceń i uzyskuje rozwój na międzyatomowych związkach oraz defektach powierzchniowych. Mechanochemiczne zjawiska przejawiają się w zwiększeniu wad atomarnie czystych (juwenilnych) warstw z następującą możliwością ich amorfizacji z jednoczesnym dyspergowaniem bloków mozaiki w pojedynczych krystalitach.

Należy przeanalizować wszystkie tribochemiczne zjawiska zachodzące w wyniku oddziaływania kontaktowego materiałów. Rozwój teorii Rebindera adsorpcyjnego zmniejszenia wytrzymałości w wyniku deformacji ciał stałych wskazuje na obowiązkowe tworzenie przy tym adsorpcyjno-uplastycznionej warstwy. Wyjaśnia się to na podstawie idei o istnieniu bariery energetycznej wyjścia dyslokacji, które ciągle pojawiają się, poruszają się i wychodzą do powierzchni podczas deformacji plastycznej. Uplastycznienie adsorpcyjne warstwy granicznej jest uważane jako szczególne zjawisko tribochemiczne czemu towarzyszy jednoczesne wzmocnienie nadsubtelnej warstwy powierzchniowej. Uogólniając te zjawiska, Kragielski formułuje zasadę dodatniego gradientu wytrzymałości przy przesunięciu. Zlokalizowany dodatni

gradient odporności przesunięcia może być spowodowany przez obecność zewnętrznych warstw smarnych lub adsorpcyjną plastyfikację metalu.

W warunkach wysokiej chropowatości powierzchni, naciski lokalne, a odpowiednio i naprężenia ścinające osiągają duże wartości spowodowane małymi obszarami kontaktu rzeczywistego. Dlatego adsorpcyjne ułatwienie odkształcenia plastycznego oraz następne wzmocnienie wskutek zdyspersgowania struktury zmniejsza czas docierania.

Korozja, która ma wiele wspólnego z procesami tarcia, charakteryzuje się pewnymi różnicami w przebiegu zjawisk fizycznych i chemicznych na granicy "środowiska materialnego". W konsekwencji, aby skonstruować uogólniony model zjawisk zachodzących na powierzchni materiału w warunkach tarcia i korozi, wskazane jest rozważenie na pierwszy rzut oka różnych zjawisk z jednego punktu widzenia.

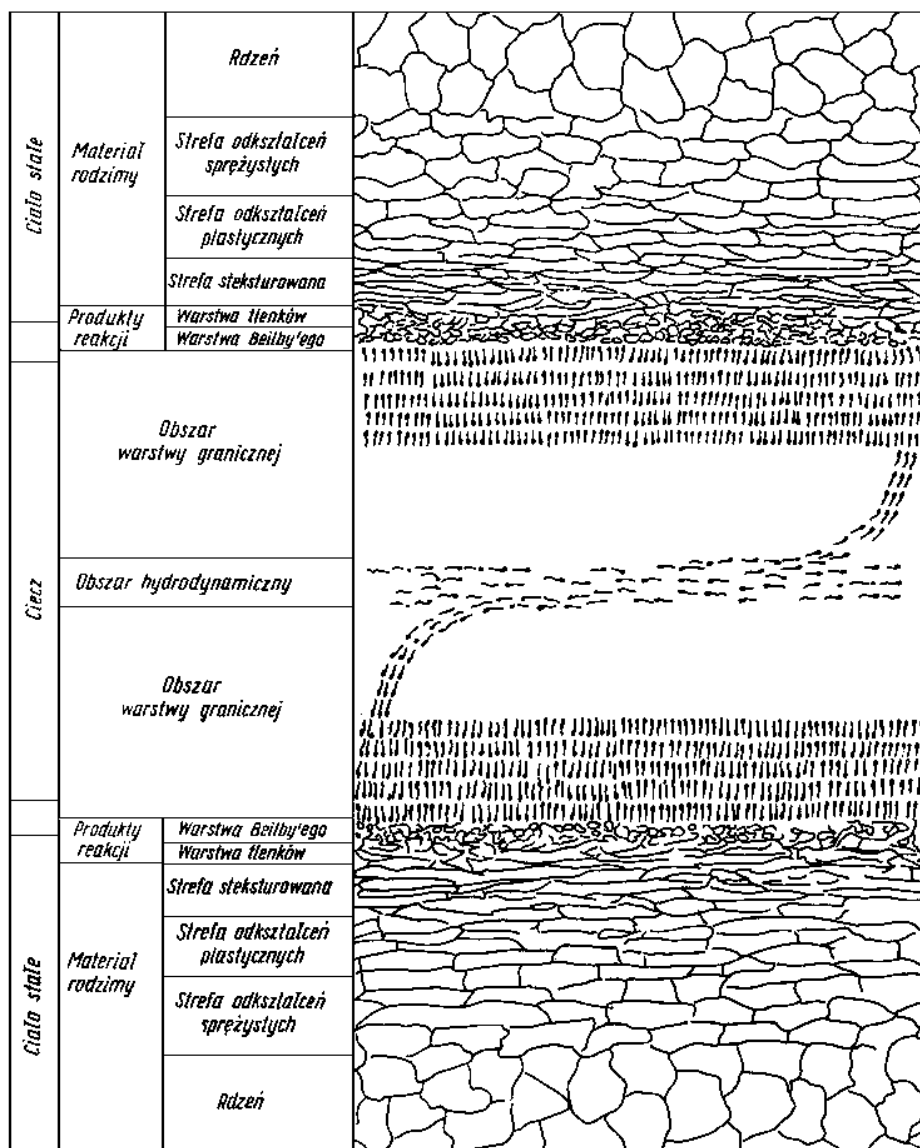
W ten sposób sztucznie tworząc w warstwach powierzchniowych strefy z określoną submikrostrukturą i stanem naprężenia, albo otrzymując ich przy oddziaływaniu kontaktowym, możliwe jest wydłużenie czasu trwania stanu termodynamicznego, który zapewni warunki do samoorganizacji powierzchni. W zależności od rodzaju zjawisk, które rozwijają się na granicy międzyfazowej rozróżniane są procesy tarcia lub zjawiska korozyjne. Przy tym powierzchnia zachowuje się jak żywy organizm, który nieustannie się zmienia. Czynniki zewnętrzne aktywizują rozwój procesów adsorpcji i dyfuzji na granicy podziału faz lub w tych fazach. Dlatego inicjując kierunek przepływów dyfuzji można kontrolować przepływem elementów przenoszonych. W ten sposób powstają warunki do tworzenia w warstwach przypowierzchniowych wymaganych (niezbędnych) faz. Regulując i utrzymując kinetykę tych procesów można otrzymać na powierzchni strukturalno-fazowy i energetyczny stan zapewniający określone własności funkcjonalne.

W związku z powyższym należy zauważyć, że na przebieg procesu tarcia istotny wpływ ma segregacja powierzchniowa atomów. Zostało to potwierdzone w badaniach stopów układów Fe-C, Fe-Al, Fe-Si, Cu-Al, Cu-Sn. Zidentyfikowano migrację atomów C, Si i Al do powierzchni w procesie tarcia. Zauważono niejednoznaczny wpływ segregowanych atomów węgla na właściwości antyfrukcyjne. Z jednej strony, obecność węgla na powierzchni tarcia zmniejsza oddziaływanie adhezyjne ciał kontaktujących, z drugiej zmniejsza efektywność smarowania. Zmianę właściwości mechanicznych warstw powierzchniowych można wyjaśnić poprzez efekt Rebindera. Zaobserwowano segregację atomów C i Si przy obróbce frukcyjno-wzmacniającej Armco-Fe, stali C40, C90, X12CrNiTi18-10. Określone zjawisko zachodzi także przy zużyciu dyspersyjnie wzmocnionych kompozytowych stopów eutektycznych na osnowie układu Fe-Mn-C-B-Si. Na powierzchni tarcia segregują atomy C, B, Si.

W ten sposób w otwartych systemach z kooperatywnym charakterem mikroprocesów przy oddziaływaniu przepływów wstecznych energii z materią

zachodzą procesy uporządkowania, którym towarzyszy zmniejszenie entropii i powstawanie rozpraszających struktur zdolnych do samoorganizacji. Zjawisko to występuje w żywej i nieożywionej materii i jest uzasadnione fizyką teoretyczną. Ma zastosowanie praktyczne.

Wśród istniejących modeli na obecnym etapie rozwoju badań najbardziej uogólnionym modelem powierzchni tarcia jest model zaproponowany przez M.A. Hebde i A. Wachala (rys. 2.25) [12].



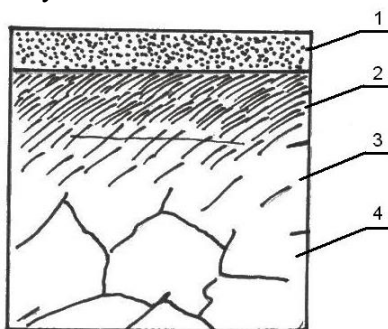
Rys. 2.25. Model powierzchni tarcia Hebde i Wachala

Teoria zużycia utleniającego zawarta jest w modelu powierzchni tarcia B. Kosteckiego (rys. 2.26). Według tej teorii na powierzchni tworzą się quasi-amorficzne przesycone roztwory stałe z O, S, P na powierzchni stopu. Są to tak zwane struktury wtórne pierwszego (I) rodzaju. Charakteryzują się one bezdyslokacyjną, rozdrobnioną strukturą klastrów i wykazują anomalną plastyczność, która sięga 20-krotnej. Po wyjściu ze strefy kontaktu twardość tych obszarów zwiększa się do głębokości 20–40 nm [4].

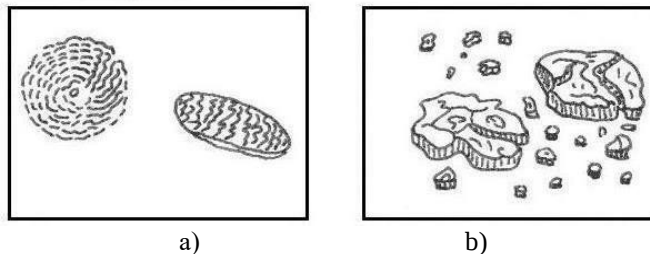
Wynika to z rozdrabniania fragmentów krystalicznych obszarów do wielkości 2–5 nm, braku granic ziaren, bloków mozaiki, wyjściem dyslokacji i defektów na powierzchni. Potwierdzono to analizą elektronograficzną.

Struktury wtórne drugiego rodzaju (II) składają się głównie z substancji chemicznych o niestechiometrycznym składzie z deficytem elementów aktywnych. W przypadku szczególnie wysokich nacisków podczas tarcia odpowiadającym procesom cięcia metalów zachodzi utworzenie związków chemicznych o niestechiometrycznym składzie z nadmiarowymi atomami elementu aktywnego. Wzmacniające działanie tych faz prowadzi do anomalnie wysokiej twardości warstwy struktur wtórnych drugiego rodzaju, grubość której wynosi 400–800 nm. W tym przypadku tworzy się mikrorelief powierzchni tarcia. Występuje samoodnawialny charakter powierzchni, który jest określany procesami formowania struktur wtórnych dwóch rodzajów (rys. 2.27, a,b).

W oparciu o strefę kontaktu ciernego, struktury wtórne pierwszego rodzaju otrzymują właściwości gładkich, szklistopodobnych (quasiamorficznych) warstw. Wraz ze wzrostem wartości pracy tarcia obserwuje się transformację warstw powierzchniowych w struktury wtórne drugiego rodzaju, których budowa jest zbliżona do struktury dyspersyjno-wzmocnionego materiału o wysokiej plastyczności, która spowodowana jest odpowiednimi przemianami fazowymi. Jest to klasyczny przykład tego, jak podczas przemian fazowych w materiale jest obserwowane jednocześnie zwiększenie charakterystyk wytrzymałościowych i plastyczności.



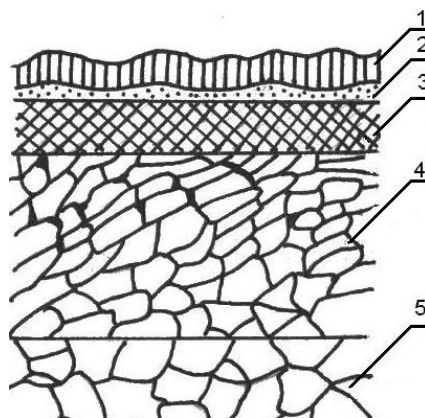
Rys. 2.26. Model zużycia utleniającego B. Kosteckiego: 1 – struktury wtórne drugiego rodzaju; 2 – struktury wtórne pierwszego rodzaju; 3 – warstwę przypowierzchniową; 4 – rdzeń



Rys. 2.27. Schemat powstawania produktów zużycia przy tarcii w warunkach samoregeneracji: a) agregowane cząstki o sferycznym i warstwowym kształcie; b) kruche zniszczenie faz

W powyższym przypadku przemiany fazowe zachodzą przy jednoczesnym działaniu wysokich wartości naprężeń ściskających i rozciągających podczas tarcia i wzrostu temperatury lokalnej. Zmniejszanie intensywności zużycia tłumaczy się optymalnym połączeniem wysokich charakterystyk plastyczności i odporności na ścieranie co zapewnia tworzenie wstępnie określonego strukturalno-fazowego stanu powierzchni.

Lawrowski zaproponował model pięciowarstwowej powierzchni tarcia (rys. 2.28).



Rys. 2.28. Model Lawrowskiego powierzchni tarcia: 1 – zaadsorbowane zanieczyszczenia; 2 – zaadsorbowane gazy; 3 – tlenki i zniszczone kryształy; 4 – struktura zdeformowana; 5 – struktura pierwotna

Jednakże do określenia rzeczywistego mechanizmu zjawiska oddziaływania kontaktowego materiałów koniecznym jest przeprowadzenie badań cienkich warstw powierzchni tarcia za pomocą nowoczesnych fizyko-chemicznych metod badawczych.

Na podstawie przeprowadzonych badań [5] odporności na zużycie powłok ze stopów eutektycznych Fe-Mn-C-B-Si pokazano, że w parach tarcia ze stalą C45, charakteryzują się one wysoką odpornością na zużycie dzięki zjawiskom

segregacji atomów na powierzchni tarcia. Ustalono to dzięki spektroskopii Auger'a warstwy powierzchniowej, w której ujawniono zwiększoną zawartość C, B i Si. Dla powłok układu Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr-Al-Sc zawartość węgla na powierzchni tarcia wzrasta od 2,4 do 2,7, boru z 8,8 do 33 i krzemu od 3 do 11,4 at.%. Kształt pików widma węgla pozwala stwierdzać, że znajdują się on w stanie swobodnym i w skutek tego może służyć jako smar stały.

Według wykresu równowagi fazowej $B_2O_3 - SiO_2$ temperatura topnienia trójtlenku boru B_2O_3 wynosi 458 °C, a dwutlenku krzemu SiO_2 – 1650 °C. W wyniku segregacji atomów Si i B w procesie tarcia na powierzchni kompozytu zwiększa się prawdopodobieństwo powstawania tlenków. W odpowiednich warunkach tarcia można oczekiwać ich rozmiękczenia z następnym przejściem w stan ciekły. Powoduje to zmniejszenie współczynnika tarcia do poziomu tarcia molekularnego w cieczy.

Literatura

1. Ахматов А.С., *Молекулярная физика граничного трения*, А.С. Ахматов, М.: ГИФМЛ, 1963, с. 472.
2. *Справочник по триботехнике*: в 3-х томах. Т. 1, Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе, М.: Машиностроение, 1990, с. 400.
3. Крагельский И.В., *Трение и износ*, И.В. Крагельский, М.: Машиностроение, 1968, с. 480.
4. *Поверхностная прочность материалов при трении*, Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. Под ред. Б.И. Костецкого, К.: Техника, 1976, с. 296.
5. Pashechko M., Lenik K., *Segregation of atoms of the eutectic alloys Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr at friction wear*, Wear 267 (2009), p. 1301–1304.
6. Dziedzic K., Paszczko M., Barszcz M., Józwik J., *Structure and construction assessment of the surface layer of hardfaced coating after friction*. Advances in science and technology research journal, 11, 2017, p. 253–260.
7. Szczerek M., Wiśniewski M. *Tribologia i Tribotechnika*. Inst. Tech. i Eksploatacji, Radom 2000.
8. Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa 2002.
9. Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria Powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
10. Kula T., *Inżynieria warstwy wierzchniej*, Łódź 2000.
11. Lawrowski Z., *Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie*, PWN, Warszawa 1993.
12. Hebda M., Wachal A., *Trybologia*, WNT, Warszawa 1980.

ROZDZIAŁ III. PODSTAWOWE RODZAJE TARCIA W WĘZŁACH MASZYN

3.1. Tarcie bez materiału smarnego

Tarcie bez środka smarnego pomiędzy powierzchniami ciernymi występuje w hamulcach, przekładniach ciernych, w węzłach maszyn przemysłu włókienniczego, spożywczego, chemicznego. Środka smarnego nie stosuje się także w węzłach tarcia maszyn działających w warunkach wysokich temperatur, gdzie środek smarny jest nieprzydatny.

Tarcie ma molekularno-mechaniczną naturę. Na obszarach rzeczywistego kontaktu powierzchni działają siły przyciągania molekularnego. Występują one na odległościach, które są dziesięć razy większe niż odległość międzyatomowa w sieciach krystalicznych i wzrastają wraz ze wzrostem temperatury. Siły molekularne przy obecności lub nieobecności pośredniej warstwy wiążącej (wilgotność, zanieczyszczenia, środki smarne itp.) wytwarzają, w określonej ilości, obszary adhezji. Jest to możliwe między metalami i warstwami tlenków. Adhezja może być spowodowana jednoczesnym wpływem sił elektrostatycznych. Siły adhezji, jak i siły molekularne, są wprost proporcjonalne do obszaru kontaktu rzeczywistego. Przyłożone obciążenie wpływa na te siły pośrednio przez obszar rzeczywistego kontaktu [1].

Siły molekularne, jako siły prostopadłe do powierzchni nie powinny wykonywać pracy podczas względnego stycznego przemieszczania się powierzchni. To samo powinno dotyczyć sił adhezyjnych jeżeli połączenie, które jest utworzone za pomocą sił adhezji, niszczy się w miejscu złączenia. W rzeczywistości, względnemu przemieszczeniu powierzchni w obecności wzajemnego oddziaływania i adhezji towarzyszy odkształcenie ścinające, co w wyniku niedoskonałej sprężystości materiału powoduje nieodwracalne zużycia energii. Większą siłę styczną trzeba przyłożyć, jeżeli połączenie adhezyjne między ciałami ulega naruszeniu nie na miejscu złączenia, a na pewnej głębokości od powierzchni.

Bardziej silnym objawem sił molekularnych jest zatarcie powierzchni. Tarcie w tym przypadku zależy od długości stref łączenia i odporności ich separacji. Siła tarcia T wywołana jest przez oddziaływania mechaniczne i molekularne:

$$T = aS_f + bP$$

gdzie: a – średnia intensywność składnika molekularnego siły tarcia; S_f – rzeczywista powierzchnia kontaktu; b – współczynnik charakteryzujący składową mechaniczną siły tarcia; P – nacisk.

Współczynnik tarcia f jest stosunkiem siły tarcia do nacisku. Na podstawie wzoru (3.1) otrzymuje się:

$$f = aS_f / P + b$$

Wyrażenia dwumianowe typu dla siły tarcia i współczynnika tarcia są poprawne dla tarcia ze środkiem smarnym i bez niego.

Wielu naukowców (Holm, Streng, Lewis i in.) uważają, że składowa siły tarcia w wyniku odkształcenia plastycznego (oddziaływania mechanicznego) powierzchni jest zwykle dość mała (kilka procent całkowitej siły tarcia). W ten sposób tarcie powierzchni metali w próżni towarzyszą wysokie wartości współczynnika tarcia (powyżej jednego). Jeżeli do komory próżniowej wpuszczone zostanie powietrze w bardzo krótkim czasie zmniejsza się współczynnik tarcia (rzędu kilku razy). W tym czasie tlen nie jest w stanie utworzyć warstwy tlenku, aby wygładzić nawet niewielkie nierówności powierzchni tarcia.

Na tej podstawie można stwierdzić, że składowa molekularna siły tarcia jest przyczyną jej wysokiej wartości w próżni. Warto zauważyć, że w przypadku tarcia tocznego składowa molekularna ma stosunkowo niewielki wpływ na tarcie.

Statyczna siła tarcia w zależności od czasu trwania kontaktu nieruchomego wzrasta do pewnego poziomu. Siła tarcia w ruchu zależy od prędkości przemieszczania się powierzchni ślizgowych i od nacisku.

Tarciu bez środka smarnego towarzyszy nagłe skokopodobne ślizganie się powierzchni z którymi powiązane są na przykład: wibracja samochodu przy włączeniu sprzęgła lub przy hamowaniu, wibracja noża przy cięciu oraz naruszeniu płynności pracy elementów, które poruszają się powoli. Można zastosować środki i sposoby zapobiegające w pewnym stopniu temu zjawisku przy tarcie – zwiększenie twardości materiałów pary trącej, wzrost prędkości ślizgania się, dobór par tarcia dla których współczynnik tarcia nieznacznie wzrasta wraz ze zwiększeniem czasu trwania stałego kontaktu.

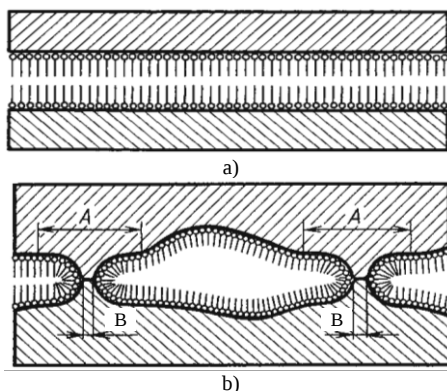
3.2. Tarcie graniczne

Przy smarowaniu granicznym powierzchnia ciał trących jest oddzielona warstwą środka smarnego o stosunkowo małej grubości (od grubości jednej molekuly do $0,1\ \mu\text{m}$). Obecność warstwy granicznej zmniejsza siłę tarcia w porównaniu do tarcia bez środka smarnego od 2 do 10 razy i nawet stukrotnie zmniejsza zużycie połączonych powierzchni [2].

Wszystkie smary zdolne są do adsorpcji na powierzchni metalowej. Wytrzymałość warstwy zależy od obecności aktywnych molekuł, ich jakości i ilości. Mimo, że smary mineralne są mieszaniną mechaniczną nieaktywnych węglowodorów (za wyjątkiem smarów ultraczystych, które jeszcze nie pracowały) zawsze mają włączenia kwasów organicznych, smół i innych środków powierzchniowo czynnych. Kwasy tłuszczowe wchodziły do składu olejów pochodzenia roślinno-zwierzęcego, a także do składu plastycznych środków smarnych. W związku z tym praktycznie wszystkie smary tworzą na powierzchniach metalowych fazę graniczną o quasikrystalicznej strukturze

i grubości do $0,1\ \mu\text{m}$, która charakteryzuje się mniej więcej wytrzymałym połączeniem z powierzchnią i kohezją wzdłużną. Przy obecności stosunkowo grubej warstwy smarnej pomiędzy powierzchniami tarcia przejście ze struktury zorientowanej smaru do niezorientowanej występuje skokowo.

Molekuły środka smarnego są zorientowane prostopadłe do powierzchni stałej, co pozwala schematycznie przedstawić warstwę graniczną jako „włoski” (rys. 3.1). Podczas przemieszczenia wzajemnego powierzchni ciernych „włoski” są jakby wygięte w przeciwnych kierunkach. W rzeczywistości odbywa się przesunięcie z przekrzywieniem quasikrystalicznej struktury błony. Jej odporność na poślizg w tym stanie jest nieznacznie zwiększona. Na przywrócenie orientacji molekuł do poprzedniego położenia prostopadłego do powierzchni ciał potrzebny jest pewien okresu czasu.



Rys. 3.1. Schematy poślizgu ciał przy smarowaniu granicznym:

a) smarowanie powierzchni idealnych; b) kontakt powierzchni rzeczywistych;
A – obszary, które przejmują obciążenie; B – obszary bezpośredniego kontaktu lub kontaktu przy błonach stałych

Mechanizm tarcia przy smarowaniu granicznym przedstawia się następująco. Pod obciążeniem powstają sprężyste i plastyczne odkształcenia na powierzchniach kontaktu (obszary najbliższego przylegania powierzchni pokrytych błoną graniczną środka smarnego, aż do warstwy monomolekularnej). Na obszarach kontaktu może nastąpić wzajemne przenikanie powierzchni bez zniszczenia integralności powłoki smarującej. Opór ruchu przy ślizganiu składa się z odporności przesunięcia warstwy granicznej i odporności ścinania powierzchni. Ponadto, na obszarach kontaktu poddanych najbardziej znaczącej deformacji plastycznej (w obszarach o wysokich lokalnych temperaturach) może wystąpić zniszczenie błony smarnej z początkiem zjawiska adhezji powierzchni czystych, a nawet łączenie metali na mikroodcinkach B (zob. rys. 3.1). Powoduje to dodatkowy opór ruchu.

Dzięki ruchliwości molekuł środka smarnego na powierzchni tarcia adsorpcja zachodzi z dużą prędkością, co nadaje błonie smarującej właściwość

„samoleczenia” przy jej miejscowych uszkodzeniach. Zdolność ta odgrywa ważną rolę w zapobieganiu procesowi lawinowego zatarcia.

Nieodnawialna błona graniczna w miarę wzrostu drogi tarcia ściera się, smar z błony adsorbuje na produkty zużycia i usuwa się z powierzchni tarcia. Występuje sublimacja błony, która znajduje się w postaci ciała stałego i usuwanie smaru do atmosfery. Utlenianie błony wspomaga dezorientację struktury i jej zniszczenie.

Aby ocenić zachowanie smarów przy smarowaniu granicznym w 1903 roku wprowadzono pojęcie olejności i zaproponowano różne sformułowania tego pojęcia. Olejność jest to kompleks właściwości, które zapewniają efektywne smarowanie graniczne. Olejność ocenia się głównie przez współczynnik tarcia: im jest mniejszy, tym lepsze smarowanie.

Dodanie do warstwy granicznej środka smarnego i wodnych roztworów środków powierzchniowo aktywnych zwiększa grubość warstwy granicznej oraz wspomaga zmniejszenie zużycia (do dwóch razy). Przy tarcu ze smarowaniem granicznym zużycie elementów maszyn jest duże. Ze względu na falistość i chropowatość powierzchni ich oddziaływanie zachodzi na bardzo małych obszarach tarcia. Naciski kontaktowe mają wysokie wartości i ostatecznie cienka błona graniczna nie chroni powierzchnię przed deformacją plastyczną, co prowadzi do zużycia elementów. Jest to główną wadą smarowania granicznego.

Efektywność działania smarującego oprócz czynnika absorpcji zależy od wzajemnego oddziaływania chemicznego metalu i środka smarnego. Kwasy tłuszczowe wchodzi w reakcję z powierzchnią metaliczną tworząc sole metalowe kwasów tłuszczowych, które mogą (ze względu na ich właściwą wysoką kohezję) wytrzymać bez zniszczenia znaczne deformacje. Zjawiska chemiczne odgrywają ważną rolę w organizacji działania smarnego. Potwierdza to fakt, że metale inercyjne i szkło słabo się smarują. Jest to powód, aby sądzić, że między metalem i smarami węglowodorowymi występują reakcje, które wspomagają połączenie błony z podłożem tworząc je bardziej wytrzymałym. W ten sposób płyn silikonowy, który ma dużą lepkość, lecz nie jest aktywnym do metalu (nie tworzy błony ochronnej na powierzchni metalu) nie może być wykorzystywany jako środek smarny w łożyskach ślizgowych.

Eksperymenty ze stalą C45 przy szybkości poślizgu 4,5 m/s w środowisku powietrza i argonu, przy tarcu bez środka smarnego ($P = 1$ MPa) i tarcu przy smarowaniu granicznym ($P = 3$ MPa) wykazały, że po ścieraniu początkowej błony intensywność zużycia w argonie przekroczyła więcej niż 30-krotnie intensywność zużycia w powietrzu, a przy smarowaniu granicznym 950-krotnie (według B. I. Kosteckiego). Te i podobne doświadczenia wyraźnie wskazują na istotny wpływ tlenu na proces tarcia przy smarowaniu granicznym. Są dwie koncepcje wyjaśniające te zagadnienie.

Jak sugeruje B. Lunn, reakcja pomiędzy metalem i smarem biorąc pod uwagę rolę środowiska zachodzi w następujący sposób: metal odgrywa rolę katalizatora lub nośnika tlenu, powodując utlenianie smaru z utworzeniem nadal ściśle

połączonych z metalem związków. Te reakcje chemiczne występują w miejscach o największym nacisku i temperaturze (w punktach kontaktu metal-metal) a zwłaszcza na niskotopliwej składowej strukturalnej, która charakteryzuje się dużą aktywnością chemiczną. Według G.W. Winogradowa smar odgrywa rolę głównego nośnika tlenu, przy czym warstwa graniczna tworzy się i odbudowuje w miarę jej zużycia nie na powierzchni, a na submikroskopowej błonie utleniającej.

Z uwagi na niską trwałość termiczną błony granicznej utworzonej na powierzchniach metalowych zwykłymi smarami mineralnymi, koniecznym jest sztuczne zwiększenie aktywności chemicznej. Osiąga się to poprzez wprowadzenie w smary specjalnych dodatków zawierających związki organiczne siarki, fosforu, chloru lub kombinację tych elementów.

W warunkach wysokich temperatur powstających na mikro kontaktach aktywne związki dodatków, rozkładają się i oddziałują z powierzchniami metalowymi wytwarzając błony siarczków, żelaza, fosforanów żelaza, chlorku żelaza i chlorku utlenionego, itp. Wytworzone błony zapobiegają kontaktowi metali, zmniejszają opór tarcia, zapobiegają dalszemu wzrostowi lokalnych temperatur. Błona ta ma słabą odporność na ścinanie. Zużywa się, a następnie ponownie odnawia.

Błona z węglowodorów chlorowanych utworzona na powierzchni stali jest zdolna do pracy do temperatury 300–400°C. Powyżej tej temperatury występuje topnienie i (albo) jej rozkład. Temperatura topnienia siarczków jest wyższa, więc zdolność do smarowania jest zachowana do temperatury 800°C. Poniżej temperatury krytycznej błony zachowują się, jako materiały smarne stałe.

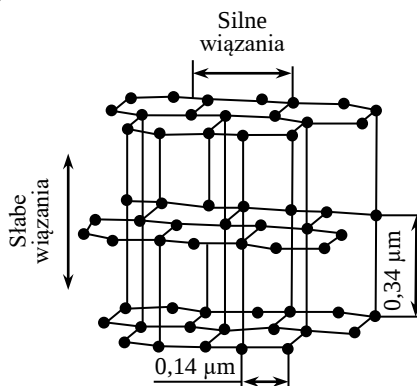
Działanie dodatków jest nieefektywne, jeżeli metal nie reaguje z częścią aktywną dodatków. Na przykład, platyna i srebro nie reaguje z siarką.

Z poprzedniego wynika, że błona graniczna powinna mieć wysoką wytrzymałość na ściskanie i niską odporność na ścinanie. Na podstawie tych wymagań do stałych materiałów smarujących można zaliczyć niektóre ciała o warstwowo-sieciowej (kratowej) i płytkowej strukturze, metale miękkie i cienkie błony tworzyw sztucznych.

Spośród ciał o strukturze warstwowo-kratowej właściwości wymagane do smarowania powierzchni metalicznych mają grafit, molibdenit (disiarczek molibdenu MoS_2), siarczek srebra, porowaty ołów i disiarczek wolframu [3].

W sieci krystalicznej grafitu atomy węgla są ułożone w równoległych warstwach, które są oddzielone od siebie (najbliższej) w odległości 0,34 nm, w każdej warstwie są umieszczone na wierzchołkach sześciokąta foremnego o długości boku 0,14 nm (rys. 3.2). Ponieważ siły wzajemnego przyciągania między atomami są tym mniejsze im większa odległość jest między nimi to związki między atomami w warstwach są znacznie silniejsze niż między warstwami. Przy dużym oporze grafitu na ściskanie prostopadłe do warstw (płaszczyzna ścinania) odporność przecięcia równoległego do warstw jest mała. Biorąc pod uwagę, że luźne kryształy rozmieszczają się na powierzchni

metalicznej płaszczyznami ścinania, to warstwa graniczna jest utworzona z łańcuchów w kierunku normalnym do powierzchni. Posiada ona cechy (wytrzymałość i odporność na odkształcenia) charakterystyczne dla warstw granicznych utworzonych smarami.



Rys. 3.2. Krystaliczna struktura grafitu. Warstwy szczelnie upakowanych atomów węgla są rozdzielone dużymi odległościami

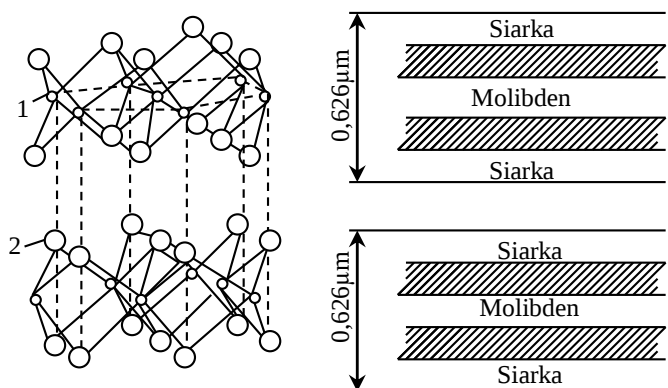
Twardość grafitu w kierunku prostopadłym do płaszczyzny gęsto rozmieszczonych atomów jest prawie taka sama jak diamentu. Można przypuszczać, że odpowiednio zorientowane cząsteczki grafitu mogą przenikać bez niszczenia w powierzchnie metaliczne. Być może z tego powodu, we wszystkich przypadkach, skuteczność smarowania grafitem kontaktu metalowego powierzchni tarcia prawie lub w ogóle nie zachodzi; nawet przy dużej deformacji plastycznej powierzchniowych warstw kontaktujących przesunięcia odbywają się pod błoną materiału smarnego lub wewnątrz niego. Słaba odporność grafitu w płaszczyznach równoległych do płaszczyzn gęsto rozmieszczonych atomów powoduje przy tarcu ślizganie się warstw osadzonych na powierzchni. Współczynniki tarcia powierzchni grafitowych osiągają małe wartości (0,03–0,04).

Opis ten jest niekompletny. Niektóre fakty pozwalają wyjaśnić efekt smarowania tylko grafitową strukturą warstwową. Siła tarcia przy smarowaniu grafitem w suchym powietrzu jest wyższa niż na mokro. Siła tarcia w atmosferze azotu jest znacznie większa niż w powietrzu, przy czym w suchym azocie jest wyższa niż na mokro. Grafit posiada dobrą zdolność smarowania w środowisku odnawialnej mieszaniny gazów. Tak, więc obecność wilgoci lub błon na bazie tlenków jest warunkiem koniecznym, aby grafit miał działanie smarujące. Wilgotność i błony tlenkowe na powierzchniach metalicznych (których powstawaniu sprzyja wilgotność) polepszają adhezję grafitu do tych powierzchni, bez której wytrzymałość warstwy granicznej jest niewystarczająca.

Sieć krystaliczna dwusiarczku molibdenu (rys. 3.3) jest podobna do grafitu. Pomiedzy atomami molibdenu i siarki są ściśle związki, a odległość pomiędzy

warstwami atomów siarki jest stosunkowo duża. Dzięki temu dwusiarczki molibdenu można stosować, jako środek smarny zarówno w niskich temperaturach (-50°C) jak i w próżni. W temperaturze 538°C , molibdenit przekształca się w trójtlenek, który jest ścierniwem.

Jeśli występuje wilgotność na powierzchni molibdenitu wzrasta siła tarcia. Zakłada się, że para wodna reaguje z atomami siarki, co może spowodować korozję powierzchni stali.



Rys. 3.3. Struktura dwusiarczku molibdenu MoS_2 . Pojedyncze warstwy składają się z molibdenu lub czystej siarki, odległość, między którymi jest $0,366\text{ nm}$ i stosunkowo słaby związek: 1 – atomy molibdenu, 2 – atomy siarki

Oprócz ciał o strukturze warstwowo-sieciowej wszystkie inne stałe środki smarne tworzą warstwę graniczną o pożądanych właściwościach (odporności na ściskanie i na przesunięcie), która nie ma ściśle zorientowanej struktury. Można więc zaprzeczyć definicji tarcia ze stałymi środkami smarnymi jako tarcia przy smarowaniu granicznym. Stałymi środkami smarnymi mogą być metale miękkie o niskim oporze na ścinanie w zakresie użytecznych temperatur roboczych. Do smarowania stosowane są błony stałe ołowiu, cyny i indu.

Mechanizm działania cienkich warstw metalowych osadzonych na podłożu stałym według F.P.Bowdena jest taki: obciążenie przekazuje się przez warstwę, która charakteryzuje się wystarczającą wytrzymałością na wyciskanie, chroni powierzchnie tarcia przed bezpośrednim kontaktem i przenikaniem. Gdy istnieje względny ruch powierzchni odbywa się ścinanie miękkiego metalu. Płaszczyzna faktycznego kontaktu dzięki twardemu podłożu też jest mała, to i opór tarcia też będzie mały. Warstwa naniesiona na miękkim podłożu, może spowodować znaczne odkształcenie się pod obciążeniem, zaczyna kontaktować się na większej powierzchni, co zwiększa siłę tarcia. W związku z tym stosowanie miękkich warstw metalowych, na przykład Babbittu lub cyny jest nieskuteczne. Bardziej skutecznym jest zastosowanie ich na ołowiowych brązach i stopach miedzi.

Spośród metali miękkich, jako stałe środki smarne mogą być wykorzystywane tylko te, które nie umacniają się w temperaturach roboczych i nie tworzą kruchych stałych roztworów z metalami kontaktujących ciał. Docelowym jest to, żeby nie zachodziło wzmocnienie metalu. Wskutek tego jego temperatura pracy musi być wyższa od temperatury rekrytalizacji.

3.3. Smarowanie płynne, lepko-plastyczne i kontaktowo-hydrodynamiczne

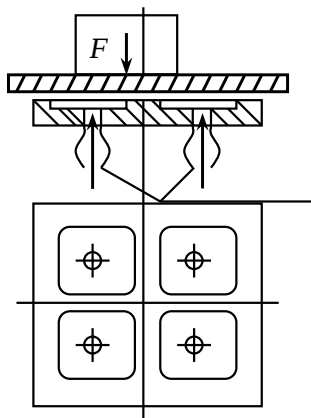
Smarowanie płynne charakteryzuje się tym, że powierzchnie tarcia są oddzielone od siebie warstwą ciekłego środka smarnego, który znajduje się pod ciśnieniem. Ciśnienie środka smarnego równoważy obciążenie zewnętrzne. Warstwa środka smarnego nazywa się warstwą nośną. Przy zwiększeniu grubości błony granicznej zmniejsza się stopień wpływu powierzchni stałej na odległe od niej molekuly smaru. Warstwy, które znajdują się w odległości większej niż $0,5\ \mu\text{m}$ od powierzchni mogą swobodnie przemieszczać się względem siebie. Przy smarowaniu płynnym opór ruchu jest określony tarciem wewnętrznym (lepkością) cieczy i składa się z oporu ślizgania warstw smaru po grubości warstwy smarowej. Ten rodzaj tarcia z właściwymi mu stosunkowo małymi współczynnikami tarcia jest optymalny dla węzła tarcia ze względu na niskie straty energii, wysoką trwałość i odporność na zużycie. Siła tarcia przy smarowaniu płynnym nie zależy od charakteru powierzchni kontaktujących.

Zjawisko tarcia przy smarowaniu płynnym zostało opisane w 1883 przez M.P. Petrowa, który utworzył podstawy teorii smarowania hydrodynamicznego. Nowoczesna teoria smarowania hydrodynamicznego, która opiera się na pewnych uproszczeniach pozwala określić zdolność nośną warstwy smarnej i jej minimalną grubość. Jednak wnioski z teorii odnoszą się do absolutnie twardych, idealnie gładkich połączonych elementów, wytwarzanych i zamontowanych dokładnie, co wymaga odpowiednich korekt. Istnieją dwa sposoby tworzenia ciśnienia w warstwie nośnej. W pierwszej metodzie specjalnie przeznaczona pompa wytwarza ciśnienie hydrostatyczne wystarczające aby rozdzielić powierzchnie tarcia (rys. 3.4).

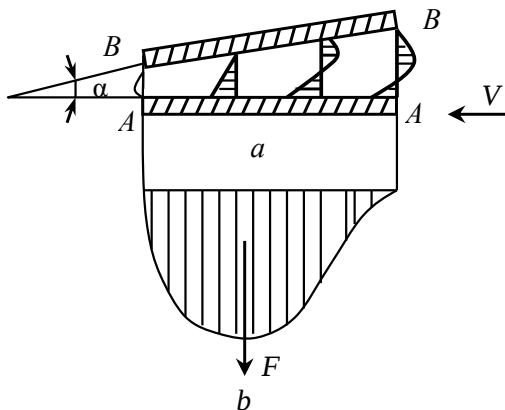
Wyciek smaru przez czopy łożyska jest kompensowany odpowiednim podaniem smaru przez pompę. W drugim sposobie ciśnienie w warstwie smarnej powstaje automatycznie. Wymaga to odpowiednich działań konstrukcyjnych i doboru odpowiedniej klasy środka smarnego, w zależności od prędkości poślizgu.

Spośród tych dwóch sposobów tworzenia ciśnienia w warstwie nośnej wyróżnia się hydrostatyczne i hydrodynamiczne opory ślizgania. Zarówno te i inne są oporami tarcia przy smarowaniu ciekłym, ale ze względu na większą częstotliwość występowania oporów hydrodynamicznych w obiegu przy smarowaniu ciekłym rozumiejemy odporność hydrodynamiczną.

Mechanizm utworzenia ciśnienia w warstwie nośnej łatwiej wyjaśnić na przykładzie płaskiej podpory (rys. 3.5, a). Niech płyta A–A przemieszcza się z pewną prędkością v pod kątem α do nieruchomej podkładki B–B. Przestrzeń pomiędzy płytą a podkładką jest napełniona lepką cieczą. Warstwa cieczy która zwilża płytę A–A, siłami lepkiego tarcia nadaje ruch warstwie przyległej do niej według wysokości. Tak więc ruch będzie przenoszony z jednej warstwy do innej, z wyjątkiem warstwy, która zwilża nieruchomą podkładkę B–B.



Rys. 3.4. Schemat pracy podpory



Rys. 3.5. Schemat utworzenia hydrostatycznej warstwy nośnej smaru

W wyniku tego materiał smarujący będzie wciągać się w szczelinę klinową, która zwęża się i następnie będzie podtrzymywać w niej ciśnienie. Nie będzie ono stałe na całej długości, ponieważ w miejscach wejściowych i wyjściowych smar oddziałuje z atmosferą i tu ciśnienie nadmiarowe jest zerowe (rys. 3.5, b). Wykresy prędkości ruchu cieczy w szczelinie pokazano na rys. 3.5 a). Zdolność nośna lub nośność warstwy smarnej jest równa równoważnej sile ciśnienia. Taką siłą można obciążyć płytę przy zadanych jej rozmiarach, prędkości przeniesienia i lepkości smaru.

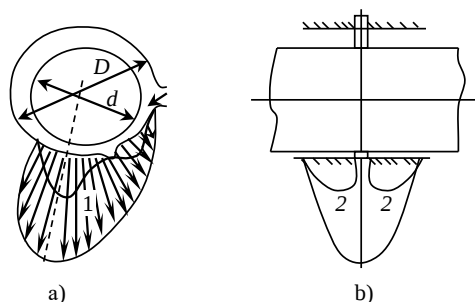
Szczelina klinowa jest warunkiem koniecznym dla zapewnienia rodzaju tarcia przy smarowaniu płynnym w hydrodynamicznej podporze. W podporach płaskich szczelina klinowa tworzy się konstrukcyjnie za pomocą skosów powierzchni (jak to ma miejsce w przypadku suwaków) a w podporach pierścieniowych dzięki samoustawieniu powierzchni wspierającej (łożyska oporowe typu łożyska Michella).

Obecność ciśnienia podwyższonego w warstwie smaru prowadzi do złożonego obrazu przepływu cieczy. Część cieczy, która ulega ściśnięciu w szczelinie, przemieszcza się przez przekrój wejściowy na bok w kierunku przeciwnym do obrotu, przy czym główny strumień przemieszcza się

z obciążonej strefy wału, a reszta wypływa poprzez przekrój poprzeczny łożyska.

Na rys. 3.6 przedstawiono położenie czopów w łożysku przy smarowaniu płynnym i wykresy rozkładu ciśnienia w warstwie smaru według przekroju poprzecznego i wzdłużnego.

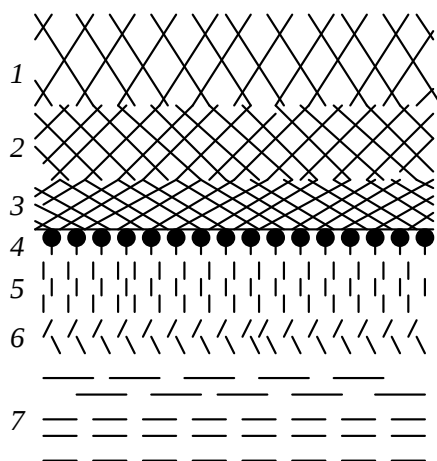
Aby zrealizować smarowanie płynne prawdopodobnie koniecznym jest, żeby najmniejsza grubość warstwy smarującej przy powierzchniach gładkich i innych idealnych warunkach była nie mniejsza od grubości, w której ujawniają się właściwości objętościowe cieczy. W przypadku powierzchni chropowatych najmniejsza grubość warstwy to minimalna odległość pomiędzy wierzchołkami występow nierówności powierzchni połączonych.



Rys. 3.6. Rozkład ciśnienia wewnątrz warstwy smarnej łożyska:
a) w przekroju poprzecznym; b) w przekroju podłużnym;
1 – w podłużnym rowku; 2 – w rowku pierścieniowym

Według teorii smarowania hydrodynamicznego w celu zapewnienia tarcia przy smarowaniu płynnym szczelina minimalna między powierzchniami powinna być nie mniejsza niż suma wysokości średnich nierówności powierzchni. Koncepcja ta wywodzi się z idei, że występy jednej powierzchni kontaktują z zagłębieniami powierzchni współpracującej. Dlatego, aby uniknąć szczepienia nierówności jedno z ciał pary trącej powinno pomniejszyć się nie mniej niż na sumę wysokości średnich nierówności. W celu ustalenia najmniejszej grubości dopuszczalnej (krytycznej) warstwy smarnej bierze się pod uwagę stopień odkształcenia pod obciążeniem, błędy wytwarzania i montażu części oraz możliwość wystąpienia zanieczyszczeń stałych w smarze.

Tarcie przy smarowaniu płynnym możliwe jest nie tylko między powierzchniami, które ślizgają się po sobie. Przy walcowaniu lub walcowaniu ze ślizganiem cylindrycznych powierzchni i powierzchni krzywoliniowych w szczelinie, która zwęża się od strony wejścia w miejsce kontaktu wciąga się środek smarny. W pewnych warunkach (obciążenie, prędkość, charakterystyki sprężyste i geometria powierzchni) warstwa środka smarnego rozdziela powierzchnie kontaktujące (rys. 3.7).

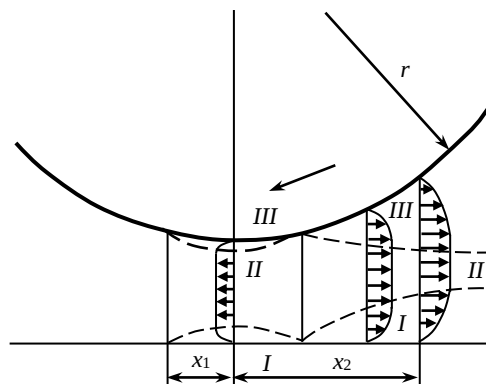


Rys. 3.7. Schematyczny przekrój powierzchni metalicznej i warstwy płynnego środka smarnego: 1 – wejściowa struktura metalu; 2 – kryształy odkształcone w kierunku dotarcia; 3 – pokruszone rozmazane kryształy, tlenki, zaadsorbowany środek smarny (olej); 4 – zaadsorbowany środek smarny jednowarstwowy; 5 – warstwa graniczna środka smarnego; 6 – strefa mikroturbulencji; 7 – przepływ laminarny

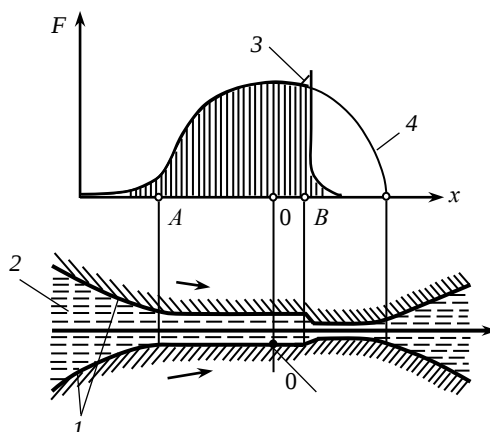
Materiały smarne plastyczne i płynne, mogą zapewnić taki rodzaj tarcia, który eliminuje bezpośredni kontakt powierzchni i ich wzajemne przenikanie. W przeciwieństwie do środków smarnych, które są lepкими płynami, materiały smarne plastyczne mają własności lepkoplastyczne.

Według M.V. Tiabynyma istnieją obszary, w których nie ma poślizgu warstwowego. Płynność występuje w idealnym stanie plastycznym. Poza strefami tych obszarów płyn jest lepki. Możliwe jest również ślizganie się materiału smarnego względem ścian łożyska.

Przy walcowaniu cylindra po płaszczyźnie (rys. 3.8) w strefach I i III gradient prędkości według wysokości jest różny od zera i płynność jest wówczas lepka. W strefie II naprężenie styczne jest mniejsze od naprężenia granicznego ścinającego. Wzajemne przemieszczenie warstwowe w każdym przecięciu tej strefy nie zachodzi, a strumień jest podobny do płynności ciała plastycznego.



Rys. 3.8. Schemat rozkładu prędkości w przepływie lepko-sprężystym podczas walcowania płaszczyzny: x_1 , x_2 – współrzędne końców warstwy smarującej



Rys. 3.9. Kształt luki między powierzchniami tarcia podczas ślizgania i orientacyjny wykres rozkładu w nim ciśnienia oleju: 1 – powierzchnia oddziaływania kontaktowego; 2 – olej; 3 – wykres ciśnienia oleju; 4 – eliptyczny rozkład ciśnienia według Hertza dla niesmarujących powierzchni

Teoria kontaktowo-hydrodynamicznego smarowania była opracowana między innymi przez A. M. Ertelema, O.I. Petruszewicza A.M. Grubiny, N.V. Korowczyńskiego, D.S. Kodniroma.

Na rys. 3.9 przedstawiony jest (w przybliżeniu) kształt szczeliny oraz przybliżony wykres ciśnienia dla cylindrów, które toczą się jeden po drugim pod obciążeniem przy obecności pomiędzy nimi rozdzielającej warstwy środka smarnego. Punkt A – to początek kontaktu w miejscu styku cylindrów niesmarowanych. Przed kontaktem w klinie smarnym pojawia się ciśnienie, które stopniowo zwiększa się i w pewnym obszarze kontaktu rozdziela się, jak i przy tarcu bez materiału smarnego. W punkcie B, leżącym w tylnej połowie

kontaktu, szczelina zwęża się i pojawia się pik ciśnienia. Położenie piku zależy od obciążenia, lepkości smaru, prędkości ślizgania. Według O.I. Petrusewicza ciśnienie szczytowe jest nieco niższe od ciśnienia maksymalnego w środku obszaru kontaktu. Według jego badań do wytworzenia ciśnienia szczytowego potrzebne jest, żeby ciśnienie w kontakcie nie było mniejsze niż 200–300 MPa.

Lepkość dynamiczna środka smarnego w pierwszym przybliżeniu

$$\eta = \eta_0 e^{p \cdot c - b \Theta}$$

gdzie η_0 – lepkość smaru pod ciśnieniem atmosferycznym i w temperaturze pokojowej; p – ciśnienie w warstwie smaru; c – piezo-współczynnik; b – współczynnik temperaturowy lepkości; Θ – przekroczenie temperatury w warstwie smaru powyżej temperatury pokojowej.

Zwiększenie ciśnienia i temperatury powoduje odwrotny wpływ na lepkość smaru. Przy niskim współczynniku temperaturowym lepkości lub przy umiarkowanej temperaturze, lepkość smaru w kontakcie może być dość duża i prawdopodobnie wówczas smar jest w stanie quasiplastycznym.

Przy małej grubości warstwy smaru, która nie całkowicie rozdziela powierzchnię kontaktowe, tarcie zależy od tych samych czynników jak przy smarowaniu płynnym i od właściwości materiałów.

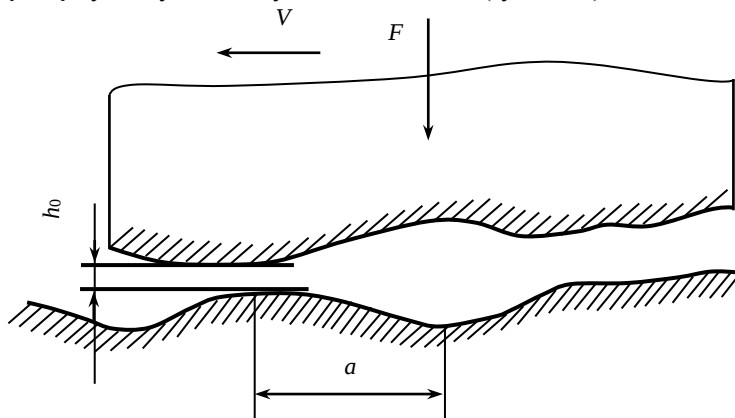
3.4. Tarcie przy smarowaniu mieszanym

Tarcie przy smarowaniu mieszanym zachodzi przy obecności zarówno smarowania płynnego jak i granicznego. Obciążenie normalne w przypadku tarcia przy smarowaniu mieszanym równoważy się normalną składową oddziaływania powierzchni na płaszczyznach ich kontaktu i siłami ciśnienia hydrodynamicznego w warstwie smaru. Względna część każdej reakcji zależy od obciążenia, prędkości względnego przemieszczania powierzchni, chropowatości, twardości i makrogeometrii oraz ilości i lepkości środka smarnego. Siła tarcia składa się ze składowej stycznej, sił oddziaływania powierzchni oraz odporności na ścinanie lepkościowe.

Hydrodynamiczne działanie cieczy może występować w dwóch przypadkach. W pierwszym przypadku, jeśli makrogeometria powierzchni stykowych jest taka, że istnieje szczelina, która zwęża się i w której smar może zaklinować się przy tarcu, to przy podaniu smaru w wystarczającej ilości i przy odpowiednich parametrach tarcia pojawi się strumień i utworzy się siła nośna. Jednak siła ta jest niewystarczająca dla pełnego pochłaniania obciążenia przy smarowaniu mieszanym. Strumień płynu przepływa wokół obszarów wzajemnego oddziaływania kontaktowego powierzchni.

W drugim przypadku, jeżeli nierówności między powierzchniami kontaktu utworzą w kierunku względnego przemieszczenia się elementów miejsca zwężenia i rozszerzenia względem wysokości. Przy wystarczającej ilości smaru

między powierzchniami tarcia, aby wypełnić mikroporowate zwężenia odgrywają rolę hydrodynamicznych mikroklinów (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Schemat elementarnego klina hydraulicznego powstałego w wyniku nierówności powierzchni: a – długość elementarnego klina smarującego; h – początkowa szczelina między powierzchniami na wierzchołku klina elementarnego

Hydrodynamiczne działanie środka smarnego na mikroklinach zachodzi nawet przy najmniejszej prędkości poślizgu.

Zaletą smarów płynnych nad smarami stałymi jest to, że mogą tworzyć nie tylko efekt hydrodynamiczny w określonych warunkach, lecz również służyć do chłodzenia węzła tarcia.

3.5. Tarcie ślizgowe

Rozpatrzmy warunki przejścia z jednego typu tarcia w inny w obecności płynnego środka smarnego. Jeśli ilość smaru jest ograniczona, ale wystarczająca do utworzenia monowarstwy zaadsorbowanej oraz błony granicznej, to przy tarcu warstwa pierwotna na szczytach nierówności powierzchni szybko się zużywa, i tarcie przy smarowaniu granicznym częściowo przejdzie w tarcie bez środka smarnego. Dzięki ruchliwości cząsteczek polarno-aktywnych molekuł adsorbowana monowarstwa szybko się odnawia. Jednak na regenerację fazy granicznej poprzez przemieszczenie środka smarnego z zagłębień nierówności będzie potrzebne stosunkowo dużo czasu. Po regeneracji błony granicznej warunki tarcia polepszają się. Może to prowadzić do wahań współczynnika tarcia.

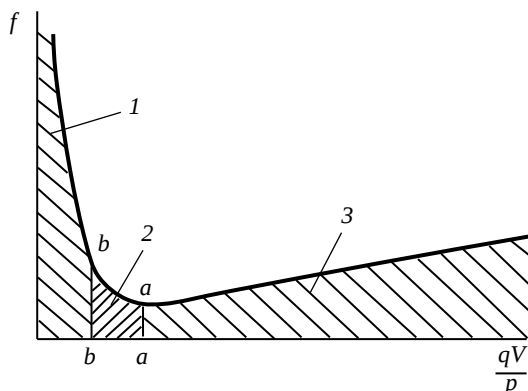
W rezultacie cały środek smarny w jakimś okresie niszczy się. Jeżeli oprócz wydatków na utworzenie błony granicznej jest nadmiar smaru, który wystarczająco wypełnia zagłębienia, to służy on do regeneracji błony granicznej, która się niszczy. W tym przypadku tarcie przy smarowaniu granicznym jest stabilne. Wraz ze wzrostem doprowadzania smaru potrzebnego do utworzenia efektu hydrodynamicznego na wystęпах nierówności powierzchni lub na

nierównościach makrogeometrycznych oddziałujących ciał tarcie przy smarowaniu granicznym przechodzi w tarcie przy smarowaniu mieszanym.

Ten ostatni rodzaj tarcia, niezależnie od powierzchni poślizgu i lepkości środka smarnego jest nieodłączną cechą każdej pary ciernej w obecności wystarczającej ilości środka smarnego [4].

W celu uszczegółowienia należy rozważyć łożysko ślizgowe. Niech obciążenia, rozmiary geometryczne, szczelina średnicowa łożyska, lepkość środka smarnego pozostaną stałymi. Zmianie będzie ulegać prędkość czopa obrotowego. Przy niskiej prędkości poślizgu powierzchni efekt hydrodynamiczny dla rozdzielania całkowitego powierzchni nie może rozwijać się, ponieważ smar jest wyciskany ze szczeliny. Zachodzi tylko tarcie mieszane. Wraz ze wzrostem prędkości poślizgu siły hydrodynamiczne wzrastają i oddziaływanie pomiędzy powierzchniami zmniejsza się. Przy pewnej prędkości pojawi się pełne rozdzielenie powierzchni i wystąpi smarowanie płynne. Dalsze zwiększenie prędkości poślizgu doprowadzi do wzrostu tarcia wewnętrznego w warstwie materiału smarnego i współczynnik tarcia wzrośnie. Minimum współczynnika tarcia odpowiada początkowi tarcia przy smarowaniu płynnym.

Graficzne przedstawienie warunków przejścia z jednego trybu do innego pokazano na schemacie Gersi, w którym współczynnik tarcia f jest związany z parametrem $\eta v/p$ (rys. 3.11).



Rys.3.11 Schemat warunków tarcia w łożysku: 1 – tarcie niesmarowanych powierzchni, 2 – tarcie graniczne, 3 – tarcie przy smarowaniu płynnym

Parametr ten nazywa się charakterystyką warunków tarcia łożyska. Na wykresie linia $a-a$, która przechodzi przez punkt minimum współczynnika tarcia, oddziela obszary tarcia przy smarowaniu płynnym od innych rodzajów smarowania. Ta ostatnia jest obszarem niestabilnego współczynnika tarcia. Załóżmy, że łożysko pracuje w warunkach smarowania granicznego i z dowolnego powodu zwiększyło się ciśnienie. Wtedy wartość $\eta v/p$ zmniejsza się i punkt początkowy przemieszcza się na wykresie w lewo i w górę. Siła

tarcia P zwiększa się, temperatura powierzchni i materiału smarnego wzrośnie, lepkość materiału smarnego spadnie i siła tarcia zwiększy się jeszcze bardziej. Przy smarowaniu granicznym wraz ze wzrostem obciążenia rośnie temperatura i warstwa graniczna niszczy się miejscowo, a tarcie może odbywać się bez środka smarnego. Linia $b-b$ oddziela obszar tarcia przy smarowaniu granicznym od obszaru tarcia powierzchni, które nie są smarowane.

W podobny sposób można ustalić niestabilność współczynnika tarcia przez zmniejszanie prędkości w strefie tarcia przy smarowaniu granicznym i przy tarcu powierzchni, które nie są smarowane oraz przez spadek lepkości środka smarnego w przypadku wzrostu temperatury.

Jeżeli rodzaj tarcia odpowiada punktowi położonemu po prawej stronie od linii $a-a$, to w wąskim przedziale zmienności $\eta v/p$ siła tarcia jest stabilna.

Na przykład, krótkotrwały wzrost szybkości poślizgu powierzchni powoduje silniejsze uwalnianie ciepła w łożysku, lepkość środka smarnego zmniejszy się, współczynnik tarcia zmniejszy się i charakterystyka rodzaju tarcia odbuduje się. Specyficzna samoregulacja rodzaju tarcia przy smarowaniu płynnym powoduje zmiany lepkości smaru wraz ze zmianą temperatury.

Współczynnik $\eta v/p$ jest charakterystyką rodzajów tarcia dla smarowania mieszanego i płynnego. W innych rodzajach tarcia właściwości lepkości środków smarnych mogą nie być brane pod uwagę. Jeśli chodzi o zmianę współczynnika tarcia przy małych (bliskich zeru) wartościach charakterystyk rodzaju tarcia, w zależności od materiałów elementów i środowiska, krzywa z punktu odpowiadającego współczynnikowi tarcia spoczynkowego (prędkość poślizgu $v = 0$), może monotonicznie zmniejszać lub zwiększać się i po przejściu przez maksimum spadać do krytycznego warunku (minimalnego współczynnika tarcia).

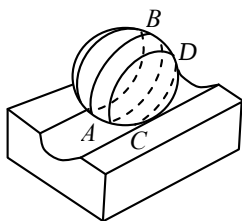
3.6. Tarcie toczone

Siła tarcia tocznego jest, co najmniej 10 razy mniejsza niż siła tarcia ślizgowego. Obecność siły tarcia tocznego została wyjaśniona wcześniej poprzez poślizg połączonych powierzchni. Stwierdzono, że wpływa to na siłę tarcia tocznego. Opór toczenia wynika ze strat deformacyjnych w leżących poniżej warstwach ciała stałego. W przypadku braku odkształcenia plastycznego tarcie spowodowane jest stratami histerezowymi w ciele stałym.

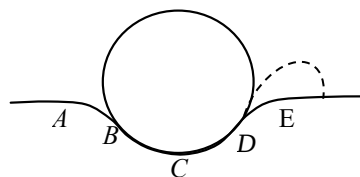
Wzajemny poślizg powierzchni można przedstawić rozpatrując toczenie piłki (rys. 3.12). Okrąg kulki AB przesuwa się w środku rowka, a okrąg CD dotyka jej krawędzi. Jak widać na rysunku, okrąg AB przechodzi w jednym obrocie kulki odległość większą niż okrąg CD . Ta różnica powoduje ślizganie się powierzchni tarcia. Utrata histerezy przy tarcu tocznym została wyjaśniona na rys. 3.13.

A. Reynolds zauważył, że kiedy cylinder wykonany z materiału stałego toczy się wzdłuż płaskiej powierzchni gumy, wtedy z każdym obrotem przechodzi on drogę mniejszą niż okrąg cylindra. Sugerował on, że guma jest rozciągnięta

w punkcie C w inny sposób niż w punktach B i D. Rezultatem jest ślizganie się wraz z odpowiednim rozproszeniem energii. Z rys. 3.13 widać, że z przodu pod kulką w punkcie E tworzy się pogłębienie, a z tyłu w punkcie A całkowicie zdeformowany materiał (z gumy) i z metali częściowo odzyskane pod wpływem sił sprężystości, elastyczności lub sprężystej histerezy. Ponadto, wskutek nieodwracalnego odkształcenia plastycznego siły reakcji za kulką są mniejsze niż siły nacisku przed nią. W rezultacie piłka wykonuje pracę deformacji.



Rys. 3.12. Piłka tocząca się po rowku



Rys. 3.13. Piłka tocząca się w prawo po płaskiej sprężystej podstawie

Na powierzchniach ciał tocnych, podobnie jak w przypadku ich poślizgu, powstają siły adhezyjne. Szczepianie adhezyjne ma niewielki wpływ na siły tarcia toczonego (obecność smarowania granicznego prawie nie wpływa na siłę tarcia toczonego), ale odgrywa ważną rolę w zużyciu ciał tocnych.

Za pomocą metody izotopów promieniotwórczych udowodniono, że podczas toczenia kul z szafiru po powierzchni miedzi następuje przenoszenie metalu z drogi toczenia na kulkę. Jeśli powierzchnie są smarowane kwasem oleinowym to opór toczenia kulki nie zmienia się, ale ilość miedzi przenoszona ulega zmniejszeniu się (powyżej 4 razy).

Podczas tarcia toczonego, w przypadku ciał stałych, deformacja powierzchni jest niewielka, a warstwy tlenkowe, które znajdują się na powierzchniach tarcia, nie są poddawane znacznej destrukcji. Dlatego ślizganie się powierzchni nie występuje po metalu, a po tlenkach, które mogą się zużywać. Wyjaśnia to wpływ poślizgu na zużycie ciał tocnych.

Dla stanu powierzchni zużytej według danych doświadczalnych siła tarcia toczenia wynosi:

$$F = kN^n / D^m$$

gdzie k – stała zależna od materiału; N – obciążenie kulki; D – średnica kulki; $n = 1,7 \div 1,85$; $m = 1,5 \div 1,6$.

Siła tarcia w łożyskach tocnych przy dużych prędkościach zależy od lepkości środka smarnego i może osiągnąć duże wartości. Siła tarcia w łożyskach tocnych zależy między innymi od lepkości smaru, tarcia w separatorze łożyska, wielkości kul, chropowatości powierzchni.

Moment tarcia w łożyskach tocznych wynosi:

$$M = 0,5 f_Q Q d \text{ lub } M = 0,5 f_T T d$$

gdzie f_0 i f_T – współczynniki tarcia w obciążeniach promieniowych i osiowych, przyporządkowane do średnicy wału d ; Q i T – obciążenie promieniowe i osiowe.

Siła tarcia w łożyskach tocznych zwiększa się w przypadku błędów technologicznych i montażowych, dużych prędkości i przy tarcu w uszczelnieniach. Wartości współczynników tarcia w różnych typach łożysk tocznych wahają się w zakresie od 0,002 do 0,008.

Literatura

1. Крагельский И.В., *Трение и износ в машинах*, И.В. Крагельский, М.: Машиностроение, 1968, с. 480.
2. Ахматов А.С., *Молекулярная физика граничного трения*, А.С. Ахматов, М.: ГИФМЛ, 1963, с. 472.
3. Вайнштейн В.Э., *Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы*, В.Э. Вайнштейн, Г.И. Трояновская, М.: Машиностроение, 1968, с. 180.
4. *Справочник по триботехнике*: в 3-х томах. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения, Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе, М.: Машиностроение, 1990, с. 416.
5. Szczerek M., Wiśniewski M. *Tribologia i Tribotechnika*, Inst. Tech. i Eksploatacji, Radom 2000.
6. Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa 2002.
7. Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria Powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
8. Kula T., *Inżynieria warstwy wierzchniej*, Łódź 2000.
9. Lawrowski Z., *Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie*, PWN, Warszawa 1993.

ROZDZIAŁ IV. GŁÓWNE RODZAJE PROCESU ZUŻYCIA

4.1. Zużycie mechaniczno-chemiczne

Zużycie mechaniczno-chemiczne to proces stopniowego niszczenia powierzchni elementów węzłów trących, który spowodowany jest oddziaływaniem aktywnych i plastycznie odkształconych warstw powierzchniowych metalu z atomami tlenu, siarki, fosforu, chloru, azotu, węgla, znajdujących się w środowisku [1–14]. Oddziaływanie warstw powierzchniowych metalu z tlenem, który występuje w powietrzu lub w środku smarnym i adsorbuje na powierzchni roboczej powoduje zużycie utleniające, jako rodzaj zużycia mechaniczno-chemicznego.

Zużycie mechaniczno-chemiczne (utleniające) zachodzi przy powstawaniu chemicznie zaadsorbowanych warstw (warstw stałych roztworów) i ich usuwaniu z powierzchni tarcia. Jest to stacjonarny proces równowagi dynamicznej zużycia i odtwarzania warstw tlenkowych.

Zużycie mechaniczno-chemiczne ma kilka form, w których ono zachodzi. Charakter i intensywność jego rozwoju zależy od rodzaju tarcia, względnej prędkości przemieszczenia, przykładanego obciążenia, temperatury, składu środowisk ciekłych i gazowych, właściwości mechanicznych i chemicznych materiałów węzłów tarcia.

Najczęściej zużycie mechaniczno-chemiczne obserwowane jest przy tarcii elementów kontaktujących, wykonanych z różnych metali i stopów na bazie roztworów stałych, które mają strukturę heterogeniczną lub zwiększoną twardość i granicę plastyczności. Ten rodzaj zużycia charakterystyczny jest dla elementów połączeń przegubowo-śrubowych, metalowych kół przekładni ciernych, wariatorów, przekładni mechanizmów sterowania i innych.

Szczególą cechą zużycia mechaniczno-chemicznego jest rozwój procesów mechanicznych odkształcenia cienkich warstw powierzchniowych i równoczesne oddziaływanie warstw aktywnych (które są zdeformowane) ze składnikami agresywnymi środowiska i tworzenie struktur wtórnych. Procesy mechaniczno-chemiczne powstawania struktur wtórnych na powierzchni tarcia spowodowane są zewnętrznymi działaniami mechanicznymi, rodzajem materiałów par trących i składem chemicznym środowiska, w którym znajduje się materiał. Rozmiary, geometria, lokalizacja, struktura wewnętrzna, skład chemiczny i skład fazowy struktur wtórnych mogą się różnić. W wyniku badań kinetyki mechanizmów utworzenia i właściwości transformowanych warstw powierzchniowych, przeprowadzonych w szerokim zakresie zmian warunków tarcia różnych materiałów i w różnych środowiskach stwierdzono, że istnieją dwa główne rodzaje struktur wtórnych i ich szeroki zakres stanów pośrednich [1].

Wspólne dla struktur wtórnych obu rodzajów jest głównie ich lokalizacja powierzchniowa, ultradyspersyjna struktura o dużej wytrzymałości, zdolność do minimalizowania zużycia warstwy powierzchniowej i zapobieganie procesom niedopuszczalnego zatarcia, zmęczenia, korozji, i tak dalej. Ale w tym samym czasie, dla każdego rodzaju struktur wtórnych charakterystyczne są indywidualne cechy takie jak:

1. Powierzchnie tarcia pokryte strukturami wtórnymi I i II rodzaju, różnią się znacznie według oznak zewnętrznych (tabela 4.1). Przy badaniu na poziomie makroskopowym różnice te przejawiają się w różnej zdolności odbijania światła powierzchni. Na poziomie mikroskopijnym – różnorodnym zabarwieniem powierzchni. Na poziomie submikroskopijnym – różnymi subreliefami powierzchni (rys. 4.1).

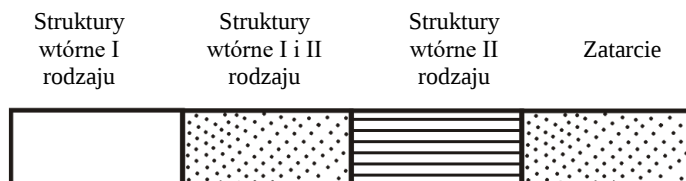
2. Struktury wtórne I rodzaju mają wysokie właściwości plastyczne, łatwo przemieszczają się wzdłuż powierzchni tarcia; struktury II rodzaju mają większą wytrzymałość powierzchniową, ale są mniej plastyczne.

3. Powierzchnie pokryte strukturami wtórnymi I rodzaju charakteryzują się zmniejszoną zwilżalnością przez środki smarne, a pokryte strukturami II rodzaju – zwiększoną.

Tabela 4.1. Zewnętrzne oznaki struktur wtórnych

Rodzaj struktur wtórnych na powierzchniach tarcia	Ogólna charakterystyka stanu powierzchni tarcia na poziomie		
	makroskopowym	mikroskopowym	submikroskopowym
I (roztwory stałe utleniaczy w metalach)	Błyszcząca	Błyszcząca, pokryta warstwą szklaną	Homogeniczna (warstwa ciągła bez wyraźnych oznak submikroreliefu)
II (związki chemiczne o niestechiometrycznym składzie chemicznym)	Matowa	Pokryta warstwami o różnym zabarwieniu	Heterogeniczna (obszary wygładzone, pokryte warstwą, i obszary z warstwą zniszczoną)

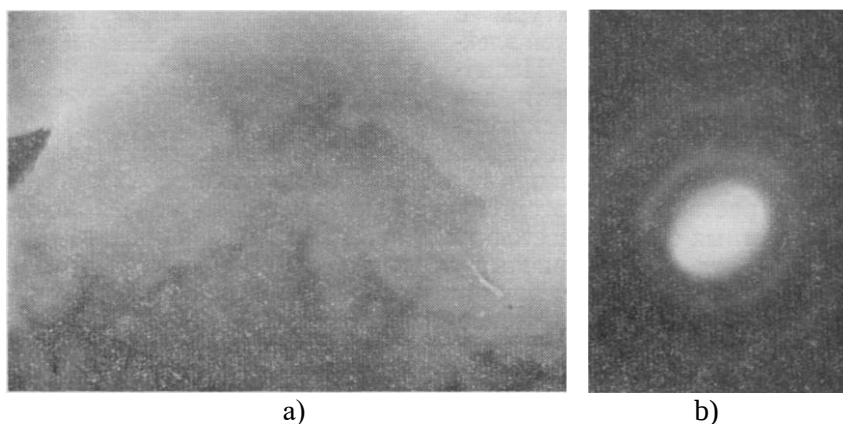
Warunki powstawania struktur wtórnych są przedstawione na schemacie na rys. 4.1. Przy wartości jednostkowej pracy tarcia mniejszej niż A_{jI} na powierzchniach tarcia obserwowane są struktury wtórne I rodzaju, natomiast gdy wartości te są większe od A_{jI} – struktury wtórne II rodzaju. W zakresie A_{jI} – A_{jII} mogą istnieć struktury wtórne rodzaju mieszanego. Dla każdego materiału i środowiska istnieje krytyczna wartość jednostkowej pracy tarcia A_{jed} w której następuje przejście do uszkodzenia.



Rys. 4.1. Zasadniczy schemat formowania struktur wtórnych I i II rodzaju przy zmianie jednostkowej pracy tarcia

Skład chemiczny i fazowy struktur wtórnych jest określony przez warunki procesu strukturalno-termicznej aktywacji i pasywacji powierzchni tarcia. Gdy atomy różnych związków chemicznych oddziałują między sobą mogą tworzyć roztwory stałe, związki chemiczne lub ich mieszaniny mechaniczne. Powstawanie struktur wtórnych następuje w ekstremalnych warunkach równowagi. Aktywacja strukturalno-termiczna powoduje gwałtowny wzrost entropii i entalpii w objętościach powierzchniowych metalu, która gwałtownie zmienia stałe równowagi reakcji. W tych warunkach występuje znaczne odchylenie od praw rozpuszczalności równowagowej i tworzenia związków chemicznych.

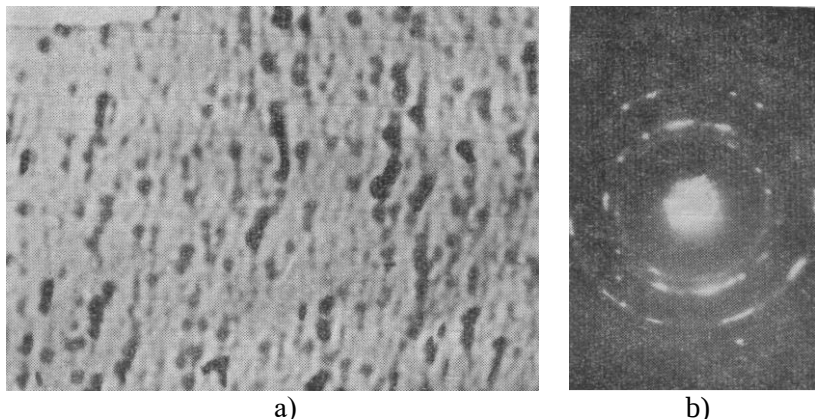
Na rys. 4.2, 4.3 przedstawiono wyniki analizy elektroniczno-mikroskopijnej i elektroniczno-graficznej struktur wtórnych. Formowanie struktur wtórnych I rodzaju odbywa się w procesie tarcia próbek miedzi z prędkością poślizgu 0,5 m/s oraz obciążeniem 2 MPa w środowisku oleju wazelinowego.



Rys. 4.2. Struktury wtórne I rodzaju na powierzchni miedzi: a) zdjęcie z mikroskopu TEM; b) dyfraktogram

Struktury wtórne II rodzaju tworzą się podczas tarcia próbek aluminiowych z prędkością poślizgu 0,2 m/s i jednostkowym obciążeniem 2 MPa w środowisku oleju wazelinowego. Tworzeniu się struktur wtórnych II rodzaju sprzyja rosnąca rola aktywacji termicznej w wyniku czego zwiększa się

intensywność procesów dyfuzyjnych w obszarach granicznych nieuporządkowanych struktur ultradyspersyjnych. Zwiększenie koncentracji tlenu w tych obszarach prowadzi do tworzenia się związków chemicznych i ich uwolnienia w postaci zdyspergowanych izolowanych wtrąceń.



Rys. 4.3. Struktury wtórne na powierzchni aluminium z dyspersyjnymi wydzieleniami fazy wzmacniającej: a) zdjęcie z mikroskopu TEM x30000; b) dyfraktogram

Podczas zużycia mechanicznego bardzo istotne znaczenie ma stan i właściwości cienkiej warstwy powierzchniowej elementów, które mają wpływ na charakter formujących się struktur wtórnych i rozwój zjawiska zdolności adaptacyjno-strukturalnej materiałów w procesie eksploatacji.

W 1974 r. prof. B.I. Kostecki i jego współpracownicy odkryli nieznanie wcześniej zjawisko zdolności adaptacyjno-strukturalnej materiałów wynikających z tarcia – prawidłowości zmieniających strukturę i właściwości warstw powierzchniowych w energetycznie korzystnym kierunku, czyli restrukturyzację struktury początkowej warstw powierzchniowych materiałów ściernych w stabilną, energetycznie korzystniejszą formę dla danych warunków obciążenia. Stabilność kształtu zapewnia minimalne straty energii tarcia, a wykonana praca na zużycie jednostki objętości materiału warstw powierzchniowych zostaje zmaksymalizowana. W związku z tym proces tarcia zewnętrznego stabilizuje się, następuje równowaga dynamiczna i samoregulacja systemu. Naruszenie równowagi dynamicznej powoduje przejście układu do innego poziomu, a w warunkach krytycznych – przejście do procesów zużycia patologicznego i uszkodzenia elementów węzłów tarcia.

Restrukturyzacja jest wykonywana przez zmianę właściwości mechanicznych i fizykochemicznych warstw powierzchniowych, przejście do stanu cienkowarstwowego, wysokoprzezroczystego i odpornego na działania fizykochemiczne warstw powierzchniowych. Jednocześnie zachodzi szczególna zmiana topografii powierzchni tarcia, a materiał powierzchni roboczej znajduje się w stanie ultradyspersyjnym.

Zjawisko zdolności adaptacji strukturalnej materiałów przy tarcu związane jest z występowaniem sprężysto-plastycznego odkształcenia, aktywacji strukturalno-termicznej i chwilowej pasywacji – utworzeniem struktur wtórnych. Jednocześnie zachodzi rozdrabnianie struktury i jej orientacja – formuje się submikrorelief zapewniający optymalną topografię powierzchni. Ten zbiór procesów wzajemnie powiązanych powodujących strukturalną zdolność adaptacyjną materiałów zapewnia stabilny stan dynamiczny odporności na ścieranie i antyfrakcyjność tylko pod warunkiem równowagi dynamicznej i samoregulacji procesu oraz przestrzegania współzależności energetycznych:

$$\int_V \frac{\Delta E(V)}{A} dV = \min$$

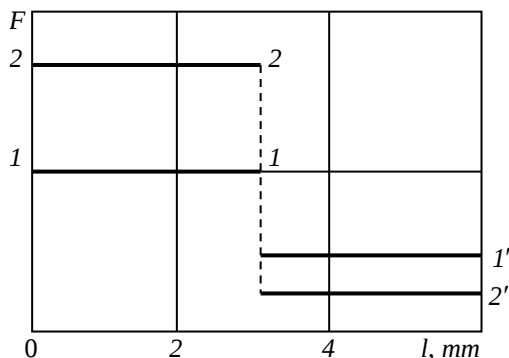
$$\frac{A}{I} = \max$$

gdzie: ΔE – zmiana energii pochłoniętej; A – praca sił tarcia; V – objętość; I – zużycie.

Specyfika równowagi dynamicznej i samoregulacji obejmują: stabilizację w czasie wszystkich procesów związanych ze zjawiskiem zdolności adaptacji strukturalnej.

Obecność warstw tlenków na powierzchni metalu podczas deformacji znacząco zmienia nie tylko geometrię powierzchni, ale również jej właściwości fizyczne. Odpowiednio, warunki oddziaływania powierzchni i tworzenia zewnętrznych sił tarcia zmieniają się zasadniczo. Na rys. 4.4 przedstawiono wielkości sił tarcia, które powstają w obszarach z warstwami tlenkowymi i bez nich. Wartość sił tarcia, z reguły, w obszarach z warstwami tlenkowymi jest znacznie niższa (o 3 do 4 razy) niż w obszarach bez tlenków. Przy zużyciu mechanochemicznym ilość tlenu w warstwach powierzchniowych zwiększa się o 30–100 razy w porównaniu do zawartości początkowej – 0,019%. Siły tarcia na odkształconych powierzchniach są większe niż na powierzchniach metalu, które nie były poddawane deformacji. Podane dane dotyczą tarcia wgłębnika z indiuma po powierzchni aluminium.

Struktury wtórne są główną cechą antyfrakcyjności. Ze względu na właściwości składu chemicznego warstw ochronnych tlenków, dyfuzja pomiędzy powierzchniami kontaktowymi jest praktycznie nieobecna. Tak więc, w obecności struktur wtórnych w procesie tarcia jednocześnie tłumione są dwa główne elementy zewnętrznych sił tarcia – mechaniczny, związany z chropowatością oraz składnik, związany ze zjawiskami dyfuzji.



Rys. 4.4. Zależność siły tarcia od obecności warstwek tlenków na powierzchni aluminium: 1 – polerowana bez warstwy tlenków; 1' – polerowana z warstwą tlenkową; 2 – na zdeformowanej bez warstwy tlenków; 2' – na zdeformowanej z warstwą tlenkową

Osobliwości struktur wtórnych obejmują lokalizację powierzchni i ultrarozproszoną strukturę niestechiometrycznych związków materiału ze środowiskiem, co decyduje o najwyższej wytrzymałości struktur wtórnych, zbliżając się do teoretycznej wytrzymałości materiałów wejściowych. Struktury wtórne zapewniają minimalizację niszczenia warstwy powierzchniowej ze względu na wysoką wytrzymałość i zmniejszenie sił tarcia, jak również ekranowanie (hamowanie) przemian fizyko-chemicznych i zużycia warstw przypowierzchniowych materiału.

B.I. Kostecki zbadał dużą ilość elementów maszyn narażonych na różnego rodzaju zużycia, a dzięki zastosowaniu złożonej metody badawczej zdefiniował przyczyny i prawidłowości procesów zużycia powierzchni tarcia przy różnych rodzajach zużycia. Wskazuje on tylko na jeden rodzaj zużycia, który jest dozwolony podczas normalnej pracy elementów maszyn jakim jest rodzaj mechanochemiczny. Dlatego główne zadanie przeciwdziałania zużyciu trących elementów maszyn sprowadza się do wyeliminowania niepożądanych rodzajów zużycia (zatarcia, fretting-korozji, ściernego, erozyjnego itp.) i stworzenia warunków dla przejścia do zużycia mechanochemicznego.

4.2. Zużycie ściernie

4.2.1. Pojęcia ogólne

Materiał ścierny jest minerałem pochodzenia naturalnego lub sztucznego, którego ziarna mają wystarczającą twardość i zdolność do skrawania (skrobania, drapania).

Zużyciem ściernym nazywa się niszczenie powierzchni elementów w wyniku jej oddziaływania z cząstkami stałymi przy obecności względnego przesunięcia.

W roli takich cząstek występują:

a) sztywno zamocowane twarde ziarna, które kontaktują się stycznie lub pod niewielkim kątem natarcia do powierzchni elementów (na przykład zarysowania przez obce cząstki stałe miękkich materiałów przeciwnych);

b) luźne cząstki stykające się z powierzchnią elementów (na przykład transport elementów nasypowych, przewożonych odpowiednimi urządzeniami, cząstki ściernie w glebie podczas pracy maszyn rolniczych, itd.);

c) wolne cząstki, które znajdują się pomiędzy elementami kontaktującymi;

d) wolne cząstki abrazyjne pochłaniane przez ciecz lub gaz.

Zużyciu abrazyjnemu (ściernemu) podlegają elementy maszyn rolniczych, drogowo-budowlanych, górniczych, maszyn transportowych i urządzeń transportowych, węzły urządzeń metalurgicznych, obrabiarek, podwozia samolotów, wirniki i prowadnice turbin hydraulicznych, łopatki turbin gazowych, rury urządzeń wodnych i kotłów parowych, rury i pompy pogłębiarek, urządzenia wiertnicze przemysłu naftowo-gazowego, łożyska wałów i inne.

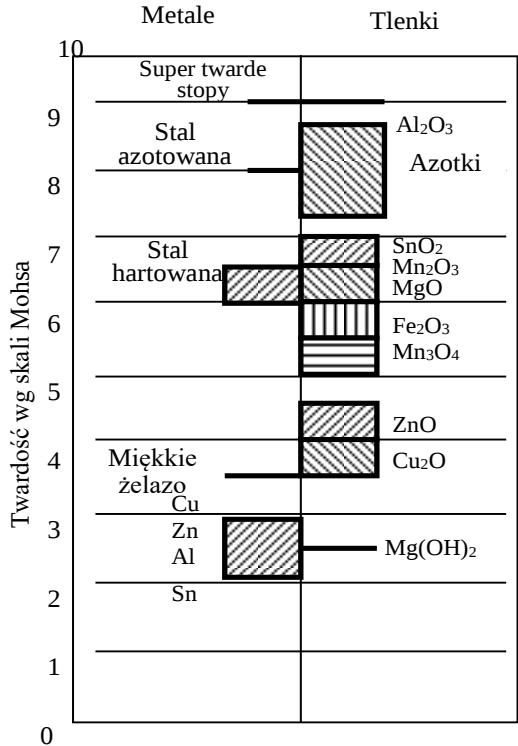
Na proces zużycia abrazyjnego może wpływać charakter cząstek abrazyjnych, agresywność środowiska, właściwości fizyko-mechaniczne powierzchni, oddziaływania uderzeniowe, nagrzewanie i inne czynniki. Charakterystycznym dla zużycia abrazyjnego jest mechaniczny charakter zużycia powierzchni [2–4].

Zużycie abrazyjne wywołują ziemia, ruda, węgiel i skała, popiół, pył, które spadają na powierzchnię tarcia, wiór metaliczny, warstwy tlenkowe, zamocowane na powierzchni tarcia, nagar i produkty zużycia, zwłaszcza twarde cząstki składników strukturalnych, które powstają w wyniku zużycia.

Cząsteczki abrazyjne mogą mieć różne kształty i być zorientowane na różne sposoby do powierzchni. Zdolność ziarna abrazyjnego do wciskania się w powierzchnię zależy nie tylko od współzależności (stosunku) ich twardości, ale także od geometrycznego kształtu ziarna. Zatem ziarno o wypukłej powierzchni lub ostrej krawędzi może być wciśnięte nawet bez uszkodzeń w płaską powierzchnię ciała o wyższej twardości. Wyjaśnia to fakt zużycia metalu cząstkami abrazyjnymi z twardością, mniejszą od jego twardości. Czasami twardość warstw tlenkowych jest większa od twardości samych metali (rys. 4.5). Najwyższą twardość (9 w skali Mohsa) ma tlenek glinu Al_2O_3 , twardość samego aluminium jest mała (~ 2). W rezultacie w procesie tarcia aluminium po stali formują się warstwy tlenku Al_2O_3 , które niszczą powierzchnię tarcia.

Miękki tlenek praktycznie nie powoduje działania ściernego innej powierzchni. Magnez tworzy miękki tlenek $Mg(OH)_2$, dlatego zużycie magnezem metali o wyższej twardości jest niewielkie nawet w sprzyjających warunkach tworzenia tlenków. Fakt ten częściowo wyjaśnia to, że tłoki z stopów magnetycznych w mniejszym stopniu ścierają (rysują) i zadzierają ściany

cylindrów niż tłoki wykonane ze stopów aluminium. Czysto abrazyjne zużycie tlenkami glinu zachodzi w parach tarcia ze stopu aluminium, które są stosowane w niektórych konstrukcyjnych węzłach samolotów. Tlenki powodują zużycie ściernie węzłów urządzeń metalurgicznych, które pracują w wysokiej temperaturze i niedostatecznym smarowaniu.



Rys. 4.5. Twardość metali i warstw tlenków według skali Mohsa

4.2.2. Ścierniwa i warunki zużycia ściernego

Materiały ściernie są to cząstki różnych materiałów pochodzenia naturalnego lub sztucznego mające twardość, która zwykle przekracza twardość ciała oddziałującego z nimi.

Naturalnymi materiałami ściernymi są piaskowiec, korund, szmergiel, kwarc, diament i inne materiały, które występują w postaci pyłu, piasku, gleby, skały. Sztuczne materiały ściernie są wytwarzane przez przemysł w postaci proszków, kół i skór ściernych i innych wyrobów. Należą do nich tlenki, węgliki, borki, azotki, sztuczne diamenty i inne. Materiałem ściernym mogą być również metale lub stopy, na przykład produkty zużycia pary trącej (tabela 4.2).

Tabela 4.2 Twardość materiałów ściernych

Materiał	Twardość HV, GPa
Naturalne materiały ścierne	
Gips	0,29
Marmur	1,08
Baryt	1,18
Wapień	0,98–1,47
Fluoryt	1,72
Cynkit	1,47–3,12
Węgiel	0,27–2,0
Węgiel (karbowana tkanina)	4,17
Dolomit	3,14–4,07
Hausmanit	4,27
Manganit	5,73
Nefryt	5,88
Szkło	5,85–6,03
Hematyt	5,65–6,17
Ortoklaz	7,08
Żywica uranowa UO_2	6,6–7,88
Uraninit	7,67–8,23
Chalcedon	9,07
Szary piryt	9,8
Krzemień	9,18–9,8
Kwarc: piasek zadymiony kryształ górski	7,84–10,8 10,58–12,0 10,29–11
Kwarcyt	11,07
Kasyteryt	9,89–12,04
Magnezyt	12,9
Granit	13,98
Granit: szary	13,62
czerwono-brązowy	14,16
różowy	15,58
z warstwą tlenków żelaza	16,46
Topaz	14,46
Korund (minerał)	21,15
Rubin	23,52
Diamant	100
WO_3	1,5–0,15
NiO	1,96–3,92
Cu_2O	2,01–2,03
CuO	2,05–2,49
CaO	3,61–3,78

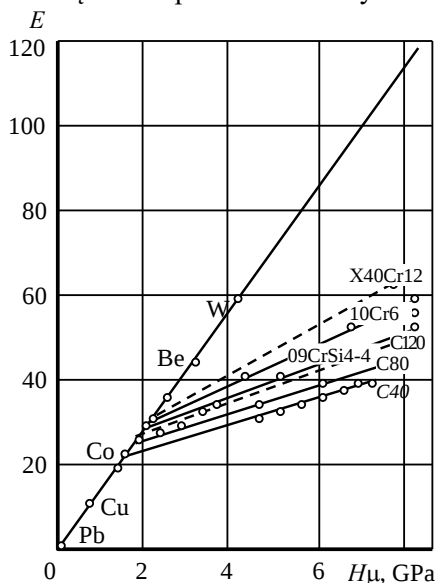
cd. tabeli 4.2	
Fe ₃ O ₄	4,67–7,84
FeO	5,39
Fe ₂ O ₃	6,87–10,98
Nb ₆ O	5,39
MoO ₃	5,70–0,46
V ₂ O ₅	6,41–8,56
TiO ₂	6,37–9,61
Y ₂ O ₃	7,25
Nb ₂ O ₅	7,26
UO ₂	6,60–7,88
Hf ₃ O (płynny)	9,31
HfO ₂	10,25–0,82
ZrO ₂	9,81–12,08
ThO ₂	9,69–10,93
BeO	9,45–14,90
Ta ₂ O ₅	10,4–0,25
MgO	11,25
Szamet	11,7–13,6
SnO ₂	13,53
Korund syntetyczny	20,2–21,58
Korund elektryczny	20–22
Szafir	24,67–26,68
Cr ₂ O ₃	29,15
WC	16,42
TiC	31,06
ZrC	28,91
WB	36,26
VN	11,39
BN	80
TiN	32

4.2.3. Zużycie powierzchni twardymi ziarnami

Badania laboratoryjne odporności na ścieranie czystych metali, strukturalnie-jednorodnych stopów kolorowych i stali w warunkach tarcia po twardych ziarnach, nieruchomo zamocowanych na powierzchni styku bez nagrzewania i agresywnego środowiska zostały przeprowadzone przez M. M. Chruszczowa. Zużycie realizowane było za pomocą szlifującej skóry, której właściwości w czasie pozostawały niezmiennie. Wyniki przedstawiono na rys. 4.6. Za względną odporność na zużycie E przyjął stan poddany obróbce cieplnej.

Stwierdzono, że względna odporność na ścieranie czystych metali jest liniowo zależna od mikrotwardości. Badane punkty znajdują się na prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Badanie babbittów na

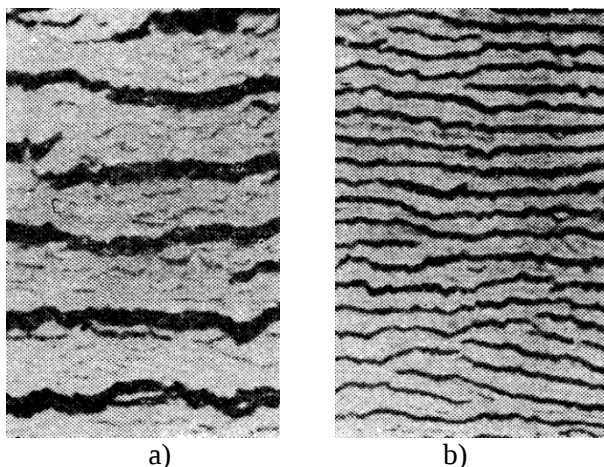
bazie cyny, ołowiu i cyno-ołowiu oraz brązu ołowiowego o różnej mikrotwardości różnych elementów konstrukcyjnych nie wykazało wyraźnej zależności między odpornością na ścieranie a mikrotwardością. Jednak we wszystkich przypadkach odporność na zużycie stopów była mniejsza niż w przypadku czystych metali o tej samej twardości. W przypadku stali nie poddanych obróbce cieplnej zależność odporności na zużycie od twardości jest taka sama jak w przypadku czystych metali. Odporność na ścieranie stali po ich hartowaniu i odpuszczaniu wzrasta wraz ze wzrostem twardości zgodnie z prawem liniowym, ale mniej intensywnie niż w przypadku czystych metali i stali nie poddanych obróbce cieplnej. Eksperymenty wykazały, że poprzednia obróbka plastyczna nie zwiększa odporności na zużycie czystych metali i stali.



Rys. 4.6. Zależność względnej odporności na zużycie przy tarcu po powierzchni ściernej od mikrotwardości technicznie czystych metali i stali poddanych obróbce cieplnej

Mechanizm zużycia ściernego materiałów polimerowych zależy od stopnia ich elastyczności. W wysokoelastycznym materiale (guma, wulkollan, poliuretanowy wulkanizat i inne) cząstki ściernie łatwo wciskają się bez powodowania znacznego odkształcenia plastycznego, nawet w przypadku głębokiego przenikania. Ziarno ściernie przesuwają się po powierzchni, co prowadzi do zmian w geometrii powierzchni. Pomijając całościowy obraz stanu naprężeń w materiale, łatwo sobie wyobrazić, że siła tarcia przed ziarnem powoduje ściskanie materiału, a za nim rozciąganie. Pod wpływem wielokrotnie powtarzających się naprężeń rozciągających występują mikropęknięcia, część powierzchni materiału odkształca się z utworzeniem reliefu falopodobnego,

który składa się z występow i wgłębień w kierunku prostopadłym do ruchu materiału ściernego (rys. 4.7). Taka tekstura obserwowana była przez wielu badaczy, na przykład takich jak Sz.M. Bilyk. Pod wpływem zmiennych naprężeń rozciągających zużywają się pierwotnie powstałe nierówności występow, ale pozostaje falisty relief powierzchni.



Rys. 4.7. Powierzchnia gumy po badaniu na zużycie abrazyjne na betonowych drogach z chropowatą (a) i gładką (b) powierzchnią, x14 (według Szalamacha)

4.2.4. Zużycie cząsteczkami ściernymi w strumieniu cieczy lub gazu

Zakładając, że środowisko nie jest agresywne w odniesieniu do powierzchni elementów, konieczne jest rozróżnienie dwóch przypadków oddziaływania ścierniwa z materiałem.

1. *Zderzenie przy kącie natarcia $\alpha = 90^\circ$.* W zależności od masy cząstek, prędkości ich spadku, własności ściernych i właściwości fizyko-mechanicznych materiałów następuje odkształcenie sprężyste, odkształcenie plastyczne, kruche pękanie, reelekcja z oddzielaniem materiału w postaci płatków. Według K. Velinhera i G.Vetsa największą odporność na ścieranie przy twardości cząstek ściernych równej i wyższej od twardości kwarcu i prędkości strumienia przepływu około 100 m/s, posiada guma i materiały spiekane. Bardzo niską odporność na ścieranie ma bazalt i szkło. Odporność na ścieranie stali węglowych i narzędziowych jest w przybliżeniu taka sama.

2. *Uderzenie pod kątem, $0 < \alpha < 90^\circ$.* Przy takich kątach natarcia na rodzaj uszkodzenia powierzchni silnie wpływa styczna składowa pędu oraz odporność materiału działanie sił stycznych na powierzchnię. Dla gumy, zgodnie z danymi V.M. Kaszceewa, prędkość zużycia zmniejsza się wraz ze wzrostem kąta natarcia do kąta prostego, a następnie staje się stała. W przypadku innych materiałów, w zależności od stosunku twardości materiału ściernego

i powierzchni, szybkość zużycia może stale wzrastać i osiągać maksimum przy pewnym kącie natarcia, a następnie zmniejszać się.

W niektórych przypadkach, odporność na ścieranie gumy jest kilkakrotnie wyższa niż stali hartowanej. W pozostałych przypadkach (przy zerowym kącie natarcia) odporność na ścieranie kauczuku jest niższa niż stali, ze względu na zmęczeniowy charakter uszkodzenia powierzchni tarcia.

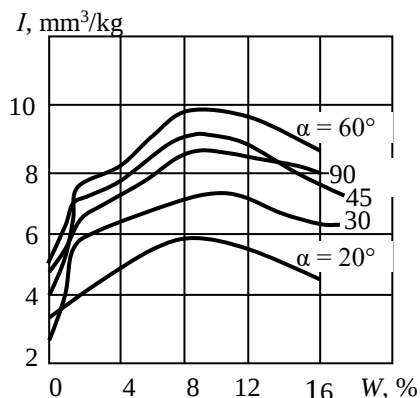
4.2.5. Wpływ wilgotności i agresywności środowiska na zużycie ściernie

Wilgotność zwiększa intensywność zużycia ściernego tak samo jak i agresywność środowiska. L.A. Yuksti i I.R. Kleys przeprowadzili kilka serii testów laboratoryjnych w celu określenia wpływu ilościowej zależności wilgotności materiału ściernego, agresywności środowiska, kąta natarcia i prędkości strumienia na intensywność zużycia urządzenia do przetwarzania torfu w temperaturze otoczenia. Badania przeprowadzono na przyspieszaczach odśrodkowych. Stosowali piasek zwilżony wodą, ekstraktami z torfu lub słabymi roztworami kwasów organicznych. Wilgotność piasku wynosiła od 0 do 16%, prędkość uderzeń cząstek ściernych o powierzchnię próbek wynosiła od 29 do 82 m/s. Wraz ze stalą S235, która została przyjęta jako standardowa, badali również stale XCr17Ti, X12CrNiTi18-9, 20Cr, X45CrNiVMo14-14-2-1 i napawaną odporną na zużycie powłokę SNGN na bazie niklu. Według Yu.A.Ogradinsky, T.I. Podoynitsyna i E.I.Yanvareva stop ten ma bardzo wysoką odporność w warunkach erozyjnego i silnego działania ściernego, a także wysokich temperatur.

Otrzymane wyniki przez L.A.Yukstima i I.R. Kleysa o badaniu zużycia próbek ze stali S235 w zależności od wilgotności ścierniwa i kąta natarcia, przedstawiono na rys. 4.8. Przy zawartości wilgoci w materiale ściernym wynoszącej 1% (woda z kranu) intensywność zużycia wzrasta 1,2–2,7 razy w zależności od kąta natarcia.

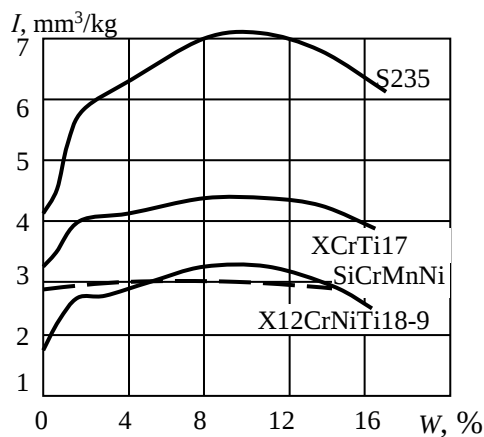
Skokowe zwiększenie intensywności zużycia przy małych dodatkach wody obserwuje się również w stalach odpornych na korozję (rys. 4.9). Intensywność zużycia stopu SNGN nieznacznie zależy od wilgotności materiału ściernego.

Badając wpływ agresywności środowiska na zużycie ściernie, użyto wody, ekstraktów z torfu, a także słabych roztworów kwasów octowych i szczawiowych. Wyniki badań podano w tabeli. 4.3 (ścierniwo – piasek, wilgotność $w = 8\%$, $v = 20$ m/s, $\alpha = 30^\circ$, $T = 20^\circ\text{C}$).



Rys. 4.8. Zależność intensywności zużycia próbek ze stali S235 od zawartości wilgotności w ścierniwie (%) i kąta natarcia ścierniwa (prędkość przepływu $v = 29$ m/s)

Eksperymenty w warunkach przemysłowych wykazały zalety powłok odpornych na zużycie. Po 8,5 miesiącach pracy w najbardziej zużywających miejscach torfu stwierdzono, że zużycie próbek z napawaną warstwą SNGN wyniosło od 5,1 do 9,5 razy, stali XCrTi17 od 3,1 do 3,4 razy, a stali X12CrNiTi18-9 od 3,4 do 4 razy mniej od zużycia stali S235. Pomędzy wynikami eksperymentów korozyjnych pod wpływem statycznego działania środowiska ciepłego a zużyciem w strumieniu materiału ściernego nawilżonego tym środowiskiem nie ustalono zależności korelacyjnej.



Rys. 4.9. Krzywe zużycia różnych materiałów w strumieniu wilgotnego ścierniwa ($w = 29$ m/s, $\alpha = 30^\circ$)

Tabela 4.3 Intensywność zużycia stali i stopów w różnych środowiskach

Środowisko	Prędkość zużycia materiałów próbek, mm ² /godz.					
	Stale					
	S235	XCrTi17	20Cr	X12CrNiTi18-9	VT1-0	SiCr MnNi
Woda	4,6	3,4	2,9	2,1	4,0	2,6
Kwas octowy 1 %	4,9	3,6	3,3	2,3	4,1	3,1
2%	5,0	3,6	3,5	2,5	4,4	3,5
3%	5,3	3,7	3,6	2,7	4,5	3,1
Kwas szczawiowy 0,17 H	4,9	3,8	4,1	2,5	4,3	2,6
0,34 H	5,0	3,9	4,3	2,9	4,6	2,2
Ekstrakt torfu	4,9	3,3	3,2	2,5	4,4	2,4
Kwas octowy 2%*	6,2	3,8	3,5	2,6	4,3	3,2
Suchy piasek	3,7	3,1	3,0	2,1	3,8	2,5
* badanie z przerwami po 15 minut						

Wyniki badań (tabl. 4.3) wpływu 15-minutowych przerw na zużycie ściernie materiałów wykazują, że w porównaniu z ciągłym strumieniem zużycie stali S235 wzrosło o 24%, stali 08H17T o 2–3%, podczas gdy zużycie stali 12H18N9T, stopu SNHN i tytanu technicznego VT1-0 pozostały na tym samym poziomie.

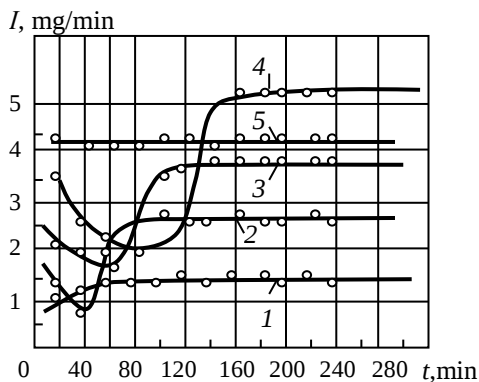
4.2.6. Zużycie ściernie w korozyjno-aktywnych środowiskach

Wiele węzłów tarcia i elementów maszyn roboczych zużywa się w wyniku tarcia o luźny materiał ścierny w obecności środowisk korozyjno-aktywnych. W wyniku reakcji utleniania-redukujących i procesów tribochemicznych na powierzchniach tarcia następuje emisja wodoru, którego część ulega dyfuzji w stal. W celu identyfikacji prawidłowości tego rodzaju zużycia V. Kolesnikov i A.V. Chelohyan przeprowadzili eksperymenty na stanowisku, które umożliwia utrzymanie stałego ciśnienia w przedziale od 0 do 1 MPa. Jako środek ścierny użyto piasku kwarcowego o rozmiarach 200 mikronów. Korozyjno-aktywnym środowiskiem była masa roślinna, cząstka której wynosiła 20%. Próbkę wykonano ze stali C45 o twardości 20–22 HRC. Co 20 minut wyznaczano zużycie masowe próbek i stopień ich nasycenia wodorem metodą anodowego rozpuszczania. Prędkość tarcia we wszystkich eksperymentach wynosiła 3 m/s.

Wyniki doświadczeń wykazały, że po 4 godzinach pracy zawartość wodoru w warstwie powierzchniowej próbki wzrosła o 2,8 razy. Na rys. 4.10 przedstawiono

zależność zmiany prędkości zużycia od czasu pracy przy różnych obciążeniach jednostkowych. Charakter malejący krzywych od 2 do 4 wyjaśnia się tym, że wodór, który jest uwalniany przez tarcie, dyfunduje do stali i w pierwszym okresie nieco zwiększa jej mikrotwardość, co prowadzi do zwiększenia odporności na zużycie. Wraz ze wzrostem ciśnienia masy abrazyjnej czas do nastąpienia kruchości próbki ze stali zwiększa się, ponieważ wodór, rozpuszcza się w stali dyfundując do strefy o podwyższonej temperaturze i maksymalnego odkształcenia plastycznego. Wraz ze wzrostem ciśnienia głębokość deformacji plastycznych wzrasta, a ilość metalu, która jest narażona na silne uwodornianie podczas tarcia też rośnie. Zwiększa to czas potrzebny do uwodorniania objętości do określonej wartości krytycznej, przy której zaczyna się proces zmęczenia.

Jak można zoobserwować na rys. 4.10 na krzywej 1 nie ma minimum prędkości zużycia. Przy ciśnieniu 0,05 MPa, specyficzna zawartość wodoru w stali osiąga wartość krytyczną już w ciągu pierwszych 20 minut eksperymentu.



Rys. 4.10. Zmiana prędkości zużycia stali w zależności od czasu tarcia przy ciśnieniu:
1) 0,05 MPa; 2) 0,1 MPa; 3) 0,15 MPa; 4) 0,2 MPa; 5) 0,2 MPa (brak środowiska korozyjno-aktywnego)

Na krzywej 5 przedstawiono zużycie stali pod wpływem ścierniwa bez środowiska korozyjno-aktywnego. W tej próbce nie zachodzi dyfuzja (wzrost zawartości) wodoru i prędkość zużycia pozostaje stała.

Badania prowadzone w wodzie morskiej i słodkiej wykazały podobne wyniki. Odporność na zużycie próbek przy zużyciu ściernym w wodzie morskiej i słodkiej była praktycznie taka sama. W tym przypadku zawartość wodoru w warstwie powierzchniowej stali w procesie tarcia w wodzie wzrasta 3 razy.

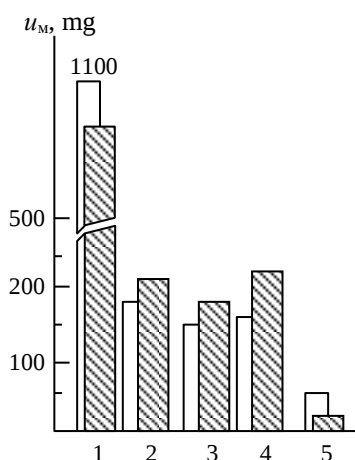
Stal hartowana jest bardziej wrażliwa na zwiększenie zawartości wodoru. Przy rosnącym nacisku stopień oddziaływania środowiska w wyniku zwiększenia zawartości wodoru zmniejsza się, a decydującym czynnikiem odporności na zużycie stali przy zużyciu ściernym staje się twardość.

W badaniu wpływu kwasowości środowiska na proces uwodornienia stali i jej odporności na zużycie stosowane były następujące elektrolity: 3% roztwór

kwasu octowego, 3% roztwór NaOH, sok roślinny, woda morska i słodka. Badane były rolki ze stali (stal C45 o twardości 20–22 HRC i 48–50 HRC) pracujące w warunkach zmęczenia kontaktowego przy walcowaniu ciernym. Oczywiście nie było kompletnej analogii pomiędzy odkształceniem sprężysto-plastycznym powierzchni rolek toczonej i kontaktowym cyklicznym działaniem cząstek abrazyjnych. Jednakże, z powodu zużycia materiału w obu przypadkach ze względu na powstawanie i rozwój niedoskonałości (defektów) w objętości deformowanej, jego nawodnienie miało jednakowy wpływ na odporność na zużycie stali jak przy walcowaniu ciernym, tak i w procesie polideformacyjnym zużycia materiałów cząstkami ściernymi.

W badaniu prędkość obrotowa rolek wynosiła 16 s^{-1} , ciśnienie 760 MPa. Smarowanie przeprowadzono metodą zanurzeniową. Zużycie rejestrowano przez 0,5 miliona cykli obciążeniowych.

Wyniki eksperymentów (rys. 4.11) wykazały, że najbardziej zużywają się rolki, które są zwilżane 3% roztworem kwasu octowego (pH 2,5). W przypadku zwilżenia sokiem roślinnym, wodą morską lub słodką (pH = 5,7) zużycie wynosiło w granicach od 150 do 200 mg. Przy stosowaniu 2% roztworu NaOH (pH 11,5), tj. środowiska alkalicznego, zużycie było minimalne (14–40 mg).



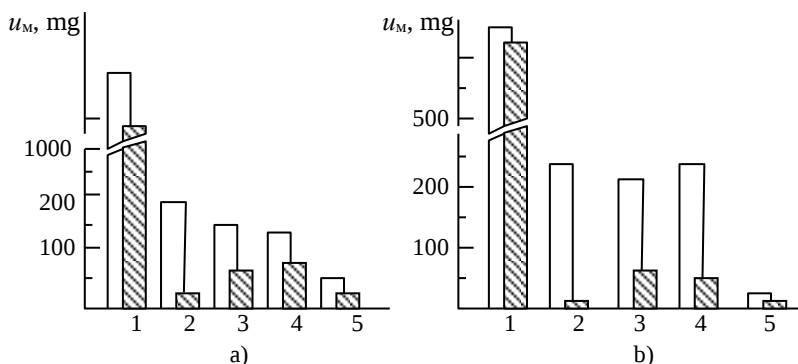
Rys. 4.11. Wpływ środowiska na zużycie stali C45 niehartowanej i hartowanej (kreskowane słupki) w środowiskach: 1) 3% roztwór kwasu octowego; 2) woda morska; 3) woda słodka; 4) sok roślinny; 5) 3% roztwór sody kaustycznej

Przy oddziaływaniu kontaktowym w roztworze kwasu octowego, zużycie rolek z miękkiej niehartowanej stali C45 jest większe niż w przypadku hartowanych. Jednocześnie, przy stosowaniu środowisk neutralnych lub niskotlenkowych, zużycie rolek hartowanych okazało się większe. Hartowanie stali samo w sobie prowadzi do powstawania znacznych naprężeń wewnętrznych. Dlatego nawet niewielka ilość wodoru w warstwie

powierzchniowej może prowadzić do nadmiernej kruchości. Ponadto zmniejsza się zdolność dyfuzji wodoru w wyniku hartowania, co prowadzi do silniejszego uwodornienia warstw powierzchniowych, a następnie przyspieszenia procesu kruchości.

Zawartość wodoru w warstwie powierzchniowej stali hartowanej wzrasta w procesie tarcia w obecności wody słodkiej i morskiej 3–3,6 razy, w niehartowanej stali 2,4–2,8 razy, a przy tarcu w środowisku soku roślinnego – 3,8 i 3,2 razy odpowiednio dla stali hartowanej i niehartowanej.

Przy tarcu wałków stalowych w kwaśnym środowisku (roztworze kwasu octowego) określona zawartość wodoru w warstwach powierzchniowych wzrasta odpowiednio 4,2 i 4,8 razy w przypadku próbek niehartowanych i hartowanych. Jednakże odporność na zużycie hartowanych próbek jest wyższa niż niehartowanych. Wynika to z faktu, że intensywność zużycia powierzchni tarcia w tym przypadku zależy od szybkości powstawania powierzchni juwenilnej (anomalnie czystej) i szybkości procesów utleniania. Powstawanie powierzchni juwenilnych przy tarcu rolek niehartowanych jest szybsze niż hartowanych (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Wpływ środowiska na zużycie rolek z niehartowanej (a) i hartowanej (b) stali C45 podczas pracy bez polaryzacji i podczas polaryzacji katodowej (kreskowane słupki). (oznaczenia jak na rys. 4.11)

W procesie tarcia w środowisku alkalicznym wysoka odporność na zużycie rolek wynika z braku możliwości wzrostu określonej zawartości wodoru. Można to wytłumaczyć faktem, że wodór, uwalniany w procesach tribochemicznych, reaguje z jonami OH tworząc wodę.

Tak więc, w celu zmniejszenia stopnia nawodorowania próbki ze stali, konieczne jest zwiększenie stężenia jonów OH^- na powierzchni tarcia. W dalszych badaniach osiągnięto to przez wprowadzenie do roztworu chemicznie bardziej aktywnej elektrody niż aktywność stali, która jest chroniona od nawodorowania, poprzez utworzenie między nimi obwodu zamkniętego elektrycznie. W tym przypadku dodatkowa elektroda jest anodą, a stal jest katodą. Na anodzie zachodzi proces utleniania, a na katodzie proces redukcji.

W środowiskach neutralnych i alkalicznych (woda, neutralne roztwory soli, roztwory słabych kwasów organicznych, gleby, itd.) na katodzie przebiega proces depolaryzacji katodowej.

W celu przeprowadzenia doświadczeń porównawczych zastosowano elektrody cynkowe (chemicznie bardziej aktywna niż stal) i miedziowe (mniej aktywna), tworząc elektrycznie zamkniętą pętlę pomiędzy elektrodą i rolką. Zastosowanie elektrody miedziowej nie wpływa znacząco na proces zużycia zarówno rolek hartowanych jak i niehartowanych. Jednocześnie obserwuje się tylko niewielki (w środowisku kwaśnym i neutralnym) wzrost stopnia nawodorowania i zużycia w porównaniu z badaniami bez wprowadzania elektrolitu. Natomiast elektroda cynkowa ma istotny wpływ na proces zużycia. Porównanie uzyskanych wykresów pokazuje, że wprowadzenie elektrody cynkowej w przypadku roztworów neutralnych prowadzi do znacznego zmniejszenia zużycia. Określenie stopnia uwodorniania próbek pracujących z wykorzystaniem elektrody cynkowej wykazało, że tylko po zwilżeniu rolki roztworem kwasu octowego zawartość jednostkowa wodoru w warstwach powierzchniowych stali zwiększa się 4,6–5,0 razy w porównaniu do zawartości wodoru w stali przed tarciem. Wynika to z faktu, że w elektrolicie o $\text{pH} = 2,5$ w katodzie nie występuje proces depolaryzacji tlenu, a depolaryzacja wodoru. Przy tarcu w innych płynach nie zaobserwowano znacznego wzrostu stopnia nawodorowania. W przypadku zużycia w środowisku alkalicznym wpływ elektrody cynkowej na odporność na zużycie powierzchni rolek jest nieistotny. Uwodornienie stali nie występuje podczas tarcia bez elektrod.

Badanie odporności na ścieranie próbek ze stali C45 przy tarcu o masę materiału ściernego zawierającego środowiska neutralne, przy $v = 3 \text{ m/s}$ i $p = 0,05\text{--}0,20 \text{ MPa}$ wykazały, że w tym przypadku wprowadzenie elektrody cynkowej prowadzi do zmniejszenia stopnia nawadniania i zwiększa się odporność na zużycie stali 1,3–2,4 razy.

W ten sposób polaryzacja katodowa stali przez wprowadzenie w środowisko chemicznie bardziej aktywnej elektrody obniża uwodornianie i może znacznie zwiększyć odporność na ścieranie stali podczas procesu polideformacyjnego zużycia w obecności środowiska lekko kwaśnego lub korozyjno-aktywnego.

Polaryzacja katodowa stali została przeprowadzona dla uniknięcia nawodorowania i zwiększenia odporności na zużycie w celu zwiększenia trwałości elementów roboczych pogłębiarek. Aby to zrealizować, elektrody cynkowe zainstalowano na opancerzonych tarczach pompy uziemiającej 16GruT-8m i aluminiowe na wirniku roboczym. Pompa gruntowa podczas eksperymentów pracowała na glebach piaszczystych z wielkością cząstek ściernych do 1,2 mm. Wyniki badań eksploatacyjnych wykazały, że instalacja elektrod może zwiększyć odporność na zużycie tarcz pancernych 2,1, a wirnika roboczego 1,5 razy.

4.3. Zużycie korozyjno-mechaniczne

Niezawodność maszyn i urządzeń jest określana przez odporność na ścieranie ich elementów. Jako jeden z głównych sposobów przedłużenia czasu ich pracy jest podwyższenie trwałości elementów, które podlegają zużyciu. Zwiększenie odporności na ścieranie połączeń roboczych maszyn i urządzeń może przynieść znaczną oszczędność podczas jego eksploatacji przez zmniejszenie strat materiałów technologicznych, ulepszenie parametrów energetycznych, zmniejszenie kosztów napraw.

Nowoczesne maszyny i urządzenia nie mogą być wykonywane bez użycia węzłów tarcia. W wielu przypadkach (szczególnie w stosunkowo prostych warunkach roboczych) stosowane są z powodzeniem pary tarcia tocznego. W ciężkich warunkach pracy (wysokiej prędkości i obciążenia, obecności agresywnego środowiska ciekłego, braku lub niedostatecznego smarowania) pary tarcia tocznego nie spełniają wymagań niezawodności i trwałości. W takich warunkach pary tarcia ślizgowe są bardziej skuteczne. Decydującym warunkiem jest właściwy dobór materiałów węzłów tarcia ślizgowego. Wiele par tarcia urządzeń z różnych gałęzi przemysłu pracuje w kontakcie z środowiskami korozyjno-aktywnymi, dlatego ich części w warunkach tarcia w elektrolitach są narażone na zużycie korozyjno-mechaniczne (KMZ). Specyfika procesu tarcia metali w elektrolitach polega na jego uzależnieniu od potencjału systemu elektrycznego. Ta okoliczność pozwala połączyć tarcie i KMZ w ciekłych środowiskach elektroprzewodzących w niezależny obszar, co wymaga zaangażowania metod tribologii i elektrochemii.

Przeprowadzono szereg badań w zakresie tarcia i zużycia, opracowano założenia teoretyczne i odkryto pewne efekty fizyko-chemiczne, których zastosowanie pozwala obecnie zwiększyć czas eksploatacji i poprawić niezawodność wielu węzłów tarcia. Jednocześnie KMZ metali i powłok będącym jednym z najbardziej rozpowszechnionych rodzajów ich zużycia nie jest wystarczająco zbadane. Dotyczy to przede wszystkim budowy maszyn, przemysłu spożywczego, chemicznego, naftowego, petrochemicznego, atomowego i innych gałęzi gdzie tarcie metali występuje w środowisku korozyjno-aktywnym.

Korozyjno-mechanicznemu zużyciu metali poświęcona jest monografia B.B. Krumana i V.A. Krupicynej. Podjęto w niej próbę badania i usystematyzowania procesów zachodzących podczas tarcia w neutralnych roztworach soli. Monografia jest jednak nieco przestarzała i nie obejmuje wielu aspektów omawianego problemu.

Celowym jest użycie pomiarów elektrochemicznych do przewidywania szybkości KMZ metali i powłok. Jednakże badania nad KMZ nie mogą być całkowicie zastąpione pomiarami elektrochemicznymi w laboratorium w warunkach potencjału kontrolowanego.

Naukowiec La Kew w 1969 wyraził zaniepokojenie szybkim rozprzestrzenianiem się publikacji opisujących techniki badań elektrochemicznych korozyjnych i zalecał ostrożnie odnieść się do ekstrapolacji wyników uzyskanych w laboratorium (na potencjostacie) na warunki faktyczne wykorzystania materiałów.

Badanie złożonych problemów związanych z KMZ metali w elektrolitach, należy przeprowadzić dla każdego konkretnego przypadku w warunkach laboratoryjnych. Opracowanie zaleceń w celu poprawy trwałości węzła tarcia musi być poprzedzone aprobacją badaniowo-przemysłową wyników badań uzyskanych na próbkach laboratoryjnych.

Podczas tarcia metali w rezultacie wpływu mechanicznego i w wyniku dyskretności kontaktu w warstwach powierzchniowych zachodzą procesy odkształcania, co prowadzi do cyklicznych zmian strukturalnych charakterystycznych dla tych warunków tarcia. Zachodzi rozwój procesów deformacji i dlatego na właściwości mechaniczne metali i ich zachowanie podczas zużycia duży wpływ mają charakterystyki środowisk roboczych.

Zużycie metali w środowiskach korozyjno-aktywnych uwarunkowane jest szeregiem czynników: chemicznym działaniem środowiska, jego kwasowością, obciążeniem, prędkością poślizgu, materiałami par trących itp. Zatem B.B. Kruman i V.A. Krupicyna sądzą, że współczynnik korozyjny określa intensywność zużycia metali w roztworach neutralnych soli tylko dla wartości nacisku normalnego do 5 MPa. Według E.V. Lyalin większą odporność na zużycie w środowiskach agresywnych mają stopy o wyższej odporności chemicznej. Intensywność zużycia w roztworach soli o różnych stężeniach przejawia się w prostej zależności od ilości rozpuszczonego w nich tlenu. W wodzie morskiej i roztworach neutralnych soli intensywność zużycia stopów spada.

O.I. Porter zauważa, że aktywne środowiska ciekłe nie są neutralne dla metali i aktywnie oddziałują z nimi. Dlatego w celu zrozumienia zjawiska zużycia metali należy zbadać oddziaływanie donorowo-akceptorowe na granicy faz, właściwości warstw struktur wtórnych i warstw powierzchniowych metali, ich wpływ na charakter odkształcania powierzchni tarcia itp. Odporność na ścieranie metali w ciekłych środowiskach aktywnych charakteryzuje się nie tylko ze względu na swój charakter i strukturę, a także na właściwości elektrochemiczne kontaktujących par galwanicznych węzłów tarcia. Warunki obciążenia kontaktu ciernego określają rodzaj i intensywność zużycia metali. Wpływają na kinetykę procesów wzmocnienia i zmiękczenia warstw powierzchniowych, rodzaj obciążenia termicznego, zmiany fazowe i konstrukcyjne na powierzchniach tarcia.

W środowiskach korozyjno-aktywnych na powierzchniach tarcia metali tworzą i niszczą się warstwy struktur wtórnych, których właściwości zależą od składu chemicznego roztworu, charakteru i struktury metali, kontaktujących par galwanicznych i warunków obciążania węzłów tarcia. Rodzaj zużycia

i właściwości warstw powierzchniowych określają rodzaj odkształcenia powierzchni tarcia. Stan powierzchni tarcia w elektrolitach metali, procesy tworzenia i zużycia na nich warstw struktur wtórnych przyjęto charakteryzować wielkością potencjału elektrod. W środowisku alkalicznym zmiana potencjału elektrody, jak i zużycie objętościowe próbki jest proporcjonalne do czasu trwania badań. W środowisku kwasowym potencjał elektrody nie zmienia się, pomimo, że zużycie objętościowe próbki zwiększa się wraz ze wzrostem czasu trwania eksperymentu.

Tą różnicę zmiany potencjału elektrody I.W. Vasilyev wyjaśnił rozpuszczaniem w kwaśnym środowisku warstw powierzchniowych.

B.I. Kostecki ze współautorami uważają, że stabilizacja wartości potencjału elektrody w pewnych warunkach tarcia oznacza równowagę dynamiczną procesów zużycia i odtwarzania struktur wtórnych. Wartość stała potencjału elektrody podczas tarcia określona jest przez parametry obciążenia. Wraz ze wzrostem prędkości poślizgu potencjał elektrody próbek tarcia maleje do pewnej wartości, a następnie zwiększa się aż do momentu jego gwałtownego wzrostu. Zmniejszenie potencjału na pierwszym odcinku krzywej potencjał-prędkość uwarunkowano tworzeniem reliefu powierzchni tarcia i zmniejszeniem nieobciążonego pola powierzchni, pokrytego warstwami statycznymi tlenków. Wzrost potencjału na drugim odcinku krzywej wyjaśnia się wzrostem temperatury w obszarze tarcia, która powoduje zmianę szybkości utleniania statycznego.

Zwiększenie prędkości poślizgu do wartości krytycznej prowadzi do przesunięcia krzywych polaryzacyjnych elektrod badawczych. Wzrost prędkości krytycznej już nie powoduje zmiany kinetyki procesów elektrodowych. Wpływ nacisków w kontakcie ciernym przejawia się tym, że wraz z jego wzrostem potencjał elektrod próbek maleje monotonicznie i przy krytycznych obciążeniach następuje jego gwałtowny wzrost.

Badania wielu naukowców wykazały, że podczas tarcia metali powstają prądy elektryczne, czasami osiągające znaczne wartości. Istnieją, zatem różne termoelektronowe, termomagnetyczne, galwanomagnetyczne efekty emisyjne, które wprowadzają znaczne zmiany w kinetyce procesów elektrochemicznych, powodując ten lub inny rodzaj polaryzacji układu.

Różne metale współpracujące w elektrolitach formują pary galwaniczne, potencjały elektrodowe które są określone właściwościami elektrochemicznymi metali, środowisk i warunków obciążenia.

Pod wpływem efektów triboelektrycznych znacznie zmienia się kinetyka procesów elektrodowych. Polaryzują się węzły tarcia. Badanie wpływu polaryzacji na właściwości mechaniczne elektrodowych materiałów związane jest z efektem elektrokapilarowego zmniejszenia twardości metali sformułowanym przez P.A. Rebindera i E.K. Venstrema.

Stwierdzono, że twardość, stopień odkształcenia plastycznego i właściwości frykcyjne metali w elektrolitach zależą od wielkości ich potencjałów

elektrodowych. Parametry te mają duże znaczenie przy potencjale zerowym ładunku ($\varphi_{z,1}$).

B.I. Kostecki pokazał: szczegóły zmian w strukturze warstwy powierzchniowej metali podczas tarcia ze smarowaniem w obecności środków powierzchniowo-aktywnych (surfaktantów), rolę struktury i orientacji monokryształów w procesie formowania tarcia zewnętrznego, niszczenia metali w zależności od rodzaju ich sieci krystalicznej oraz rolę modeli dyslokacyjnych w procesach adhezji i utleniania metali podczas tarcia.

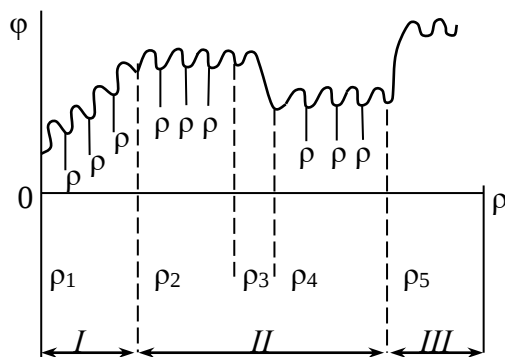
Teoria mechaniki fizyko-elektrochemicznej kontaktu ciernego jest praktycznie niesformułowana. Potrzebnym jest sformułowanie tej teorii dla wyjaśnienia mechanizmu KMZ metali i rozwoju metod zwiększających ich odporność na ścieranie.

Tarcie metali w środowiskach aktywnych (płynnych elektrolitach) posiada szczególne właściwości. Na proces odkształcenia współpracujących powierzchni znacznie wpływa czynnik elektrochemiczny. Dlatego powszechnie stosowane metody badawcze metali na zużycie w smarach (w środowiskach nieprzewodzących prąd) nie zawsze nadają się do badania trwałości metali w elektrolitach. Jednym z najbardziej aktualnych problemów współczesnej teorii tarcia i zużycia jest badanie kinetyki powstawania i zużycia struktur wtórnych.

Skład, struktura i właściwości struktur wtórnych badane są według zjawisk reszkowych (dane z mikroskopii elektronowej, elektronografii i spektroskopii Auger'a) lub kinetyki ich powstawania i niszczenia (metody potencjału elektrody, efektu wentylowego etc.).

W odniesieniu do zjawisk reszkowych struktury wtórne można badać w stanie statycznym po obciążeniu tarcie. Nie można jednak uzyskać prawdziwego obrazu procesów ich powstawania i zużycia. Metody kinetyczne w pełni pokazują mechanizm transformacji warstw powierzchniowych przez tarcie zewnętrzne. Perspektywiczną jest metoda pomiaru potencjału elektrody podczas tarcia w środowiskach przewodzących prąd elektryczny.

Przedstawione wyniki pary tarcia stal 9CrVMn4-10-4-stal C45 w środowisku gliceryny CHDA + 10% wody destylowanej pokazują ogólny obraz zmian potencjału elektrod w zależności od nacisku normalnego przy stałej prędkości poślizgu (rys. 4.13). W tym przypadku zbadano trzy obszary: I – dotarcie, II – normalny proces mechanochemiczny; III – przejście do uszkodzenia (stan patologicznego zużycia). Autor zauważa, że w chwili uruchomienia urządzenia zostaną zniszczone warstwy tlenkowe na próbce, a warstwa powierzchniowa metalu jest zdeformowana (występuje aktywacja strukturalna). W stanie aktywnym warstwa bezpośrednio oddziałuje z środowiskiem i przechodzi do stanu równowagi stając się pasywną. Jednocześnie na powierzchni pojawia się nowa struktura, co potwierdza przesunięcie potencjału na stronę ujemną. Podczas kolejnego obciążenia procesy są powtarzane do określonej wartości (obszar I).



Rys. 4.13. Ogólny wygląd zmiany potencjałów elektrod w zależności od nacisku normalnego

W obszarze II, niezależnie od stopnia obciążenia ustala się równowaga dynamiczna procesów zużycia i tworzenia struktur wtórnych. Potencjał stabilizuje się. W zakresie obciążeń ρ_3 – ρ_4 potencjał przesuwa się w kierunku bardziej ujemnych wartości do punktu, w którym ponownie zostanie osiągnięta równowaga dynamiczna.

Za pomocą analizy elektronowograficznej ustalono, że potencjałom w obszarze ρ_2 – ρ_3 odpowiadają warstwy tlenków, roztwory stałe tlenu i innych składników aktywnych środowiska w metalu (struktury wtórne I rodzaju). Potencjałom w obszarze ρ_3 – ρ_4 odpowiadają roztwory stałe i związki chemiczne, a przy mniej ujemnych wartościach (wynik łącznego działania aktywacji strukturalnej i termicznej) są dominujące wiązania chemiczne (struktury wtórne II rodzaju), z kolei potencjałom na obszarze ρ_4 – ρ_5 – tylko związki chemiczne (struktury wtórne II rodzaju). Na koniec, w przypadku stosowania obciążenia krytycznego ρ_5 potencjał jest znacznie przesunięty w kierunku bardziej ujemnych wartości, a w parze trącej występuje uszkodzenie i nie stabilizuje się potencjał.

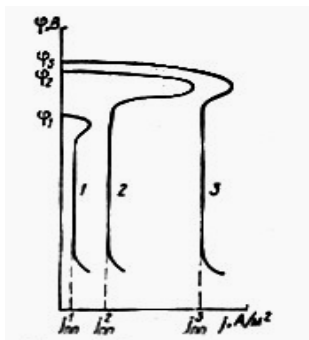
Procesy te są dobrze poznane na podstawie danych doświadczalnych. Autor stwierdza, że przejście struktur wtórnych I rodzaju do II rodzaju w dużym stopniu zależy od materiału par ciernych.

Wygląd ogólny diagramu polaryzacyjnego (zmiany potencjałów elektrod) bez tarcia, przy tarcu ruchowym i przy działaniu abrazyjnym pokazano na rys. 4.14.

Stwierdzono, że im bardziej plastyczny i chemicznie aktywny metal, tym szybsze jest przekształcanie struktur wtórnych. Przykładowo na aluminium obszar struktur wtórnych I rodzaju jest najmniejszy.

W celu określenia wpływu różnych jonów oraz stężenia roztworu do przywrócenia pasywności metalu, reakcji katodowej lub anodowej i charakteru procesów sorpcyjnych na powierzchni elektrody G.V. Akimov i N.D. Tomaszow

mierzyli ich potencjał podczas oczyszczania (szlifowania) pod warstwą elektrolitu.



Rys. 4.14. Diagramy polaryzacyjne: 1 – bez tarcia; 2 – przy tarcu ruchowym; 3 – przy działaniu abrazyjnym

I.V. Wassiliev zastosował metodę oczyszczania w celu oceny stanu powierzchni tarcia. Jeżeli potencjał elektrody podczas tarcia φ_{tr} zbliża się do jego wartości podczas oczyszczania φ_{ocz} (metal uwalnia się od warstw), intensywność zużycia zwiększa się. W przypadku równości potencjałów φ_{tr} i φ_{ocz} możliwa jest adhezja. W metodyce opisanej w artykułach zaznaczono, że przy sterowaniu procesami tarcia i zużycia należy znać grubość warstwy, w której zlokalizowane są odkształcenia plastyczne metalu, grubość warstwy, która została poddana transformacjom fizyko-chemicznym w procesie tarcia, stopień aktywności fizyko-chemicznej powierzchni w różnych warunkach obciążeniowych, równowagę dynamiczną zużycia i odtwarzania się struktur wtórnych przy tarcu.

Należy zauważyć, że najbardziej kompletna metoda badania zużycia metali jest podana w wielu pracach. Zalecają jednak skomplikowane metody badawcze, a nie określone sposoby badania zjawisk elektrycznych i elektrochemicznych i wykorzystania ich do poprawy odporności na zużycie metali. Metodologia nie przewiduje określenia wpływu poszczególnych czynników i ich wzajemnego wpływu na KMZ. Jako radykalną metodę zwiększania odporności na zużycie metali, zwłaszcza dla obciążeń rzędu 0,3–0,5 MPa, proponuje się stosowanie ochrony przed zużyciem bieżnika.

Kryterium niepewności oceny trwałości metali w elektrolitach polega na tym, że autorzy nie biorą pod uwagę ich wpływu na kinetykę elektrochemiczną właściwości kontaktowych galwanicznych par, stosunku powierzchni obszarów oczyszczonych i nieoczyszczonych, względnej prędkości obrotowej próbek i ruchu środowiska, nacisków w strefie kontaktu, temperatury płynu roboczego, zjawisk elektrycznych, wynikające z tarcia metali, jak również czynnika skalowego.

Znane sposoby pomiaru elektrooporu kontaktu frykcyjnego w dynamice są mało przydatne w badaniach metali KMZ ze względu na duży prąd w urządzeniu pomiarowym lub bezwładność procesu pomiarowego.

Podczas tarcia w agresywnych środowiskach procesy korozji zachodzą znacznie szybciej. Szybkość KMZ zależy od dwóch czynników – zużycia mechanicznego oraz rozpuszczania anodowego, a w wielu przypadkach, udział straty metalu w wyniku procesu korozji przekracza udział zużycia mechanicznego.

Ponieważ powierzchnie tarcia oddziałują na obszarach rzeczywistego styku, występuje częściowe niszczenie warstw pasywacji, przyspieszając w ten sposób proces anodowego rozpuszczania metalu.

G.E. Lazarev próbował określić prędkość procesu anodowego podczas tarcia w miejscach rzeczywistego styku. Zauważył, że mechanizm KMZ może być reprezentowany przez dwa zasadnicze i powiązane ze sobą procesy: powstająca korozja powierzchni oraz niszczenie zmęczeniowe wynikające w rezultacie przeddeformowania powstałego w obszarach rzeczywistego kontaktu. Podczas badania na specjalnie opracowanym stanowisku gdzie próbka była umieszczana na podłożu w taki sposób, żeby ze środowiskiem kontaktowała się tylko droga tarcia, stwierdzono, że szybkość korozji podczas tarcia polietylenu równa się prędkości KMZ. Wszystkie straty (100%) metalu podczas tarcia polietylenu w elektrolicie związane są z korozją intensyfikującą się tarcie.

W przypadku wpływu abrazyjnego na metal uwarunkowanego tarcie ceramiki (Al_2O_3), obserwowany jest proces deformacji plastycznej powierzchni tarcia. Zwiększa się prędkość KMZ do 6–7,3 mm/rok, a szybkość korozji do 5–6,4 mm/rok, czyli 82–87% straty metalu jest spowodowana procesami korozji. Wyniki tych badań zostały przedstawione w tabeli. 4.5.

Tabela 4.5. Szybkość korozji (K) i zużycia korozyjno-mechanicznego (I) stali i stopów przy tarcu polietylenu i ceramiki

Materiał	K, mm/rok (bez tarcia)	I, mm/rok	K, mm/rok	K/I, %
X08CrNiMoTi21-6-2	0,001	1,8/6	1,8/5	100/83
X08CrNiTi18-10	0,001	1/7,3	1/6,4	100/87
X10CrNiMoTi17-13-3	0,001	0,84/6	0,8/5	100/83
X06CrNiMoCuTi1-28-1-1-1	0,0005	0,7/6,1	0,7/5	100/82
XCrNiMo5	0,0005	0,7/6,1	0,7/5	100/82

Tak, więc prędkość korozji przy tarcu wzrasta tysiące razy, nawet w słabym roztworze kwasowym duża strata metalu jest spowodowana korozją jak podczas tarcia ślizgowego na miękkim materiale, tak i podczas zużycia ściernego.

Podczas tarcia potencjał stacjonarny przesuwają się w stronę ujemną i znacznie zwiększają się krytyczny prąd pasywacji i prąd pasywacji.

Stwierdzono, że KMZ jest procesem elektrochemicznym, głównie z powodu korozji materiałów par tarcia. Zużycie korozyjno-mechaniczne metali to złożona kombinacja mechanicznych, fizycznych, elektrochemicznych i innych procesów

w połączeniu z deformacją i niszczeniem powierzchni tarcia. Mechanizm tego zjawiska jest niedostatecznie zbadany. Stosowanie metod elektrochemicznych pozwoliło uzyskać szereg cennych danych dotyczących zużycia metali w środowiskach elektrolitu. Metody są najbardziej obiecujące w badaniach KMZ powłok eutektycznych.

4.4. Zużycie erozyjne

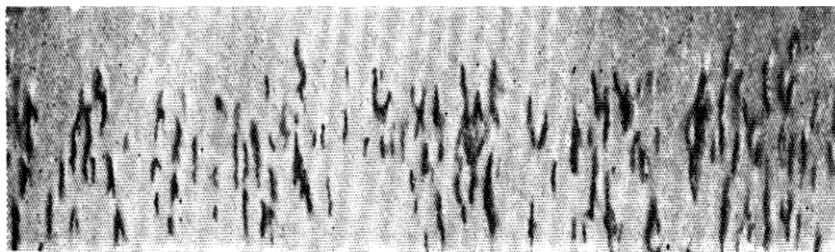
Erozja w szerokim pojęciu to proces zużycia powierzchniowego materiału pod wpływem środowiska zewnętrznego. W budowie maszyn „erozją” nazywane jest zniszczenie powierzchni materiałów ze względu na oddziaływania mechaniczne cieczy o wysokim przepływie gazu lub pary. Zużycie metali pod działaniem ładunków elektrycznych zalicza się również do erozji. L.A. Urvantsev dzieli erozję na gazową, kawitacyjną, abrazyjną i elektryczną. Każdy typ erozji ma kilka podtypów, które mogą być połączeniem niektórych gatunków, takich jak erozja gazowa może być gazoelektryczną, gazoabrazyjną itd.

Proces erozji to wpływ o dużej prędkości cieczy, gazu lub pary. W czystej postaci składa się z tarcia przepływającej cieczy i jej uderzeń o powierzchnię. W wyniku tarcia następuje rozluźnienie i wypłukiwanie poszczególnych obszarów materiału. Duża rola spowodowana jest działaniem przepływu dynamicznego lub strumienia. W zależności od właściwości materiału może być usunięcie (wyrwanie) poszczególnych obszarów lub grup ziaren o niekorzystnej orientacji w stosunku do przyłożonych sił. W materiałach plastycznych, które są zdolne do sklejania się, najpierw gromadzą się deformacje mikroplastyczne poszczególnych obszarów. W przypadku, gdy zdolność do umocnienia wyczerpuje się obszary te są niszczone i wypłukiwane. Ciecz, która wnika podczas uderzeń w utworzone mikropęknięcia, zachowuje się jak klin, rozsuwając ściany boczne.

Erozja w początkowym okresie na wygładzonej powierzchni rozwija się bardzo powoli, ale po pojawieniu się uszkodzonych obszarów wzrasta. Zjawisko to można wyjaśnić wzrostem kruchości uszkodzonej warstwy powierzchniowej na skutek gromadzenia mikropęknięć, rozklinowującym działaniem cieczy i zwiększeniem siły udarowej przez duże zawirowania na powierzchni.

W wyniku erozji na zniszczenie bardzo często narażone są krawędzie zaworów agregatów hydraulicznych. Strumienie paliwa, które wnikają podczas odcięcia z dużą prędkością w szczelinę między cylindrycznymi powierzchniami zaworu i tulei, niszczą metal w pobliżu krawędzi. Jest to przypadek erozji szczelinowej, której są poddawane zawory urządzeń odcinających i regulujących układów hydraulicznych i parowych. Erozja może nastąpić pod wpływem ciekłometalicznych nośników ciepła w urządzeniach energetycznych. Nośniki ciepła mogą mieć duży wpływ erozyjno-korozyjny na niektóre elementy stali wysokotemperaturowych.

Na zużycie erozyjne narażone są stale i pierścienie tłokowe z żeliwa w silnikach lotniczych (rys. 4.15).



Rys. 4.15. Powierzchnia pierścienia tłokowego silnika lotniczego narażonego na erozję

Pierścienie są poddawane oddziaływaniu kontaktowemu z powierzchnią chromowaną cylindra. Z powodu złego dotarcia pierścieni nie jest zapewnione odpowiednie przyleganie do ścianek cylindra. Zachodzi wówczas przeciekanie gazów i intensywne lokalne nagrzewanie powierzchni roboczej pierścienia. Oddzielone, najbardziej zmiękzone cząstki metalu są odrywane i wychwytywane przez przepływ gazów. Bardziej stabilne elementy konstrukcyjne również ulegają zużyciu. Na powierzchni tworzone są podłużne muszle o strukturze rozgałęzionej (rys. 4.15). Często zużycie erozyjne zaczyna się od mikrozadrapań, które występują podczas szczepienia (zatarcia) powierzchni tarcia. Uszkodzeniu erozyjnemu w tym przypadku towarzyszy powstawanie białej warstwy. Zużycie pierścieni można zmniejszyć poprzez ich docieranie do powierzchni cylindra. Zużycie erozyjne w wielu przypadkach byłoby mniej intensywne gdyby w strumieniu cieczy nie występowały cząstki obce. Jeśli przepływ cieczy zawiera cząsteczki ściernie, wówczas zużycie objawia się, jako erozyjno-abrazyjne.

Erozja i korozja często towarzyszą nawzajem. Zużycie korozyjno-erozyjne jest rodzajem zużycia korozyjno-mechanicznego. Rola obu zależy od stosunku działania czynników mechanicznych i chemicznych na materiał. Jako typowy przykład można przedstawić łopatki turbin. Ich zużycie w wyniku korozji i erozji zintensyfikowało się znacząco z przejściem od maszyn tłokowo parowych do turbin parowych z większą częstotliwością obrotową łopatek wirnika na statkach. Szczegółowa analiza problemu umożliwiła zrozumienie roli erozji w zależności od prędkości kątowej łopatki, co powoduje dynamiczny wpływ strumienia. Erozja usuwa z łopatek śrub wału okrętowego produkty korozji, które tworzą warstwę ochronną. Oczyszcza metal, co znacznie przyspiesza proces jego zużycia. Przy małych dynamicznych wpływach strumienia w łopatkach powstają pęknięcia zmęczeniowe. Silniejszy jej wpływ powoduje kruche zniszczenie w materiale niewystarczająco odpornym na erozję.

Korozja i erozja gazowa występują razem na przykład w zaworach wydechowych wysokoobciążonych elementów silników oraz na krawędziach wejściowych łopatek kompresora silników z turbiną gazową. Przy wymianie

łopatek wykonanych ze stopów aluminium na stalowe zużycie erozyjne krawędzi łopatek przestało już mieć praktyczne znaczenie.

Warstwa powierzchniowa elementów pomp, turbin hydraulicznych, rurociągów i ich instalacji, sit i podobnych elementów maszyn i urządzeń zużywa się w wyniku przepływu wody zawierającej materiał ścierny. Szybkość zużycia erozyjnego zależy od właściwości cząstek stałych, ich koncentracji, prędkości ruchu przepływu oraz stopnia agresywności wody. Wiele silników i węzłów sprzętu hydraturbinowego użytkowanych na rzekach ulega zniszczeniu głównie przez zużycie erozyjno-abrazyjne przy obecności niewielkiego niszczenia korozyjnego. W innych przypadkach znaczny jest efekt kawitacji i korozji.

Agresywność środowiska wnosi swoje własne cechy w procesie zużycia erozyjnego, więc nie wszystkie reguły zużycia ściernego odnoszą się do zużycia erozyjno-abrazyjnego. W tym przypadku materiały powinny mieć odporność na korozję i odporność na zniszczenie ściernie. Te właściwości powinny się zmieniać w zależności od wpływu każdego czynnika. Należy to uwzględnić przy zużyciu korozyjno-erozyjnym.

Gorącą erozję gazową tworzyw plastycznych i powłok termoizolacyjnych nazwano ablacją. Zjawisko to zachodzi przykładowo pod wpływem ogrzewania aerodynamicznego podczas wchodzenia pocisku balistycznego w szczelne warstwy atmosfery pod wpływem wysokonagrzanych gazów spalinowych podczas pracy silników rakietowych. Ablacji towarzyszą efekty termiczne i mechaniczne oraz zawiera ona szereg zjawisk: erozję od uderzeń stałych cząstek lub kropelek, ścięcie materiału pod działaniem sił aerodynamicznych, łuszczenie (pęknięcia i odpadania łusek w wyniku gwałtownej rozszerzalności cieplnej), zdmuchiwanie stopionego materiału strumieniem gazów, sublimację, wyparowanie, spalanie.

Stabilność tworzyw sztucznych na ablację zależy od ich przewodności cieplnej. W przeciwieństwie do metali, tworzywa sztuczne mają niską przewodność cieplną. Elementy odlewane pod wysokim ciśnieniem są bardziej odporne na ablację w porównaniu z detalami odlewanyymi pod niskim ciśnieniem.

4.5. Zużycie kawitacyjne

4.5.1. Kawitacja hydrodynamiczna

Kawitacja dosłownie oznacza pustkę, kawernę. Jednakże kawitacja rozumiana jest jako zjawisko tworzenia się na powierzchni poruszającego się ciała pustek w postaci pęcherzyków, przestrzeni pustych wypełnionych parami, powietrzem lub gazami rozpuszczonymi w cieczy lub z niej wydzielonymi [5–9].

Zjawisko to jest spowodowane następującymi czynnikami. W strumieniu, który porusza się z dużą prędkością, przy zwężeniu i obecności przeszkód

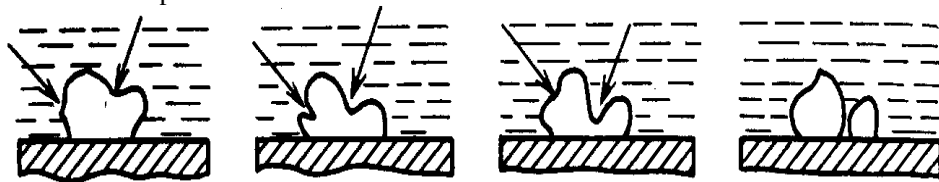
podczas przemieszczania, ciśnienie może spaść do wartości odpowiadającej ciśnieniu tworzenia pary w danej temperaturze. Jednocześnie, w zależności od oporu cieczy siłami rozciągającym może wystąpić rozerwanie lub naruszenie ciągłego przepływu. Powstała wnęka jest wypełniona parą i gazami emitowanymi z cieczy. Powietrze wciągnięte do strumienia ułatwia pojawienie się kawitacji. Powstałe wnęki paropodobne rozmiarami (o rozmiarach dziesiątych części milimetra) poruszające się wraz z przepływem, wchodzą w strefy wysokiego ciśnienia. Para jest kondensowana, gazy rozpuszczają się i w komorze, która została utworzona z dużą prędkością są skierowane cząstki cieczy. Występuje wówczas przywrócenie ciągłości przepływu wraz z uderzeniem. Filmowanie wykazało, że pęcherzyk kawitacyjny może urosnąć z 0,002 do 6 mm w średnicy i całkowicie zniszczyć się w czasie 0,001 s. Według V. Ya Karelina dla pewnych rodzajów kawitacji na powierzchni 1 cm^2 w czasie 1 s może utworzyć i ulec zniszczeniu ponad 30 milionów pęcherzyków kawitacyjnych.

Kawitacja obserwowana jest w rurociągach, w hydromonitorach, w przepływach opływających łopatki odśrodkowych i śmigłowych pomp i łopat turbin hydraulicznych, w łopatach okrętowych. Zjawisko kawitacji powoduje drgania, uderzenia i wstrząsy, prowadzące do osłabienia poszczególnych rodzajów połączeń, obrywania śrub, zginięcia śrub, korozji tarcowej styków, złamań zmęczeniowych.

Kawitacja zmniejsza sprawność maszyn oraz gwintów okrętowych i powoduje bezpośrednie zniszczenie powierzchni elementów w obszarze jej działania. Sprzyja ona koksovaniu rozpylaczy silników spalinowych.

Kształt trudnoopływowy i chropowatości powierzchni, włącznie z chropowatościami powstałymi w wyniku zużycia kawitacyjnego są przyczyną powstawania wirów i szczelin pomiędzy ścianami przepływu płynu i kanałów roboczych, co sprzyja powstaniu lub wzmocnieniu kawitacji.

Warunki wstępne dla występowania i przepływu zużycia kawitacyjnego są następujące: gdy wnęka zamyka się w pobliżu powierzchni elementów ostatnia jest narażona na działanie mikroskopijnych uderzeń hydraulicznych (rys. 4.16). Z kilku milionów kawitacyjnych wnęk około jedna na 30 000 jest zaangażowana w niszczeniu powierzchni.



Rys. 4.16. Schemat uderzeń hydraulicznych podczas redukcji pęcherzy kawitacyjnych

Pod wpływem uderzeń powierzchnia metalu zaczyna odkształcać się plastycznie na małej głębokości; pojawiają się linie przesunięcia i występuje

rodzaj trawienia wraz z ujawnieniem granic poszczególnych ziaren. Uderzenia powtarzające się cyklicznie prowadzą do ich uniemocnienia. Przede wszystkim ulega zużyciu mniej wytrzymała składowa strukturalna (w stalach – ferryt, w żeliwach – wtrącenia grafitowe). Po zużyciu najmniej wytrzymałych elementów strukturalnych istnieje tendencja do wykruszania się bardziej wytrzymałych elementów strukturalnych. Zużycie występuje w granicach ziaren lub wzdłuż ich granic w zależności od stosunku wytrzymałości ziarna i wielkości związku pomiędzy ziarnami.

Zjawiska korozyjne odgrywają ważną rolę w procesie zużycia kawitacyjnego. Na przykład w wodzie morskiej intensywność zużycia jest znacznie wyższa niż w wody słodkiej w takich samych warunkach. Jednakże to wpływom mechanicznym przypisuje się rolę kluczową. Dowodem czego może być niska odporność kawitacyjna powłok pokrytych lakierem, cynkowych i aluminiumowych, które mają niską wytrzymałość mechaniczną, ebonitu i pleksiglasu, które są odpornymi na korozję materiałami niemetalowymi. Prędkość zużycia kawitacyjnego może być sto i więcej razy większa niż prędkość zużycia korozyjnego warstwy powierzchniowej.

Kawitacji można zapobiec projektując system hydromechaniczny tak, aby we wszystkich punktach przepływu ciśnienie nie spadało poniżej ciśnienia parowania. Jednakże zawsze należy brać pod uwagę możliwość pojawienia się kawitacji.

Intensywność zużycia kawitacyjnego zależy od temperatury, właściwości cieczy i rodzaju materiału elementów. Wpływ lepkości jest nieistotny. Wraz ze wzrostem natężenia powierzchniowego wzrasta intensywność zużycia. Wprowadzanie substancji w wodę, które tworzą lub przyczyniają się do tworzenia emulsji (oleje i emulgatory) zmniejsza napięcie powierzchniowe oraz zmniejsza wielkość zużycia kawitacyjnego. W wodzie o temperaturze 50°C zachodzi najwyższa intensywność zużycia. Po obu stronach tej temperatury występuje dość gwałtowny spadek intensywności zużycia.

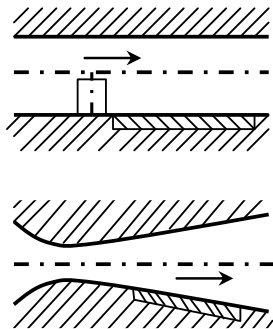
Wytrzymałość na kawitację materiału określona jest jego składem chemicznym i strukturą. Zwiększona zawartość węgla w stali węglowej zwiększa jego wytrzymałość. Jednakże, zaczynając od 0,8% C, wytrzymałość kawitacyjna zaczyna spadać. Perlit płytkowy jest bardziej wytrzymały niż granulowany. Dodanie niklu i chromu do stali zwiększa jej odporność w wyniku zwiększenia ilości austenitu, twardego ferrytu, zwiększenia stopnia dyspersji. Najbardziej wytrzymałym materiałem jest żeliwo niskostopowe (1% Ni, 0,3% Mo) z grafitem kulkowym.

Hartowanie przy nagrzewaniu prądami wysokiej częstotliwości, cementacja, utwardzanie powierzchni, w tym natapianie twardymi materiałami, zwiększają znacznie wytrzymałość kawitacyjną stali. To samo dotyczy powłok chromowych przy wystarczającej ich grubości (około 40 mikronów) i ciągłości (mleczny chrom). Przy małej grubości (poniżej 20 mikronów) destrukcja następuje pod warstwą chromu z zasadniczą rolą odgrywaną przez wytrzymałość podłoża. Ze

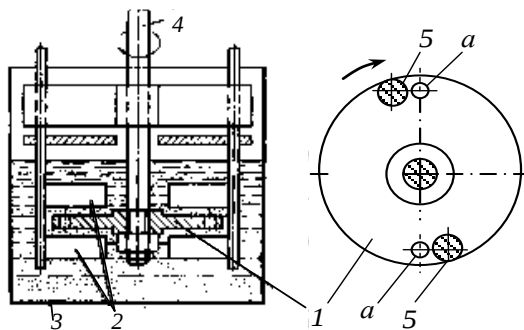
względnie na swoją lepkość miedź jest odporna na zużycie kawitacyjne. Stosunkowo wysoką odporność na kawitację ma powłoka gumowa.

Zużycie kawitacyjne jest badane przy użyciu specjalnych urządzeń, które są instalowane w komorach roboczych rur kawitacyjnych (rys. 4.17). Strefę kawitacyjną, która powstaje za przeszkodą lub po zwężeniu rury, obserwuje się w postaci białej chmury. Przy tym zjawisku rejestrowany jest hałas o różnych tonach.

Istnieją instalacje, w których kawitacja jest tworzona przez dysk, który obraca się w wodzie lub innej cieczy (rys. 4.18). Dysk 1 jest zamontowany na wale 4 i umieszczony w zbiorniku 3 z cieczą. Aby zmniejszyć strefę kawitacji zainstalowano ograniczniki 2. Na dysku są ustalone dwie badane próbki 5 o średnicy 20 mm, przed którymi w trakcie obrotu są dwa otwory tworzące kawitację przy wysokiej częstotliwości obrotu tarczy (2050 do 2500 min^{-1}) o średnicy 244 mm. Aby uniknąć dużego wirowania wody z góry i dołu dysku należy ustawić łopatki zabezpieczające.



Rys. 4.17. Schematy komór roboczych rur kawitacyjnych



Rys. 4.18. Stanowisko kawitacyjne z dyskiem obracającym się

Do modelowania zużycia kawitacyjnego stosuje się metodę strumieniowo-uderzeniową, która polega na tym, że próbki badane uderzają o strumień cieczy.

Charakter zużycia powierzchni metodą strumieniowo-uderzeniową odpowiada zużyciu powierzchni wskutek kawitacji.

4.5.2. Kawitacja wibracyjna

Podczas wibracji ciała stałego w stosunku do cieczy lub ciała stałego może spaść ciśnienie w płynie na granicy pomiędzy cieczą a ciałem stałym i spowodować powstanie wnek kawitacyjnych (pęcherzyków). Warunki kawitacji zależą od ciśnienia zewnętrznego na układ i nasycenia cieczy powietrzem.

Kawitację wibracyjną mogą powodować drgania fali dźwiękowej, zwłaszcza ultradźwiękowe. Fale dźwiękowe przyspieszają reakcje utleniania i redukcji.

Powodują wewnętrzne przegrupowania substancji. Zwiększają dyspersję i przyspieszają proces odtłuszczania powierzchni, a także powodują koagulację małych cząstek. Podczas wibracji nie jest wykluczona kawitacja zachodząca w cienkiej warstwie środka smarnego pomiędzy powierzchniami, co może prowadzić do wykruszania się materiału łożysk ślizgowych, zębów kół zębatych i powierzchni innych elementów.

Kawitacja wibracyjna zachodzi także w silnikach spalinowych, zwłaszcza na zewnętrznych powierzchniach tulei w wyniku ich oscylacji spowodowanych ruchem tłoka. Zużycie kawitacyjne zewnętrznej ściany tulei może być o 3–4 razy większe niż zużycie wewnętrznej powierzchni podczas oddziaływania z pierścieniami tłokowymi.

4.6. Zużycie kawitacyjno-erozyjne

Zwiększenie prędkości roboczej i mocy maszyn powoduje konieczność badania wytrzymałości metali i stopów w warunkach kawitacji i erozji. Wiele badań poświęconych jest analizie zużycia kawitacyjno-erozyjnego. Szkodliwe czynniki w tym przypadku takie jak: erozja powierzchni elementów znajdujących się w kontakcie ze strumieniem cieczy i zjawisko kawitacji występujące w wyniku nieciągłości przepływu cieczy przy pewnych warunkach hydrodynamicznych (tworzenie się wnęk, jam, pęcherzyków) [5].

Prędkość zużycia kawitacyjnego zależy od szybkości przepływu i składu środowiska, temperatury i odporności korozję metali, ich podatności na pasywację, stanu powierzchni i właściwości wytrzymałościowych metalu. Największa intensywność zużycia metali w środowisku wodnym na skutek kawitacji zachodzi w temperaturze 313–323 K. W temperaturze pokojowej i temperaturach obniżonych utrata masy metalu jest 3–4 razy mniejsza, a w temperaturze wrzenia jest bliska zeru.

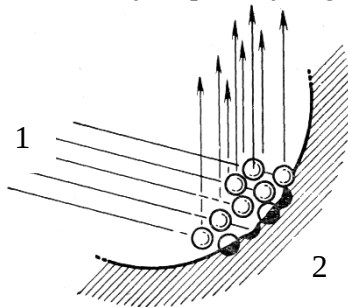
Żeliwa i stale węglowe w wodzie morskiej i słodkiej są bardziej narażone na zużycie kawitacyjne niż stopy, które mają wysoką odporność na korozję (między innymi chromowe, stale chromowo-niklowe, niektóre brązy).

Wzrost naprężeń mechanicznych prowadzi do zwiększenia udziału czynnika mechanicznego i zmniejszenia korozyjnego. Jednakże istnieją przypadki, kiedy w warunkach brzegowych erozja kawitacyjna będzie miała charakter czysto mechaniczny, co nie zależy od składu środowiska, odporności na korozję metalu, itd.

W tym przypadku szybkość zużycia kawitacyjnego spowodowana jest głównie charakterystykami wytrzymałościowymi metalu, jego strukturą, stanem powierzchni i kształtem geometrycznym.

Wytrzymałość metali w tych warunkach zużycia spowodowana jest specyfiką rozchodzenia się w warstwach powierzchniowych uderzeniowych fal sprężystych i plastycznych.

Podstawowym warunkiem wysokiej odporności zużyciu kawitacyjno-erozyjnemu jest odporność danej struktury metalu na działanie mikro-uderzeń przy przemieszczeniach plastycznych, odpowiedzialnych za powstawanie i rozwój obszarów zużycia erozyjnego. Jest to spowodowane tym, że pęcherzyki, które uderzają o twardą powierzchnię są zwinięte, co powoduje powstanie fal uderzeniowych na powierzchni ciała stałego. W tej sytuacji cząsteczki materiału powierzchni odrywają się, a w ich miejscu powstają wgłębienia (rys. 4.19).

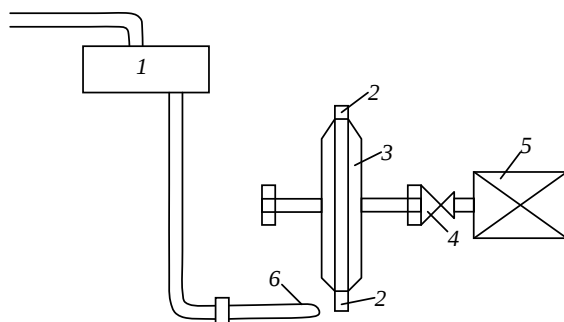


Rys. 4.19. Mechanizm zużycia kawitacyjno-erozyjnego: 1 – strumień cieczy, 2 – powierzchnia ciała stałego

Przykładowo wirniki pomp i gwinty okrętowe, których powierzchnia charakteryzuje się dużą precyznością obróbki lub łopatki turbin z napawanym stopem o wysokiej twardości, poddane są zniszczeniom kawitacyjnym w mniejszym stopniu.

Ze względu na cechy kawitacji, w szczególności krótki czas wpływu siłowego, wysoką lokalność obciążenia, duże naciski jednostkowe w mikroobjętościach, taki wpływ odnosi się do obciążeń mikro-uderzeniowych. Temu rodzajowi zużycia podlegają między innymi elementy pomp, sprężarek i turbin wodnych, rurociągi, gwinty okrętowe. Uszkodzenie powierzchni tych elementów jest podobne do „wrzodów”.

Do badania zużycia kawitacyjno-erozyjnego metali i stopów wykorzystuje się trzy typy eksperymentów: strumieniowo-uderzeniowe, wibracyjne i eksperyment z rurą Venturiego. Eksperymenty strumieniowo-uderzeniowe oparte są na zderzeniu strumienia cieczy wypływającego z dyszy pod pewnym ciśnieniem z badanymi próbkami. Próbkę są umieszczone na obrotowym dysku poruszającym się ze stałą prędkością (rys. 4.20). W określonej strefie przepływu, ze względu na zmiany prędkości cieczy i ciśnienia powstaje pas kawitacyjny. Odległość między dyszą a płaszczyzną obrotu próbki dobiera się tak, że próbka znajduje się w strefie przepływu kawitacyjnego. Zwykle takie urządzenia są wykorzystywane w badaniach materiałów przeznaczonych do produkcji łopatek turbin wodnych.

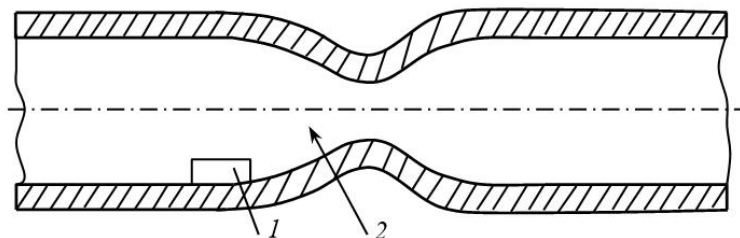


Rys. 4.20. Schemat urządzenia strumieniowo-uderzeniowego do badania odporności na kawitację i erozję metali: 1 – pojemnik zbiorczy; 2 – próbki; 3 – dysk; 4 – sprzęgło; 5 – silnik elektryczny; 6 – dysza

Jedną ze skutecznych metod badania KEZ jest utworzenie w cieczy kawitacji w pobliżu powierzchni badanej próbki za pomocą efektu magnetostrykcyjnego w przetworniku magnetycznym przy zmiennym polu magnetycznym o częstotliwości dźwiękowej lub ultradźwiękowej. Ten typ eksperymentów zalicza się do wibracyjnych.

Jednakże w przypadkach doświadczeń strumieniowo-uderzeniowych i wibracyjnych czynnik mechaniczny dominuje nad korozyjnym, co często nie odpowiada rzeczywistym warunkom eksploatacji. Dlatego wyniki tych eksperymentów nie zawsze potwierdzają się w praktyce. Są one tylko przybliżone głównie pod względem właściwości mechanicznych, a nie korozyjnych badanego materiału.

Aby przybliżyć badania wibracyjne do rzeczywistych warunków, wibracje magnetostrykcyjne są nałożone na próbkę zanurzoną w roztwór. Bardzo przybliżone do rzeczywistych warunków eksploatacji są badania z wykorzystaniem rury Venturiego (rys. 4.21). Próbki badane umieszcza się w strefie kawitacyjnej utworzonej przez szybki przepływ cieczy po przejściu przez punkt najbardziej wąskiego zwężenia rurki.



Rys. 4.21. Rura Venturi do badania odporności kawitacyjno-erozyjnej metali:
1 – próbka; 2 – przeszkoda powodująca kawitację

Metale chronione są przed erozją kawitacyjną także metodami konstrukcyjnymi (zmiana kształtu, redukcja wibracji elementów, które kontaktują się z cieczą, dobór materiałów o wysokiej twardości) oraz technologicznymi (obróbka ścierna powierzchni, napawanie na powierzchnię bardziej twardego metalu, naniesienie powłok gumowych, polimerowych, metalowych eutektycznych i innych rodzajów powłok) i eksploatacyjnymi (dodatek inhibitorów i środków powierzchniowo czynnych).

4.7. Zużycie adhezyjne

Podczas tarcia ślizgowego współpracujących elementów maszyn w określonych warunkach ich pracy na powierzchni i w powierzchniowych objętościach metali występuje odkształcenie plastyczne, co powoduje adhezję metali. Jest to proces trwałego połączenia obszarów powierzchni kontaktujących się i zniszczenia tych połączeń (węzłów adhezji) [7].

Podczas adhezji występują wyrywania cząstek metalu na niektórych obszarach powierzchni i przyklejanie się tych cząstek na inne obszary, które przyczyniają się do zużycia powierzchni elementów, a w niektórych przypadkach występuje nawet ich zakleszczenie i zniszczenie.

Aby móc kontrolować proces adhezji koniecznym jest poznanie i zrozumienie charakteru procesu oraz określenie ilościowe i jakościowe jego występowania i rozwoju, granic istnienia i ich zależność od pewnych czynników lub zestawu czynników. Jest to konieczne, aby wskazać główne cechy procesu adhezji metali w elementach maszyn pracujących w różnych warunkach tarcia oraz opracować racjonalny sposób sterowania tymi procesami.

Podczas tarcia i zużycia metali na powierzchni oraz w objętościach powierzchniowych zachodzą różne procesy fizyczne, chemiczne i mechaniczne, które determinują charakter i intensywność zużycia. Powstanie i rozwój tych procesów zależy od trzech głównych grup czynników:

1. Wpływów zewnętrznych mechanicznych (prędkości przemieszczenia względnego, jednostkowego obciążenia, rodzaju obciążenia, temperatury).
2. Środowiska, w którym występuje tarcie połączonych powierzchni (ciekłego, gazowego, stałego).
3. Właściwości metali, z których wykonane są pary tarcia oraz sposobów ich obróbki.

Przez zmianę tych czynników wymienionych trzech grup można zwalniać lub przyspieszać procesy, które występują na powierzchniach roboczych i w warstwach powierzchniowych metalu, a tym samym zmieniać charakter i intensywność zużycia.

Podstawą adhezji jest tworzenie się wiązań metalicznych pomiędzy dwoma powierzchniami metalu, które znajdują się w kontakcie.

Według teorii elektronowej wiązania metaliczne zachodzą w rezultacie całkowitego uwspólnienia zewnętrznych stosunkowo słabo związanych z jądrem

atomu elektronów przy wystarczającym zbliżeniu atomów metali. Jony dodatnie, które są utworzone przez oddzielenie od atomów zewnętrznych elektronów, utrzymywane są w pewnej odległości przez siły przyciągania Coulomba uwspólnionych ujemnie naładowanych elektronów.

Elektrony uwspólnione przyciągają układ jonów zrównoważając ich wzajemne odpychanie. Jony te są utrzymywane w pewnych odległościach od siebie. Zazwyczaj tym jest uwarunkowana struktura krystaliczna metalu.

Adhezja czystych metali zależy głównie od ich zdolności do tworzenia połączeń metalicznych, od własności metali, struktury ich atomów, a przede wszystkim budowy ich zewnętrznych powłok elektronowych. Istotna jest nie tylko liczba elektronów na powłokach zewnętrznych, ale ich rozkład według poziomów energetycznych, co powoduje oddziaływanie zewnętrznych elektronów.

Ze względu na fakt, że budowa atomów (budowa zewnętrznych powłok elektronowych, poziomy energetyczne tych atomów, itd.) różnych metali jest różna, tak więc zdolność metali do wzajemnej adhezji jest także różna.

Proces adhezji może odbywać się w dwóch różnych warunkach pracy. W pierwszym przypadku, proces adhezji występuje i rozwija się przy niskich prędkościach poślizgu połączonych powierzchni tarcia i większych jednostkowych naciskach, które przekraczają granicę plastyczności metalu w miejscach rzeczywistego styku i w warunkach nieznacznego wzrostu temperatur. Prowadzi to do dużego odkształcenia plastycznego, zniszczenia i oddzielania cząstek metalu z powierzchni tarcia. Taki proces nazywany jest procesem adhezji pierwszego rodzaju.

W drugim przypadku proces adhezji zachodzi i rozwija się przy wysokich prędkościach poślizgu połączonych powierzchni tarcia oraz wysokich wartości nacisków jednostkowych, które powodują intensywny wzrost i wysoki gradient temperatury w warstwach powierzchniowych metali, powodując zmniejszenie wytrzymałości i zniszczenie, a także rozmazywanie i nagromadzenie cząstek metalowych na powierzchni tarcia. Taki proces nazywany jest adhezją drugiego rodzaju.

Proces adhezji pierwszego rodzaju jest wynikiem zwykłego odkształcenia plastycznego warstw powierzchniowych metalu pod wpływem sił mechanicznych generowanych przez tarcie. Odkształcenie plastyczne w tym przypadku wpływa na powstawanie juwenilnych powierzchni tarcia metali i ich zbliżenie. Tworzą się wiązania metaliczne. To powoduje określony charakter i intensywność zużycia powierzchni tarcia. Proces ten nie jest związany z wpływem i wzrostem temperatury oraz zjawisk dyfuzyjnych.

W normalnych warunkach zbliżenie dwóch atomów ciał metalicznych na taką odległość, przy której powstają wiązania metaliczne oraz występuje ich mocna przyczepność (adhezja) jest bardzo trudne. Uwarunkowane jest to warstwami zaadsorbowanymi różnych gazów, tlenków, chropowatością, ze

względu na fakt, że faktyczna powierzchnia styku połączonych powierzchni jest bardzo mała i niewystarczająca do tworzenia wiązań metalicznych.

Jednakże, w pewnych warunkach tarcia ruchowego dwóch współpracujących ze sobą powierzchni występuje adhezja metali na dużej powierzchni styku. W ten sposób warunki powstawania adhezji metali są tworzone w sposób naturalny w procesie tarcia i zużycia współpracujących powierzchni. Dzieje się tak wtedy gdy siły, które działają w zakresie kontaktu rzeczywistego powodują naprężenia przekraczające granicę plastyczności metalu. W cienkich warstwach powierzchniowych występują odkształcenia plastyczne, wtedy zaadsorbowane warstwy gazowe i zanieczyszczenia niszczą się, odsłaniając czyste atomowo (juwenilne) obszary metali. Jednocześnie występuje wygładzanie chropowatości na powierzchni tarcia, a tym samym znacznie zwiększa się powierzchnia ich rzeczywistego styku. Przy zbliżeniu juwenilnych powierzchni występuje przyciąganie międzyatomowe metali, przy czym na dużym polu powierzchni kontaktu rzeczywistego powstają wiązania metaliczne, podobne do wiązań międzyatomowym w metalu litym. Następuje wówczas adhezja metali.

Węzły adhezji to wiązania metaliczne, które zostały utworzone, a następnie niszczą się, ponieważ połączone ze sobą powierzchnie przemieszczają się względem siebie. Dzięki deformacji plastycznej w węzłach adhezji metal jest umocniony. W ten sposób na powierzchni elementów występuje wrywanie cząstek metalu. Niektóre z nich przylepiają się do powierzchni kontaktującej, inne są produktami zużycia. W miejscach wrywania występuje zwiększenie naprężeń, formują się pęknięcia, zmniejsza się wytrzymałość zmęczeniowa elementów.

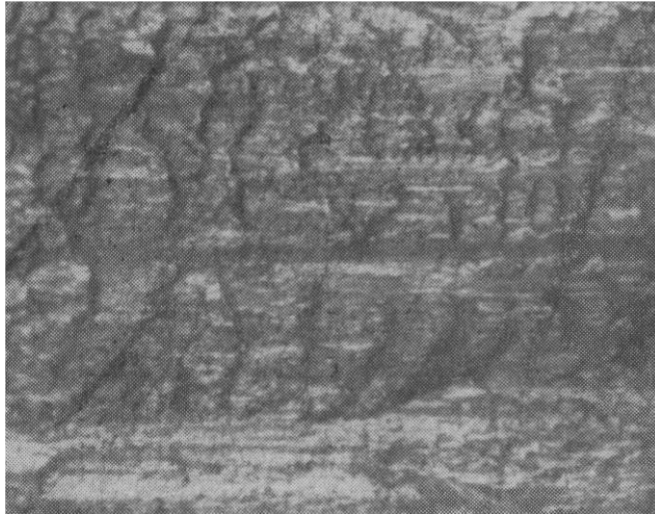
Cząstki metalu, które przylepiają się do powierzchni roboczych pod działaniem sił normalnych i stycznych również ulegają zniszczeniu. Jednakże, w pewnych warunkach tarcia one nie tylko się nie niszczą przez długi czas, ale przejmują większe jednostkowe obciążenia, deformują się i ulegają wzmocnieniu. Wzmocnione i przyklejone cząstki metalu przy przemieszczeniu względem elementów ścinają swoimi wystęgami z powierzchni kontaktującej wióry, lub przekazują zwiększone naciski na powierzchnię w miejscach kontaktu deformując ją.

Jednocześnie na nowopowstałych obszarach powstają węzły adhezji i ich zniszczenie. Ten proces w pewnych warunkach tarcia może być ciągły. Następuje wówczas duże odkształcenie, zniszczenie i zużycie metalu na powierzchniach tarcia.

Powierzchnia tarcia elementów maszyn w wyniku zużycia w warunkach adhezji pierwszego rodzaju charakteryzuje się nieuporządkowanymi skupieniami zagłębień, wystęgów i podłużnych bruzd o różnych rozmiarach i kształtach, a także śladami płynności plastycznej metalu w kierunku przemieszczenia się par tarcia.

Powstawanie węzłów adhezji i następujące ich zniszczenie w wyniku względnego ruchu współpracujących elementów prowadzi do zużycia

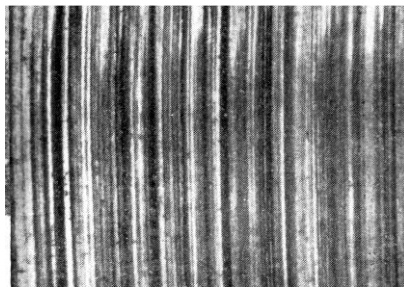
powierzchni tarcia w postaci naderwań, wyrwań, naklejeń, kruszenia i rozmazywania metalu w kierunku ruchu podczas tarcia, a także ich intensywnego zużycia (rys. 4.24).



Rys. 4.22. Zużycie powierzchni tarcia w postaci naderwań, wyrwań, odkształceń oraz rozmazywania metalu

Proces adhezji drugiego rodzaju występuje w takich krytycznych temperaturach, przy których nie następuje umocnienie powierzchni metalu.

W warunkach adhezji drugiego rodzaju wysokie nagrzewanie powierzchni metalu powoduje ich odpuszczanie, wtórne hartowanie, zmiany strukturalne i przemiany fazowe oraz gwałtowne zmiany właściwości mechanicznych (rys. 4.23).



Rys. 4.23. Wygląd zewnętrzny powierzchni tarcia, która pracowała w warunkach adhezji drugiego rodzaju

Charakterystycznymi cechami stanu powierzchni tarcia elementów maszyn pracujących w warunkach początkowego etapu rozwoju adhezji drugiego

rodzaju są naderwania naprzemienne metalu, które rozmieszczone są prostopadłe do kierunku ruchu par tarcia, naderwania i przylepiające się cząstki metalu z ostrymi granicami przejścia na krawędziach oraz ślady płynięcia plastycznego metalu.

W warunkach laboratoryjnych na specjalnych maszynach ciernych można odtworzyć wszystkie procesy, które pojawiają się podczas tarcia i zużycia elementów maszyn. Można badać przyczyny ich powstawania oraz mechanizm tych procesów na wszystkich etapach. Można również ustalać granicę ich istnienia w zależności od zmiany wielu czynników indywidualnych lub grupy czynników (zewnętrznych wpływów mechanicznych, środowiska, materiału, obróbki powierzchniowej, itp.).

Podczas adhezji następuje intensywne niszczenie powierzchni metalu, któremu towarzyszy powstawanie wyrywań, zadrapań, nalepiania cząstek metalu i usuwania metalu z obu powierzchni tarcia, co wpływa na ich chropowatość (rys. 4.23). Powierzchnia metalu jest plastycznie zdeformowana i wzmacniana na znaczną głębokość. Ich temperatura nieco wzrasta i osiąga 80 do 90°C. Nie występują przemiany fazowe w warstwach powierzchniowych metali. Rosną naprężenia w warstwach powierzchniowych metali.



Rys. 4.24. Mikrostruktura powierzchni tarcia w przekroju próbki po badaniu w warunkach adhezji pierwszego rodzaju

Wraz z głównym procesem adhezji, który występuje na powierzchni tarcia i określa naturę oraz intensywność zużycia elementów, występują równocześnie z nimi procesy, które w mniejszym stopniu wpływają na zużycie. Procesy towarzyszące dotyczą przede wszystkim zużycia mechano-chemicznego, które hamuje rozwój procesów adhezji, a także w pewnych zakresach poślizgu i obciążeniach jednostkowych całkowicie je wypierają stając się wiodącym procesem, który określa naturę oraz intensywność zużycia.

4.8. Zużycie zmęczeniowe

4.8.1. Wiadomości ogólne o zużyciu zmęczeniowym

Zużycie zmęczeniowe rozumiane jest jako zużycie powierzchni tarcia lub poszczególnych jej obszarów w wyniku wielokrotnego ponownego mikoplastycznego odkształcenia objętości materiału, co powoduje powstanie

mikropęknięć i oddzielenie cząstek materiału. Cyklicznie zmieniające się naprężenia kontaktowe powodują uszkodzenie powierzchniowe w postaci wykruszeń (wżerów), pęknięć, zużycia, łuszczenia. Skorupy, które powstają (średnica od setnych cząstek milimetra do kilku milimetrów) zwiększają się w procesie pracy wężła tarcia. Wynika to z łuszczenia się powierzchni.

Zużycie zmęczeniowe w postaci wykruszeń prowadzi do zwiększonej aktywności wibracyjno-akustycznej mechanizmów, wzrostu stopnia hałasu, zwiększenia koncentracji obciążenia, naprężeń kontaktowych, zmniejszenia pola powierzchni nośnej elementów ciernych, powstawania intensywnego zużycia i zakleszczenia [8–9].

Zużycie zmęczeniowe występuje gdy na powierzchni tarcia jest obecne smarowanie, a proces zużycia nie ma charakteru ściernego. Przy czym proces zużycia może być progresywny lub ograniczony. Progresywne zużycie występuje w przypadku dużych naprężeń kontaktowych, wyprowadzając z równowagi pary tarcia. Ograniczone zużycie zmęczeniowe dla wielu par tarcia (np. dla kół zębatych) nie jest niebezpieczne, a ich uszkodzone elementy mogą być wykorzystywane do dalszej pracy.

Łożyska ślizgowe i kulkowe, koła zębate, wałki, suwaki, elementy konstrukcyjne hamulców są narażone na zużycie zmęczeniowe.

4.8.2. Teoria zużycia zmęczeniowego oraz jego mechanizm zużycia

Zgodnie z teorią zmęczeniową zużycia I.V. Kragelskiego procesy te występują na poziomie mikrogeometrii (chropowatości) współpracujących powierzchni. Ponieważ kontakt jest dyskretny, jego koncentracja występuje w poszczególnych punktach (wystęпах). Każdy występ powoduje powstanie fali przed sobą, odkształcając materiał. Ścisła on materiał przed wgłębnikiem, powodując jego rozciąganie w pewnej odległości przed wgłębnikiem (grzbiet fali) i znacznie rozciągając go za wgłębnikiem (wskutek siły tarcia). Tak więc, każde przecięcie ciała ściernego jest poddawane cyklicznym naprężeniom ściskającym i rozciągającym. Efekt ten został po raz pierwszy szczegółowo opisany i doświadczalnie zarejestrowany przez A.S. Radczyka i V.S. Radczyka. Potwierdzono zmianę znaku odkształcenia próbki ulegającej zużyciu w strefie kontaktowej. W wyniku wielokrotnego odkształcenia materiału ściernego stałymi nierównościami przeciwpróbki podczas względnego poślizgu ciał ciernych następuje zużycie zmęczeniowe.

Proces nagromadzania uszkodzeń na powierzchniach ciernych ma określone etapy. Początkowo występuje kumulacja zniekształceń sprężystych sieci i wzrasta gęstość dyslokacji. Nagromadzenie wad występuje nadal do osiągnięcia krytycznej gęstości dyslokacji, co prowadzi do powstania submikroskopowych pęknięć. Wraz z nieodwracalnymi zniekształceniami sieci krystalicznych naruszone zostają związki międzycząsteczkowe i niszczone są niektóre mikroobjętości. Materiał zaczyna intensywnie się oddzielać. Proces ten

powtarza się cyklicznie: liczba cykli, przy których zaczyna się oddzielanie materiału, zależy od obciążenia i od właściwości fizyko-mechanicznych materiału.

Potwierdzenie koncepcji charakteru zmęczeniowego zużycia uzyskano w pracach Keridga i Lancastera. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że cząstki które tworzą się w wyniku ścierania, są znacznie większe od średnicy obszarów styku, a rozmiary przeniesionych cząsteczek w wyniku adhezji na przeciwpróbki mają pośrednie rozmiary pomiędzy tymi dwoma rozmiarami. Zatem na odkształcenie, a tym samym na zniszczenie zmęczeniowe narażona jest nie tylko powierzchnia styku, ale również przyległy do niej obszar. Dlatego cząsteczki zużycia są większe od obszarów styku.

Teoria zużycia przez odwarstwienie (złuszczenie) opracowana została przez N.Sua. W procesie tarcia naprężenie styczne przenosi się między powierzchniami w wyniku adhezji i mikrobruzdowania. Odkształcenie plastyczne podpowierzchniowe gromadzi się podczas wielokrotnych przejść nierówności, przy czym z utworzeniem pęknięć i pustych przestrzeni w warstwach podpowierzchniowych metalu, występuje ich wzrost i łączenie się. Proces odwarstwiania jest uważany za proces akumulacyjny. Pod działaniem każdej przechodzącej nierówności następuje niewielkie przesunięcie materiału. Płatki zużycia powstają po przejściu dość dużej liczby nierówności.

Potwierdzeniem charakteru zmęczeniowego zużycia jest hipoteza G.K. Trubyna, która wyjaśnia proces wykruszania kontaktowego materiału podczas walcowania działaniem materiału smarnego rozklinującego. Istnieją jednak inne hipotezy. L.B. Erlych wyjaśnia występowanie pęknięć początkowych podczas zmęczenia kontaktowego utratą stabilności obszarów warstwy powierzchniowej materiału i wyrównaniem formowanych przy tym jego lokalnych przemieszczeń przy wielokrotnych odkształceniach plastycznych.

Analiza różnych teorii zużycia wykazała, że w zależności od stosunku pomiędzy normalnymi i stycznymi składowymi sił powstających w kontakcie, a także od charakteru zmian we właściwościach fizyko-mechanicznych materiału warstwy powierzchniowej mikropęknięcie pierwotne może pojawić się zarówno w warstwie powierzchniowej, jak i podpowierzchniowej.

W przypadku ogólnym zużycia wskutek zmęczenia jego intensywność zależy od stanu naprężeniowego deformowanego warstw powierzchniowych i przypowierzchniowych materiałów oraz innych czynników.

4.9. Zużycie wodorowe

4.9.1. Istota i definicja zużycia wodorowego

Zużycie wodorowe jako jeden z procesów niszczenia powierzchni w warunkach tarcia ślizgowego zdefiniowały A.A. Polyakova i D.N. Harkónowa. Jednak na temat danego zagadnienia opublikowano już kilka książek i około 100 artykułów

w czasopismach. Za granicą znaczenie zjawiska zużycia wodorowego przy tarcu ruchowym jest na etapie intensywnego badania.

Ze wszystkich procesów zużycia powierzchni podczas tarcia ślizgowego, zużycie wodorowe jest najtrudniejszym procesem do badania. Pojawia się ono w węzłach tarcia maszyn różnych gałęzi przemysłu i według częstości występowania porównywane jest do zużycia abrazyjnego. Procesy zachodzące przy zużyciu wodorowym są procesami interdyscyplinarnymi łączącymi elektrochemię, chemię organiczną, katalizę, chemię polimerów i materiałów smarnych, mechanochemię i inne [9].

Zużycie wodorowe zależy od stężenia wodoru w warstwach powierzchniowych elementów stykających się. Jest on uwalniany z materiałów pary cieiernej lub ze środowiska (materiału smarnego, paliwa, wody itp.) i przyspiesza zużycie. Zużycie wodorowe jest spowodowane następującymi procesami występującymi w strefie tarcia:

- intensywnym wydzielaniem się wodoru podczas tarcia w wyniku tribodestrukcji materiałów zawierających wodór, który tworzy źródło ciągłego przepływu wodoru w warstwie powierzchniowej stali lub żeliwa,
- adsorpcją wodoru na powierzchniach tarcia,
- dyfuzją wodoru w zdeformowaną warstwę stali, prędkość której jest określana przez gradienty temperatur i naprężeń, co tworzy efekt akumulacji wodoru w procesie tarcia,
- szczególnym rodzajem zużycia powierzchni, ze względu na równoczesny rozwój wielu zarodków pęknięć w całej strefie;
- deformacją i efektem akumulacji wodoru, charakterystycznym dla zużycia jest natychmiastowe powstawanie drobno dyspergowanego proszku materiału.

W literaturze od wielu lat publikowane są wyniki badań o wpływie wodoru na zmniejszenie wytrzymałości materiałów, zwłaszcza przy wpływie obciążeń cyklicznych.

Jednak niedawno zidentyfikowano zjawisko zużycia wodorowego z następujących powodów:

1. Nieprawdziwe było założenie, że podczas tarcia może uwalniać się wodór dyfuzyjno-wolny z materiału smarnego, plastycznego lub wody. Pod normalnym ciśnieniem i temperaturą nie uwalnia się wodór z tych substancji. W podwyższonych temperaturach w procesie tribodestrukcji tworzyw sztucznych lub materiału smarnego wodór także nie uwalnia się w początkowych procesach, jest on uwalniany w procesach wtórnych.
2. Do niedawna uważano, że przy tarcu maksymalna temperatura występuje na powierzchni tarcia elementów. Wiadomo, że wodór bardzo łatwo przenika pod wpływem gradientu temperatury w rozgrzane części materiału. Ta właściwość służy do odwodornienia elementów po ich

nawodorowaniu, na przykład przy galwanicznym chromowaniu. W związku z tym uważano, że podczas tarcia w przypadku podwyższonej temperatury proces nawodnorodnienia jest niemożliwy. Co więcej, uważano, że obecny wodór w elementach trących będzie wychodził poza strefę tarcia. Elementy takie jak cylindry silników lotniczych po chromowaniu nie zostały odwodorodnione.

Dopiero w ostatnich latach, A.V. Kudynov teoretycznie i V.Y. Matyushenko i G.P. Shpeńkov eksperymentalnie odkryli, że przy ciężkich warunkach tarcia maksymalna temperatura jest obserwowana nie na powierzchni tarcia, lecz na pewnej głębokości. Sprzyja to warunkom, w których wodór (jeżeli będzie on zaadsorbowany na powierzchni elementów pod wpływem gradientu temperatury) dyfunduje w głąb powierzchni, tam koncentruje się i powoduje kruchość warstw powierzchniowych, a tym samym zwiększa zużycie.

4.9.2. Warunki występowania zużycia wodorowego

Obszar występowania zużycia wodorowego jest bardzo szeroki. Prawie cała powierzchnia tarcia elementów stalowych i żeliwnych zawiera duże ilości wodoru i w związku z tym narażona jest na większe zużycie. Obecność pary wodnej w powietrzu sprzyja zużyciu wodorowemu, a także rozpad w strefie kontaktu materiału smarnego, paliwa lub tworzyw sztucznych.

Zużycie wodorowe może być wywołane nie tylko wodorem generowanym przez tarcie, ale i wodorem, który może być utworzony w różnych procesach przemysłowych. Przy wytopie żelaza w procesie wielkopieczowym powstaje z wilgoci wodór, który dyfunduje w metal (zwany jest wodorem biograficznym). Przy obróbce cieplno-chemicznej, na przykład na skutek azotowania (przy dysocjacji amoniaku), uwolniony wodór dyfunduje w stal. Uwodornianie produktów stalowych występuje podczas elektroosadzania cynku, kadmu, chromu i niklu. Jednym ze sposobów wyeliminowania wodoru z powłok galwanicznych jest obróbka cieplna w temperaturze 200°C.

W celu usunięcia osadu, produktów korozji, produkty stalowe poddawane są trawieniu w kwasie. Zanurzenie stali w roztwór kwasu powoduje rozpuszczenie żelaza w miejscach anodowych i uwalnianie wodoru na obszarach katodowych z jednoczesnym przenikaniem wodoru w stal. W wyniku gromadzenia wodoru gazowego na powierzchniach elementów mogą powstawać pęcherzyki. Stopień uwodornienia w procesie trawienia zależy od wielu czynników: stanu stali i dostępnych w roztworze nawet niewielkich ilości (śladów) siarki, fosforu, arsenu, selenu, które mogą spowolnić reakcje chemicznej desorpcji zwiększając tym samym zasięg pokrycia wodorem i adsorpcją. Dlatego, w praktyce wybór inhibitora powinien być starannie przemyślany lub inaczej będzie możliwe zwiększenie adsorpcji wodoru.

Podczas fosforanowania wodoru przenika do stali. Konieczne jest regulowanie zawartości kwasu i niektórych składników tlenkowych w kąpeli, a tym samym zmniejszenie ilości zaadsorbowanego wodoru

Korozja atmosferyczna metalu może powodować absorpcję wodoru w przypadku, gdy występuje w atmosferze przemysłowej zawierającej dwutlenek siarki i kwaśny siarczan.

Wodór, który przeniknął do stali podczas tarcia będzie stopniowo dyfundował do powierzchni i powodował jej zużycie.

4.9.3. Wpływ wodoru na wytrzymałość oraz kruchość wodorowa

Pierwszą pracą, w której ustalono wpływ wodoru na kruchość stali jest praca Pfeylya, opublikowana w 1926 roku. Od tego czasu o tematyce kruchości wodorowej opublikowano wiele prac, w których zawarto obszernie wyniki badań doświadczalnych. Główne wnioski sformułowane przez P. Kotterylomao o wpływie wodoru na wytrzymałość objętościową stali są następujące:

- wodór nie wpływa znacząco na właściwości sprężyste żelaza lub stali,
- gdy zawartość wodoru wynosi do $0,1 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ twardość stali nie zmienia się, ale granica wytrzymałości jest niższa; naprężenie które powoduje zmniejsze materiału obniża się proporcjonalnie do wzrostu stężenia wodoru,
- właściwości plastyczne (wydłużenie i zwężenie) zmniejszają się proporcjonalnie ze wzrostem stężenia wodoru aż do $5 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$, z dalszym wzrostem zawartości wodoru plastyczność pozostaje na niskim poziomie, stopień kruchości stali pod wpływem wodoru maleje ze wzrostem szybkości odkształcania, przy jej bardzo wysokiej wartości (badania na uderzenie) wodór nie powoduje kruchości stali,
- kruchość stali pod wpływem wodoru występuje w zakresie temperatur od -100 do $+100^\circ\text{C}$, największy stopień kruchości występuje w normalnych i niskich temperaturach. Do występowania zjawiska kruchości wymagana jest obecność naprężeń rozciągających. W obecności wodoru charakter zużycia stali zmienia się:
- zamiast typowego dla metalu zużycia przy odkształceniu plastycznym materiału występuje kruche niszczenie (zwykle poprzez rozerwanie po płaszczyznach ścinania),
- intensywność zwiększenia kruchości metalu pod wpływem wodoru zależy od rodzaju obróbki, stal jest szczególnie podatna na kruchość wodorową w stanie hartowanym, prawdopodobieństwo wystąpienia kruchości wodorowej również wzrasta w wyniku zgniotu, wodór powoduje przedwczesne kruche zniszczenie stali stopowych o dużej wytrzymałości pod obciążeniem statycznym,

- wodór nie wpływa na właściwości metalu w stanie nienapężonym; usunięcie wodoru ze stali i jej odkształcenie zapewnia pełne zachowanie plastyczności, w celu wykazania kruchości wodorowej konieczna jest obecność wodoru zdolnego do dyfuzji w procesie deformacji, jeśli wodór jest rozłożony nierównomiernie w próbce, obszary bogate w wodór będą mieć najmniejszą plastyczność w badaniu rozciągania, obszary te zaczną się przedwcześnie niszczyć.

Wspomniane osobliwości wpływu wodoru na właściwości stali zostały ustalane eksperymentalnie w procesie badania wpływu wodoru na wytrzymałość objętościową elementów stalowych. Jest bardzo prawdopodobne, że prawa te będą w pewnym stopniu podobne dla stali w procesie tarcia i zużycia.

Mechanizm kruchości wodorowej

Pomimo dużej ilości pozycji literaturowych opisujących prace eksperymentalne nie udało się wypracować wspólnego punktu widzenia na mechanizm kruchości wodorowej. Powodem tego jest występowanie wielu czynników wpływających na ten mechanizm, złożoność i niewystarczająca ilość badań niektórych podstawowych procesów fizyko-chemicznych.

Istnieje kilka form kruchości wodorowej. B.A. Kalachev dzieli je na dwie grupy:

1. Kruchość pierwszego rodzaju spowodowana przez źródła, które występują w pierwotnym metalu, z powodu wysokiej zawartości wodoru.
2. Kruchość drugiego rodzaju spowodowana przez źródła rozwijające się w metalu o wysokiej zawartości wodoru w procesie odkształcenia plastycznego.

Kruchość pierwszego rodzaju jest odwracalna i rośnie ze wzrostem szybkości odkształcania. Kruchość drugiego rodzaju rozwija się przy niskich prędkościach zniekształceń i może być zarówno odwracalna i nieodwracalna. Teorie kruchości wodorowej mogą być podzielone na cztery grupy:

1. Teoria powstania wysokiego ciśnienia w rezultacie łączenia jonów wodoru w makro- i mikrowgłębieniach oraz w pęknięciach wewnątrz metalu.
2. Hipotezy adsorpcji wyjaśniające zmniejszenie naprężenia niszczącego w wyniku zmniejszenia energii powierzchniowej wewnątrz pęknięć wskutek adsorpcji wodoru (wodór pełni rolę środka powierzchniowo aktywnego).
3. Teoria oddziaływań wodoru z siecią krystaliczną metalu; wodór jest rodzajem defektu, który zmniejsza wytrzymałość spójnego wiązania metalu.
4. Teorie oparte na oddziaływaniu wodoru z dyslokacjami; wodór blokuje dyslokacje.

Aby chronić metal przed działaniem wodoru w podwyższonych temperaturach i ciśnieniu zaleca się następujące metody:

- Wprowadzenie do stali elementów tworzących węgliki (chrom, molibden, wanad, niob i tytan) w celu stabilizacji składnika zawierającego węgiel i zapobiegania odwęglania stali lub platerowania stali metalami, które mają niższą wodoroprzenikalność (na przykład miedź, srebro, aluminium, stal X08Cr13, X12CrNiTi18-10 i inne). M. Smylkovsky zauważa, że jeśli podłączyć do błony dodatni potencjał elektryczny w stosunku do elektrody pomocniczej, przenikanie wodoru będzie całkowicie zahamowane. Przy podłączeniu potencjału ujemnego (około 1000 V) nawodorowanie zwiększa się kilkakrotnie. Wodór przenika do metalu, przeważnie w postaci protonu. Istnieją substancje, których małe dodatki do metalu przyczyniają się do przenikania do niego wodoru. Mogą to być związki siarki, antymonu, arsenu, selenu, domieszki siarczkwodoru i inne. Dlatego obecność tych substancji w stali jest niepożądana.
- Istnieją również inhibitory przenikania wodoru do metalu. Wiele związków polarnych organicznych hamuje przenikanie wodoru do metali w procesie korozji i polaryzacji katodowej. Dibenzylsulfoksyd przy silnie ujemnych potencjałach katody odnawia się w dibenzylsulfid i silnie adsorbuje na powierzchni metalu. Mechanizm działania inhibitorów organicznych przenikania wodoru polega na tym, że podczas elektrolizy jony wodoru wyładowują się na zewnętrznej powierzchni warstwy zaadsorbowanej cząsteczek organicznych, w wyniku czego jest zakłócany kontakt bezpośredni jonów wodorowych z powierzchnią.

4.9.4. Rodzaje zużycia wodorowego

Zgodnie z ustaleniami A.A. Polyakowa i D.N. Harkunowa istnieją dwa główne rodzaje zużycia powierzchni stalowych i żeliwnych elementów pod wpływem wodoru: zużycie przez dyspergowanie i zużycie przez zniszczenie.

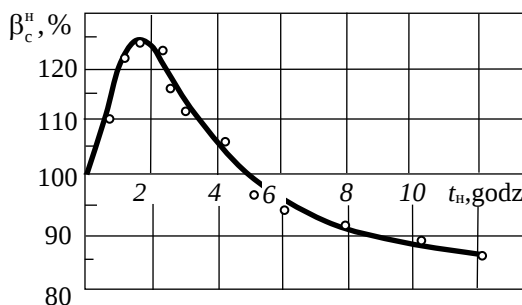
Zużycie wodorowe przez dyspergowanie. Przy takiej formie zużycia nie obserwuje się jakichkolwiek zmian w warstwie powierzchniowej elementów na skutek normalnego zużycia. Wodór wzmacnia (w zależności od jego ilości w warstwie powierzchniowej) dyspergowanie stali lub żeliwa. Na powierzchniach tarcia nie ma wyrwań, znaczącego przeniesienia materiału z jednej powierzchni tarcia na drugą. Mogą one mieć połysk i bardzo małe rysy, które są niewidoczne gołym okiem i są skierowane wzdłuż kierunku ruchu.

Podczas badania wytrzymałości nawodorowanych próbek stalowych (nawodorowanie prowadzono przez elektrolizę) okazało się, że przy małym nawodorowaniu wytrzymałość próbek ze stali C45 zwiększa się nieznacznie,

a przy dalszym nawodornowaniu spada. Wynika to z faktu, że podczas początkowego nawodorowania nieznacznie zwiększa się twardość stali.

Na rys. 4.25 przedstawiona jest zależność zmiany względnej mikrotwardości stali (stosunek mikrotwardości nawodorowanej stali C45 do nienawodorowanej w procentach) od czasu nawodorowania. Zwiększa się mikrotwardość w pierwszym okresie (1,5 godziny) nawodorowania, kiedy następuje proces nasycenia stali wodorem, czemu towarzyszy wzmocnienie warstwy powierzchniowej.

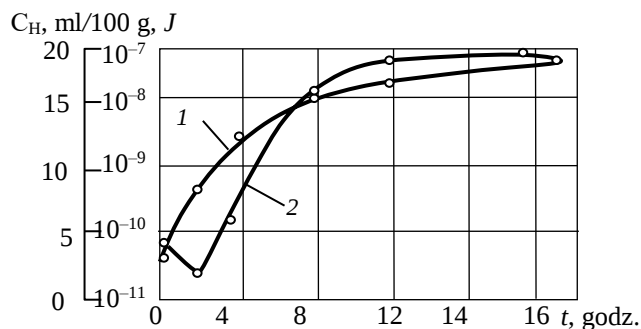
Dalej mikrotwardość podczas nawodorowania spada i staje się mniejsza niż początkowa. Zmniejszenie mikrotwardości stali przy nasyceniu wodorem wskazuje na rozluźnienie warstwy powierzchniowej, co powoduje spadek odporności na zużycie.



Rys. 4.25. Zmiana względnej mikrotwardości stali od czasu wytrzymywania w środowisku nawodorującym

Zależność ilości wchłoniętego wodoru i intensywność zużycia stali od czasu wytrzymywania w środowisku nawodorującym przedstawiono na rys. 4.26.

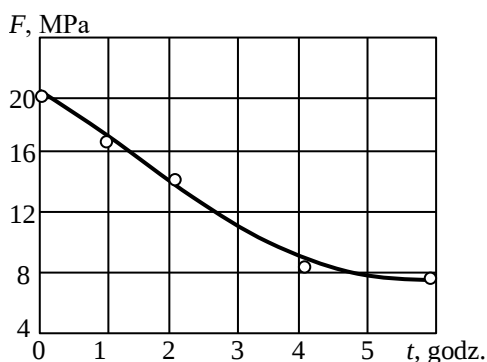
Badanie próbek na zużycie przeprowadzono na maszynie tarcia 77MT-1 przy ruchu posuwisto-zwrotnym. Początkowo zastosowane próbki nie były nawodorowane. Dolna próbka została wykonana ze stali C45, a górna z żeliwa EN-GJL. Nawodorowanie zostało wykonane w 26% roztworze kwasu siarkowego. Intensywność zużycia oszacowano na podstawie wartości $I = m/(LA\rho)$, gdzie: m – masa zużytej warstwy, L – droga tarcia, Aa – nominalny obszar tarcia próbki, ρ – gęstość materiału.



Rys. 4.26. Zależność ilości wchłoniętego wodoru C_H (krzywa 2) i intensywności zużycia (krzywa 1) od czasu wytrzymywania w środowisku nawodorowującym

Badania wykazały, że intensywność zużycia po nawodorowaniu może początkowo zmniejszyć się, a następnie wzrosnąć o dwa rzędy.

Ustalono również, że nawodorowanie znacznie zmniejsza obciążenie jednostkowe do zatarcia próbek ze stali podczas tarcia z brązem (rys. 4.27). Badania przeprowadzono na maszynie tarcia AE-5, w której trzy próbki stalowe rozmieszczone pod kątem 120° , zużywane były podczas oddziaływania z płaską stroną obrotowego dysku.



Rys. 4.27. Zależność obciążenia granicznego do zatarcia od czasu nawodorowania stali

Olej był podawany kroplami do centralnej części dysku. Z podanego wykresu wynika, że największy spadek obciążenia do zatarcia następuje po 4–5 godzinach nawodorowania.

Zużycie wodorowe przez zniszczenie. Ten rodzaj zużycia ma szczególną cechę. Warstwa powierzchniowa stali lub żeliwa zużywa się natychmiast na głębokości do 1–2 mikronów. Dzieje się to wtedy, gdy warstwa powierzchniowa gromadzi dużą ilość wodoru. Wcześniej zauważono, że proces tarcia stwarza

warunki do osiągnięcia wysokiego stężenia wodoru w warstwach powierzchniowych stali. Tarcie powoduje dysorbcję materiału smarującego. Wówczas wodór otrzymuje możliwość gromadzenia się na powierzchni w większej ilości centrów adsorbowanych. Koncentracja wodoru w stali stale wzrasta. Wodór wchodzi w zarodkowe pęknięcia, wnęki, granice międzykrystaliczne i inne miejsca. Podczas tarcia występuje okresowa deformacja warstwy powierzchniowej i objętość uszkodzonych miejsc (wnęk) zmienia się. Wodór, który przenika we wnękę molizuje się i nie jest w stanie wyjść z powrotem. Wraz ze wzrostem objętości namaga się rozszerzyć wnękę, tworząc wysokie naprężenie. Powtarzanie cyklu powoduje efekt akumulacji, który trwa aż do momentu, gdy wewnętrzne ciśnienie w defektach nie spowoduje zniszczenia stali.

4.10. Zużycie fretting-korozyjne

4.10.1. Wiadomości ogólne

Fretting-korozja jest to proces zużycia szczególnie stykających się powierzchni metal-metal lub metal-niemetal w wyniku małych względnych przemieszczeń oscylacyjnych w obecności środowiska korozyjnego. Aby wzbudzić fretting-korozyję wystarczy przesunięcie powierzchni o amplitudzie 0,025 mikrona [10, 11]. Destrukcja polega na powstawaniu na stycznych powierzchniach drobnych wrzodów i produktów korozji w postaci blaszek, plam i proszku. Na ten rodzaj zużycia są narażone nie tylko stale węglowe, lecz również odporne na korozyję węzły tarcia stal-stal (mogą być jednakowe i różne), cyna lub aluminium, antymon, a także żeliwo-bakelit lub chrom i wiele innych par tarcia.

Ze względu na małą amplitudę przemieszczenia powierzchni stycznych uszkodzenia skupiają się na małych obszarach rzeczywistego kontaktu. Produkty zużycia nie mogą być usuwane z obszaru kontaktu, co powoduje wysokie ciśnienie i zwiększa się ich działanie ściernie na metal bazowy.

W proście fretting-korozyji względna prędkość ruchu stycznych powierzchni jest niewielka. W przypadku drgań harmoniczných z amplitudą 0,025 mm i częstotliwością 50 s^{-1} maksymalna prędkość wynosi 7,5 mm/sek, a średnia 2,5 mm/sek. W jednym z eksperymentów G.A. Tomlinson obserwował zużycie podczas fretting-korozyji przy średniej prędkości względnej 0,02 mm/rok. Jeśli amplituda ruchu wibracyjnego jest duża (około 2,5 mm), to pole powierzchni uszkodzenia fretting-korozyją zwiększa się i charakter zużycia jest podobny do zużycia, które występuje podczas poślizgu jednokierunkowego. W związku z tym można założyć, że amplituda przemieszczenia powierzchni około 2,5 mm to górna granica amplitudy, przy której występuje fretting-korozja. Dotyczy to powierzchni niesmarowanych.

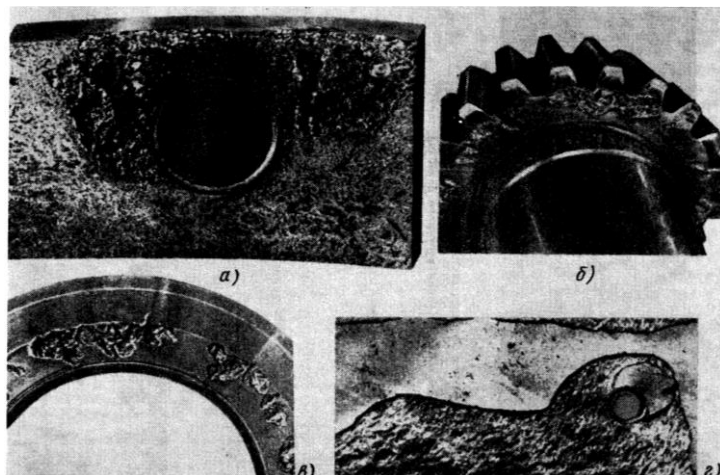
Produkty fretting-korozyji wyrobów ze stali w atmosferze powietrza mają kolor od jasno-czerwono-brązowego do ciemnobrązowego w zależności od

rodzaju materiałów, ciśnienia, wilgotności i częstotliwości cykli mikropzesunięć. Skład tych produktów jest następujący: większość to Fe_2O_3 , niewielka ilość α -żelaza. Mogą być obecne także FeO , Fe_3O_4 i wodorotlenek $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ oraz czasami są obecne azotki. Tlenki, azotki i hydraty powstają w wyniku zużycia wszystkich metali, z wyjątkiem platyny, której produkty zużycia składają się z czarnego proszku czystej platyny.

Fretting-korozja zachodzi również w próżni, w środowisku tlenu, azotu i helu. Intensywność zużycia przy fretting-korozji w atmosferze powietrza jest większa niż w próżni i w atmosferze azotu, a w tlenie większa niż w helu. Jeśli intensywność zużycia byłaby określona tylko przez siły tarcia, to byłaby ona większa w próżni niż w powietrzu, ponieważ w próżni siły tarcia są znacznie większe. Biorąc pod uwagę te okoliczności, możemy stwierdzić, że istotną rolę w procesie fretting-korozji odgrywa utlenianie powierzchni tarcia lub metalicznych produktów zużycia. Jednakże, na kinetykę reakcji utleniania wpływa czynnik mechaniczny, o czym świadczy pojawienie się przy fretting-korozji tlenków kadmu innych od dotychczas znanych tlenków tego metalu. Tak więc, fretting-korozja jest rodzajem zużycia metali i ich stopów w środowiskach korozyjnych słaboagresywnych i nieagresywnych i w wyniku jednoczesnego działania czynników mechanicznych i chemicznych.

Wrzody i produkty korozji na powierzchniach współpracujących wałów i prasowanych na nich dysków, kół, tulei i pierścieni łożysk tocznych, osi i powierzchni styku kół transportu kolejowego, wciśniętych wkładek łożysk, powierzchniach wpustów i ich rowków, powierzchniach centrujących połączeń wielowypustowych, wspornikach, powierzchniach sprężyn oporowych, szczelnych złączeń, w złączach nitowych między metalami, nitach i otworach, na śrubach, etc. są wynikiem przejawienia się fretting-korozji (rys. 4.28). Fretting-korozja występuje na próbkach w miejscach styku z tulejkami zaciskowymi maszyn do badania na zmęczenie. Fretting-korozja jest obserwowana w linach wykonanych z drutu, przełącznikach elektrycznych, przełącznikach nożnych i łącznikach wtykowych (rys. 4.29).

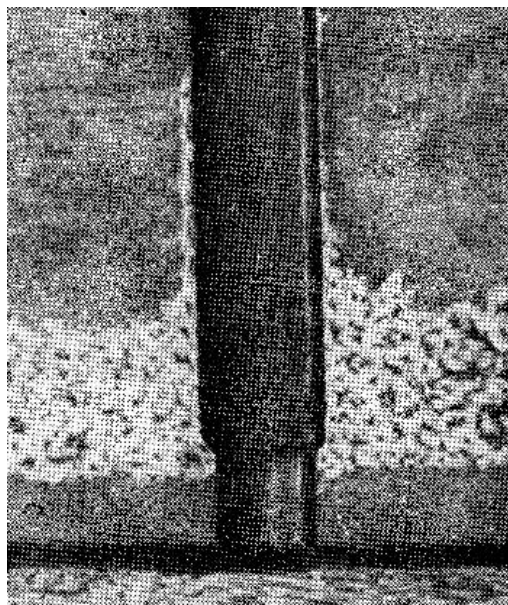
Produkty fretting-korozji gromadzą się w postaci proszków zawierających cząstki metali. Powstają one w wyniku tarcia aluminiowego pojemnika podczas jego transportu po metalowych elementach statku i mogą spowodować wybuch. W przypadku usuwania zużytych proszków ze strefy tarcia, napięcia są zmniejszone.



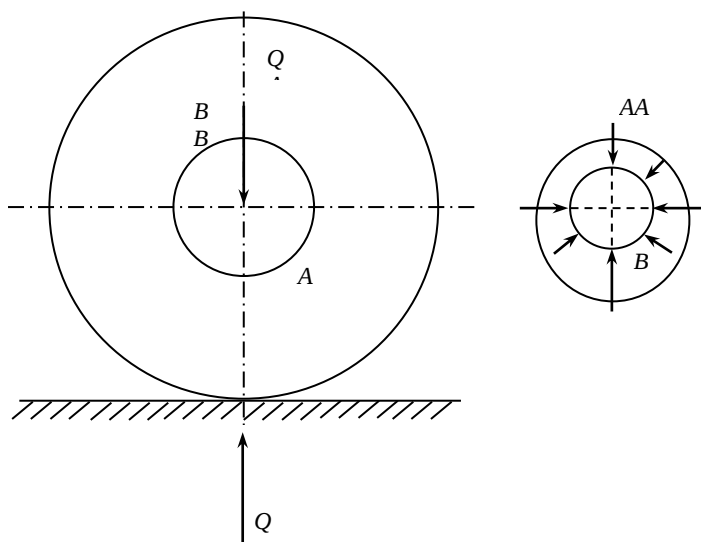
Rys. 4.28. Uszkodzenia spowodowane fretting-korozją kołnierza korpusu sprężarki (a), koła zębatego (b), podkładek (c) i taśmy samolotu (d)

Niezbędne dla tego procesu względne mikropzesunięcia kontaktujących powierzchni powstają w wyniku deformacji elementów pod obciążeniem i ich vibracji oraz oscylacji, które występują w układach sprężystych. Wyjaśniono to na kilku przykładach.

Niech koło (rys. 4.30) wciśnięte na oś ma symetrię osiową. Ciśnienia od zamocowania z naciągiem są rozmieszczone równomiernie wzdłuż koła.



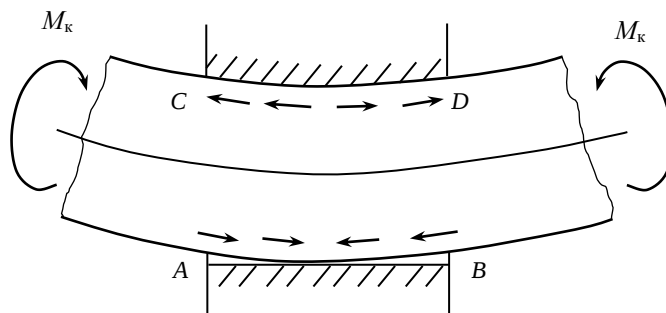
Rys. 4.29. Połączenie wtykowe przewodu elektrycznego



Rys. 4.30. Schemat obciążenia koła i wykres ciśnienia sumarycznego promieniowego na wał od zamocowania z naciągami i przyłożonej siły poprzecznej

Pojawienie się siły Q zmienia obraz. Ciśnienie staje się nierównomierne: w punkcie B wyższe niż w punkcie A. Kiedy koła są obracane fala zginięcia przemieszcza się wzdłuż powierzchni z prędkością kątową ω . Na powierzchni osadzenia koła zachodzą zarówno przesunięcia promieniowe styczne, jak i osiowe. Podobnie zjawisko występuje w poprzecznych przecięciach wału i koła zębatego pod wpływem sił obwodowych i odrywających.

W rozważanym przykładzie nie uwzględniono momentu zginającego. Jednak jego wpływ może być znaczny. Schemat powstawania sił osiowych tarcia w strefie osadzenia wału zginającego przedstawiono na rys. 4.31. Włókno AB znajduje się w strefie rozciągniętej, włókno CD – w ściśniętej. Przesuwając się z jednej strefy do drugiej, włókno zmienia swoją długość, napotykając na opór od osiowych sił tarcia. W rozwoju fretting-korozji mają znaczenie nie tylko mikrop przemieszczenia, ale również siły tarcia na powierzchniach stykających się. W tym przypadku siły te mają zmieniające się znaki. Podczas obciążenia wału, powstania momentu skręcającego M_k i wachania, występuje względne przemieszczenie wału w miejscach połączenia z kołami zębatymi, tulejami i innymi detalami biorącymi udział w oddziaływaniu mechanicznym. Dzieje się tak bez względu na to, czy jest używane do łączenia tych elementów osadzenie z naciągami lub używane wpusty w kombinacji z osadzeniami z naciągami lub bez naciągów. Wpusty pod działaniem obciążenia zmieniają się i przesuwają od osi w bruzdach, które również podlegają zmianom.



Rys. 4.31. Schemat powstawania sił osiowych tarcia w strefie osadzenia wału zginającego

4.10.2. Reguły fretting-korozji

Wpływ amplitudy. Badania wpływu amplitudy wahań powierzchni na stopień uszkodzeń metali, spowodowanych przy fretting-korozji, prowadzone przez J.H. Fenga, R.B. Uoterhauzoma wykazały, że istnieje w przybliżeniu liniowa zależność ubytku masy metalu od amplitudy. Wyniki badań V.D. Shipilova, I.V. Wasiliewa na odporność różnych materiałów na fretting-korozję przy różnych amplitudach oscylacji podano w tabeli. 4.8. Eksperymenty prowadzono przy częstotliwości 1500 min^{-1} , ciśnieniu kontaktowym $12,5 \text{ MPa}$, bez materiału smarującego. Stwierdzono, że podczas przejścia do amplitudy $0,3 \text{ mm}$ odporność na zużycie stali gwałtownie spada i zbliża się do zależności liniowej.

Wpływ ciśnienia (obciążenia). Zwiększenie ciśnienia kontaktowego podczas fretting-korozji powoduje zwiększenie uszkodzeń. Udowodnionym jest, że istnieje proporcjonalna zależność między prędkością zużycia i obciążeniem. W tabl. 4.9 przedstawiono wyniki badań V.D. Shipilova, I.V. Vasilieva zużycia próbek w zależności od obciążenia.

Tabela 4.8. Zużycie materiałów w zależności od amplitudy wahań

Rodzaj materiału nieruchomego	Utrata masy nieruchomej próbki, mg, przy amplitudzie drgań, mm			
	0,03	0,08	0,15	0,3
Stal C20	1	1,25	2,5	12,7
30CrMnSi4-4-4	0,5	1	1,7	9,0
18CrNiMo8-16-10	1,8	2,1	2,0	9,1
AlCu4Mg0,5	0,4	1,4	3,5	7,7
Uwaga. Materiał ruchomej próbki – stal 30CrMnSi4-4-4				

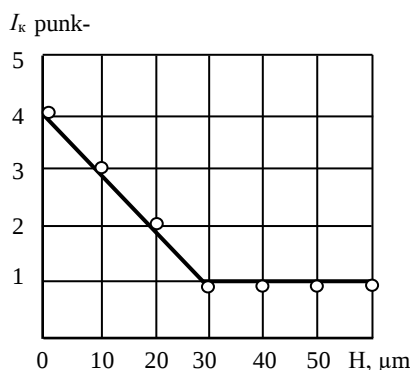
Tabela 4.9. Zużycie materiałów w zależności od obciążenia

	Utrata masy nieruchomej próbki, mg przy obciążeniu, kN			
	0,03	0,08	0,15	0,3
Stal C20	7,5	9,4	12,5	16,5
30CrMnSi4-4-4	14,2	14,8	15,1	15,5
18CrNiMo8-16-10	10,2	11,4	14,3	16,0
AlCu4Mg0,5	7,8	12,9	14,9	25,0
Uwaga. Materiał ruchomej próbki– stal 30CrMnSi4-4-4				

W rzeczywistych węzłach tarcia zwiększenie nacisku może powodować zmniejszenie poślizgu, przykładowo w połączeniu wału i tulei prasy. Wówczas zmniejsza się intensywność zużycia powierzchni podczas fretting-korozji.

Badania B.A. Genicza wykazały, że przy roboczej części wału o średnicy 75 mm, bazie eksperymentów 107 cykli i różnych naprężeniach łożysk tocznych, uszkodzenia zatrzymywały się przy napięciu 30 mikronów lub więcej. Obciążenie w badaniu wyniosło 12 kN (rys. 4.32).

Tak więc, wzrost napięcia może znacznie zmniejszyć uszkodzenia od fretting-korozji, ale nie wyklucza niekorzystnego efektu frettingu na odporność na zmęczenie.



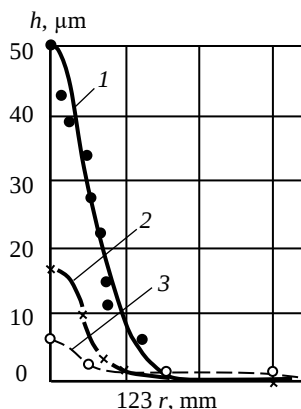
Rys. 4.32. Zależność intensywności I_k fretting-korozji uszkodzeń na osiach pod osadzonymi pierścieniami łożysk tocznych w zależności od naciągu

Wpływ środowiska. Interesującym jest określenie wpływu wilgoci powietrza na zużycie przy fretting-korozji. K.W. Wright zbadał stalową próbkę w kontakcie z chromowaną próbką w środowisku suchego powietrza i powietrza o wilgotności 45 i 100%. Warunki badania: 50 tys. cykli, amplituda 0,025 mm, ciśnienie 6,6 MPa. Wyniki badań przedstawiono na rys. 4.33. W suchym powietrzu zużycie jest znacznie intensywniejsze niż przy wilgotnym. Obecność wody zmniejsza intensywność fretting-korozji. Można założyć, że w procesie

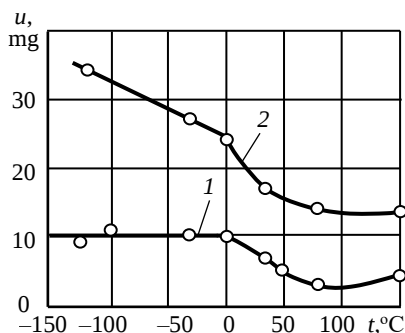
fretting-korozji w wilgotnym powietrzu tworzy się wodór mający zdolność do dyfuzji, który może być reduktorem i zmniejszać ilość produktów korozyjnych. Prawdopodobnie wodór jest odpowiedzialny za kruchość sąsiednich warstw materiału przylegających do wnęk i powstałych pęknięć. Stwierdzono jednak, że w wilgotnym powietrzu odporność na zmęczenie podczas fretting-korozji jest dużo mniejsza niż w powietrzu.

Zmniejszeniu intensywności zużycia sprzyjają hydratacja tlenków i wymywanie cieczami produktów zużycia ze stref kontaktu.

Obserwacje wykazały, że zimą uszkodzenia spowodowane fretting-korozją są większe niż latem. Wpływ temperatury na utratę masy próbki można oszacować na podstawie wykresu przedstawionego na rys. 4.34. Jak widać, wzrost temperatury prowadzi do zmniejszenia zużycia spowodowanego fretting-korozją (badania przeprowadzono bez użycia materiału smarowego w suchym powietrzu).



Rys. 4.33. Wpływ względnej wilgotności powietrza na uszkodzenia powierzchni próbki stalowej w wyniku fretting-korozji (h – głębokość, r – promień wnęk): 1 – wilgotność zerowa; 2 – wilgotność 45%; 3 – wilgotność 100 %



Rys. 4.34. Zależność utraty masy próbek wykonanych ze stali niskowęglowej przy fretting-korozji w zależności od temperatury badania (ciśnienie 37 MPa; amplituda poślizgu 0,091 mm; częstotliwość 540 min^{-1}) przy trwałości badania: 1) 67 800 cykli (2,1 godz.); 2) 457 800 cykli (14,1 godz.)

4.10.3. Metody ograniczające fretting-korożję

Podobnie jak w przypadku innych rodzajów zużycia, nie ma uniwersalnych metod walki z fretting-korożją. Jeśli przyjmiemy założenie, że wzajemne mikroprzesunięcie powierzchni nie może być wykluczone ze względu na dużą sprężystość materiału, to w celu zmniejszenia fretting-korożji konieczne jest:

- zmniejszyć mikroprzesunięcie,
- zmniejszyć siłę tarcia,
- skoncentrować poślizg w środowisku pośrednim.

Zmniejszyć względne mikroprzesunięcie można poprzez nadanie detalom odpowiednich konfiguracji lub za pomocą zwiększenia siły tarcia. Jeśli chodzi o konfigurację elementów, istnieją konstrukcyjne możliwości, które pozwalają na jego realizację. Jednocześnie zmniejsza się nie tylko teoretyczny współczynnik koncentracji naprężeń, ale również poślizgu.

Siły tarcia można zwiększyć przez: zwiększenie obciążenia, zmniejszenie powierzchni styku elementów lub zwiększenie współczynnika tarcia, zwiększenie chropowatości powierzchni. Zwiększenie ciśnienia może być skuteczne jeśli ślizganie się powierzchni zostanie znacznie zmniejszone i będzie szybsze od submikroskopowego niż mikroskopowego. W przeciwnym razie wyniki będą dokładnie odwrotne od spodziewanych. Chropowatość powierzchni może mieć znaczący wpływ na współczynnik tarcia przez długi czas, jeśli jeden z elementów pary nie jest metalem. Inną metodą zwiększania siły tarcia jest nałożenie na powierzchnię elektrolitycznej warstwy miedzi, cyny, kadmu, srebra lub złota. Siła tarcia wzrasta ze względu na wzrost rzeczywistego obszaru styku współpracujących elementów. Znane jest skuteczne zmniejszenie fretting-korożji między odlewany karterem z aluminium, a obudową łożyska za pomocą cynowania. Kadmowanie wkładek, śrub i innych elementów zabezpieczających przed korożją i fretting-korożją jest bardzo rozpowszechnione w przemyśle lotniczym i samochodowym. Jednakże, przy dużych mikroprzesunięciach powłoki te ulegają fretting-korożji i szybko się zużywają.

Jeśli nie można wykluczyć drgań proponowane są sposoby zmniejszenia uszkodzeń powierzchni przez zmniejszenie siły tarcia lub przeniesienie poślizgu do środowiska pośredniego. Aby zmniejszyć jednostkowo siłę tarcia, wystarczy zredukować ciśnienie lub współczynnik tarcia. W warunkach fretting-korożji zwykle materiały smarowe nie mają wpływu na współczynnik tarcia, ponieważ warstwa graniczna podczas pracy nie odbudowuje się i szybko się niszczy. Dwusiarczany molibdenu w postaci proszku lub pasty zmniejsza uszkodzenia.

Podobnie działają hydrooksowęglany ołowiu (II) lub ich mieszanki z MoS_2 . Fosforanowana powierzchnia, obrobiona emulsją wodną smaru lub pokryta parafiną zmniejsza tarcie. Emulsja zawiera polarne substancje czynne. Siła tarcia maleje, ponieważ na porowatej powierzchni powłoki jest dobrze utrzymywana warstwa smarująca dwuskładowa, składająca się z molekuł o silnej i słabej

полярности, молекул воды в растворе материала смазного. Залеца się również pokrycie parafiną powierzchni fosforanowanych. Powłoki ołowiu i indu o niskiej odporności na przesunięcie odgrywają rolę stałych środków smarujących. Chociaż siła tarcia maleje, głównym celem powłoki jest przenoszenie procesów przesunięcia wewnątrz powłoki. Dobrą odporność na fretting-korozję uzyskuje się poprzez współpracujące pary stal – PTFE, poliamidy, polichlorek winylu. Skutecznym narzędziem mogą być gumowe podkładki.

W celu zmniejszenia uszkodzenia spowodowanego fretting-korozją można uzyskać poprzez zwiększenie twardości jednego z elementów. Wraz ze wzrostem twardości stali intensywność zużycia maleje. Ponadto tworzą się produkty zużycia mniejszych rozmiarów i ich działanie abrazyjne zmniejsza się. Hartowanie i azotowanie zwiększają odporność materiałów na fretting-korozję. Chromowanie nie zapobiega i prawdopodobnie nie redukuje uszkodzeń ze względu na dużą twardość tlenku chromu.

Literatura

1. *Поверхностная прочность материалов при трении*, Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. Под ред. Б.И. Костецкого, К.: Техника, 1976, с. 296.
2. Тененбаум М.М., *Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании*, М.М. Тененбаум, М.: Машиностроение, 1966, с. 331.
3. Хрущов М.М., *Абразивное изнашивание*, М.М. Хрущов, М.А. Бабичев, М.: Наука, 1970, с. 252.
4. Кащеев В.Н., *Процессы в зоне фрикционного контакта металлов*, В.Н. Кащеев, М.: Машиностроение, 1978, с. 213.
5. Богачев И.Н., *Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин*, И.Н. Богачев, Р.И. Минц, М.: Машиностроение, 1964, с. 144.
6. Козырев С.П., *Гидроабразивный износ металлов при кавитации*, С.П. Козырев, М.: Машиностроение, 1964, с. 140.
7. Голего Н.Л., *Схватывание в машинах и методы его устранения*, Н.Л. Голего, К.: Техника.
8. Крагельский И.В., *Трение и износ*, И.В. Крагельский, М.: Машиностроение, 1968, с. 480.
9. Гаркунов Д.Н., *Триботехника (износ и безизносность)*, Д.Н. Гаркунов, М.: Изд-во "МСХА", 2001, с. 606.
10. Уотерхауз Р.Б., Голего Н.Л., *Фреттинг-коррозия*, Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля, К.: Техника, 1974, с. 272.
11. Szczerek M., Wiśniewski M. *Tribologia i Tribotechnika*. Instytut Technologii i Eksploatacji, Radom 2000.

12. Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria Powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
13. Kula T., *Inżynieria warstwy wierzchniej*, Łódź 2000.
14. Lawrowski Z., *Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie*, PWN, Warszawa 1993.

ROZDZIAŁ V. WĘZŁY TARCIA

5.1. Łożyska toczne

Wraz z rozwojem nauki i technologii w węzłach tarcia maszyn i urządzeń zwiększa się udział łożysk tocznych [1–6]. Podany współczynnik tarcia w łożyskach tocznych wynosi 0,002–0,01. Największe łożysko toczne ma wymiary: średnica zewnętrzna ~ 14 m, wewnętrzna ~ 12 m, wysokość ~ 0,45 m i jego masa ~ 130 t.

Według kierunku obciążenia łożyska toczne podzielone są na promieniowe, oporowo-promieniowe, promieniowo-oporowe. Według postaci elementów tocznych – na toczne i rolkowe (tabl. 5.1).

Tabela 5.1. Klasyfikacja łożysk tocznych

Promieniowe		Promieniowo-oporowe		Oporowe i oporowo-promieniowe	
Kulkowe	Rolkowe	Kulkowe	Rolkowe	Kulkowe	Rolkowe
Jednorzędowe	Z krótkimi cylindrycznymi rolkami, jednorzędowe	Jednorzędowe	Z rolkami stożkowymi, jednorzędowe	Oporowe pojedyncze	Oporowe z cylindrycznymi rolkami
Takie same, z rowkiem blokującym na pierścieniu zewnętrznym	Takie same, dwurzędowe	Jednorzędowe z pierścieniami i z trój- i czteropunktowym stykiem	Takie same, z kołnieżem, oporowe na pierścieniu zewnętrznym	Trwałe, podwójne	Oporowe z rolkami stożkowymi
	Jednorzędowe sferyczne			Trwało-promieniowe z kątem kontaktu 60°	
Takie same, z kołnieżem	Dwurzędowe sferyczne	Jednorzędowe podwójne	Dwurzędowe z rolkami stożkowymi		Oporowo-promieniowe sferyczne
Takie same, z kołnierzem na zewnętrznym pierścieniu	Takie same, z podkładkami ochronnymi	Dwurzędowe	Czterorzędowe z rolkami stożkowymi	—	
Takie same, z podkładkami ochronnymi	Z rolkami igłowymi jednorzędowe				
Takie same, z uszczelnieniami	Kombinowane z rolkami igłowymi				
Takie same, sferyczne					
Dwurzędowe sferyczne					

Wartość współczynnika tarcia tocznego w dużym stopniu zależy od warunków pracy łożyska. Wraz ze wzrostem obciążenia łożyska współczynnik tarcia rośnie i maleje wraz ze zwiększaniem częstotliwości obrotów.

Całkowita oporność łożyska jest wartością złożoną, która składa się z dużej liczby komponentów trudnych do przeanalizowania. Dlatego szacowana (obliczeniowa) definicja wartości momentu tarcia jest dość skomplikowana i przybliżona.

Do smarowania łożysk tocznych wykorzystuje się ciekłe środki smarne (mineralne i syntetyczne) oraz smary plastyczne (konsystentne).

Ilość środka smarnego wprowadzonego do łożyska zależy od obciążenia i prędkości obrotowej, która określa ilość ciepła w styku. Aby doprowadzić ciekły środek smarny do łożyska stosuje się następujące główne układy: kąpiele olejowe, kropelkową smarownicę, knotową, rozpylanie, smarowanie cyrkulacyjne, mgłę olejową.

W przypadku, gdy działanie węzłów maszynowych nie jest możliwe przy użyciu płynnych i plastycznych środków smarujących, stosuje się łożyska samosmarujące. Takimi warunkami są obecność próżni, promieniowanie, wysokie i niskie temperatury, gazowe i agresywne środowiska.

Od wczesnych lat 70. są prowadzone systematyczne badania na temat wykorzystania ceramiki w łożyskach tocznych, zwłaszcza w wysokich temperaturach, w środowiskach korozyjnych, turbinach gazowych i silnikach.

Jedną z głównych charakterystyk łożysk tocznych jest ich trwałość, która zależy od wielu czynników. Można ją poprawnie ocenić określając stan utraty nośności łożyska – częściową lub całkowitą utratę zdolności łożyska do pracy. Przejawieniem stanu utraty nośności łożyska, co utrudnia jego dalszą eksploatację jest zwiększona wibracja, hałas, niedopuszczalny wzrost luzów, zwiększone nagrzewanie elementów, nieprawidłowy wysoki moment tarcia (w szczególnym przypadku – zatarcie).

Głównymi przyczynami powstania tych zjawisk są:

- zmęczenia kontaktowe elementów;
- zużycie powierzchni kontaktujących się elementów;
- utrata zdolności roboczych środka smarującego;
- zużycie i niszczenie separatora;
- zużycie uszczelnień;
- odkształcenie plastyczne i kruche niszczenie elementów.

5.2. Łożyska ślizgowe

Łożyska ślizgowe to łożyska, w których występuje tarcie wału podczas ślizgania. Są zdolne do pracy w szerokim zakresie temperatur, ciche, odporne na działanie czynników chemicznych, odporne na drgania i mają stosunkowo wysoką trwałość przy dużych prędkościach. Do zmniejszenia tarcia łożysk

ślizgowych stosuje się środki smarne. W zależności od parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w łożyskach ślizgowych można stosować rodzaje smarowania hydrodynamicznego lub gazowo-dynamicznego. Dlatego łożyska ślizgowe są dzielone na łożyska, które pracują w warunkach gazowo-dynamicznego, hydrodynamicznego, pół-cieczowego i granicznego smarowania.

Średnica czopów łożysk ślizgowych z systemem smarowania hydraulicznego może przekraczać 2 m, łożyska oporowe hydroturbin mogą mieć średnicę ponad 5 m. Częstotliwość obrotów łożysk ślizgowych sięga nawet 10^6 obr./min, a przy wysokich i dużych prędkościach ślizgania przeważa turbulentny tryb smarowania.

Najważniejszą charakterystyką łożysk ślizgowych jest ich zdolność do wytrzymywania dużych obciążeń i odporność na zużycie elementów nośnych łożysk. Największą uwagę zwraca się na te dwa czynniki. Jednakże, w wyniku zużycia się powierzchni ciernych zmieniają się rozmiary powierzchni kontaktujących. Zmniejsza się średnica wału i wzrasta średnica wewnętrzna wkładki, co prowadzi do wzrostu obciążeń dynamicznych, zwiększenia strat tarcia i strata zdolności łożysk do pracy.

Głównymi materiałami do produkcji łożysk tocznych są babbity, stopy antyfrakcyjne na osnowie miedzi (brązu, mosiądzu) i aluminium, żeliwa szare, materiały metaloceramiczne, grafit, drewno, tworzywa sztuczne, materiały proszkowe i inne.

Intensywność zużycia łożysk ślizgowych w procesie eksploatacji jest nierównomierna i najwyższa podczas startu, zatrzymania, dotarcia i ruchu zwrotno-postępowego. Głównymi czynnikami wpływającymi na intensywność zużycia są: obciążenie właściwe, prędkość poślizgu, temperatura, warunki ruchu, środowisko, właściwości fizyczne i mechaniczne materiałów pary trące. Te ostatnie odgrywają decydującą rolę w zdolności do pracy łożysk ślizgowych.

W branży transportowej, rolniczej, lotniczo-kosmicznej, tekstylnej, budowy dróg i innych rodzajach budowy maszyn szerokie zastosowanie znalazły łożyska ślizgowe przegubowe (ŁŚP), które według wykonania konstrukcyjnego są podzielone na cylindryczne i kuliste. Wydajność i trwałość ŁŚP są głównie określone przez odporność na zużycie elementów par trących.

5.3. Przekładnie zębate

Głównym składnikiem napędu mechanicznego są przekładnie zębate, które są najbardziej rozpowszechnione w budowie maszyn. Niezawodność, trwałość, wydajność, ekonomiczność i wymiary wielu mechanizmów i maszyn zależą od ich jakości. Sprawność przekładni zębatych jest stabilna w szerokim zakresie prędkości (od bliskich zera do 200 m/s), wysokich obciążeniach kontaktowych (aż do $5 \cdot 10^3$ MPa), do temperatur 350°C .

Analiza uszkodzonych zębów wykazała, że na ich powierzchniach roboczych w zależności od zewnętrznych czynników mechanicznych mogą rozwijać się

różnego rodzaju zużycia, takie jak: zmęczeniowe, ściernie, jeden lub inny rodzaj zużycia są: obciążenie kontaktowe; temperatura w miejscu styku; grubość warstwy smarującej; właściwości fizyczne, mechaniczne i chemiczne materiałów konstrukcyjnych i smarnych; skład środowiska zewnętrznego; kinematyki kontaktu zębatego itp.

Jednym z objawów początku niszczenia zębów jest powstawanie na powierzchni zagłębień, wrzodów, muszli-pittingu. Wykruszenie zaczyna się zazwyczaj w pobliżu linii bieguna na powierzchniach zębów, w obszarze realizacji maksymalnych sił tarcia. Uszkodzenia zmęczeniowe embrionalne zachodzą tak na powierzchni tarcia jak i pod powierzchnią, w obszarze działania maksymalnych naprężeń stycznych. Odporność na wykruszanie zależy od kierunku działania sił tarcia – na powierzchniach, które kontaktują się w pierwszej kolejności (głowy zębów) wykruszanie obserwuje się później lub w ogóle nie powstaje. Pozytywny wpływ na odporność wykruszania ma zwiększenie grubości warstwy smarującej.

W silnie obciążonych, wolnoobrotowych przekładniach zębatych, ze względu na duże siły normalne i styczne w pobliżu bieguna, profil jest zniekształcony w wyniku odkształcenia plastycznego. Na zębach kół napędowych tworzą się rowki w kierunku sił tarcia od linii bieguna, a rowki są uformowane na kołach napędzanych w kierunku linii bieguna. Materiał smarny w tym przypadku ujawnia również jego właściwości, zmieniając intensywność tych procesów.

Oznaką szepiania się powierzchni roboczych zębów jest formowanie na ich powierzchni głębokich rowków, wyrwań, rys, narośli, nadtopień. Niestabilny proces pracy zazwyczaj spowodowany jest intensywnym (katastroficznym) zużyciem, które może szybko doprowadzić do całkowitego wycofania elementu z eksploatacji. Zwiększa to współczynnik tarcia (dla przekładni o małej i średniej prędkości), rośnie temperatura, nasilają się wibroakustyczne i dynamiczne procesy.

Nieodzownym warunkiem występującym przy szepianiu jest niszczenie warstwy smarującej w miejscu kontaktu zębów. Zniszczenie warstwy smarującej może pojawić się w wyniku odkształcenia plastycznego w miejscu kontaktu, wysokich temperatur chropowatych powierzchni przy ich kontaktowym oddziaływaniu, które występują nawet w stanie zimnym, a także wskutek straty właściwości smaru w podwyższonych temperaturach lub w wyniku straty możliwości do pracy materiału smarującego wskutek braku jego przepływu w miejsce oddziaływania kontaktowego. „Zimne” szepianie występuje, gdy obwodowa prędkość jest mniejsza niż 3 m/s, a „na gorąco” – przy coraz wyższych prędkościach pracy urządzenia.

Intensywność i kinetyka rozwoju procesu szepiania zależy zarówno od czynników zewnętrznych obciążenia, temperatury, fizyczno-chemicznych właściwości, właściwości ośrodka smarującego jak i rodzaju materiałów kontaktujących i ich właściwości. Proces szepiania zależy od szybkości tworzenia się i niszczenia warstw ochronnych, od kinematyki kontaktu

(walcowania, ślizgania, walcowania ze ślizganiem). Intensywność zużycia powierzchni (poruszającej się wolniej) jest zawsze znacząco wyższa niż uprzedniej, co wyjaśnia się, różnicą naprężeń temperaturowych warstw przypowierzchniowych części maszyn.

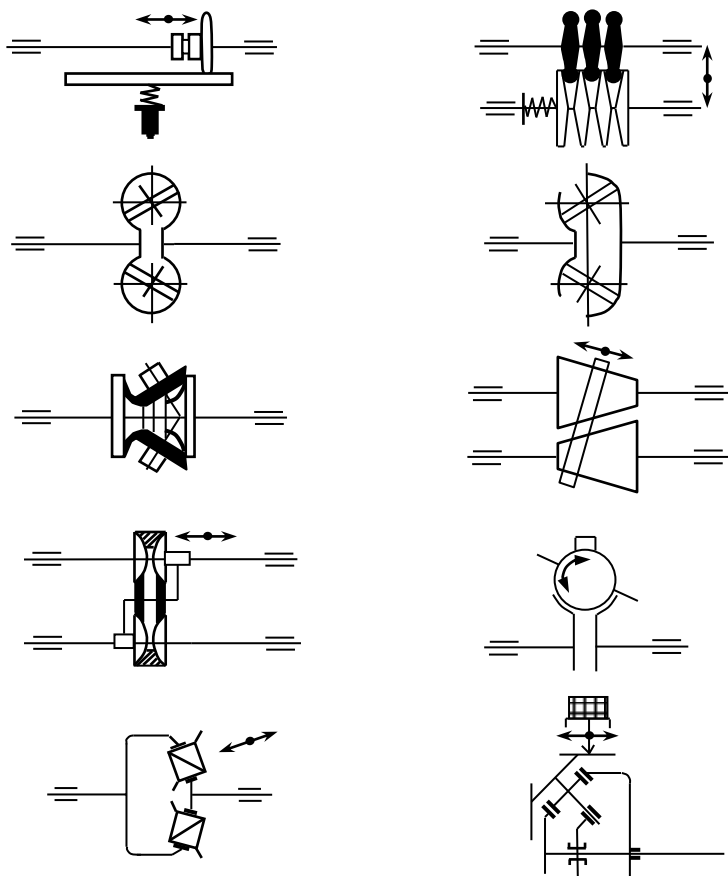
5.4. Przekładnie bezstopniowe cierne

Regulatory szybkości to urządzenia, w których przy stałej prędkości obrotowej wału napędowego częstotliwość obrotowa może być zmieniana w sposób ciągły bez skoków w określonych zakresach. Budowa frykcyjnych przekładni regulowanych (wariatorów) wyróżnia się nie tylko prostotą ich konstrukcji, ale również tym, że transformacja w nich momentu obrotowego, w przeciwieństwie do hydrodynamicznych, hydrostatycznych i elektromechanicznych wariatorów prędkości odbywa się bez konwersji jednego rodzaju energii na inny, co daje możliwość tworzenia transmisji o wysokiej (do 0,96 i 0,98) sprawności. Charakterystyczną cechą regulowanych (bezstopniowych) przekładni tarciovych jest przemieszczenie stykających się powierzchni hercowskich ciał głównego kontaktu tarciovego.

Wariatory dzielą się na dwie grupy: z początkowym kontaktem elementów roboczych wzdłuż linii i w punkcie. Schematy kinematyczne niektórych wariantów, które mają zastosowanie w przemyśle przedstawiono na rys. 5.1.

Używane są wariatory, które pracują zarówno bez smaru, jak i w smarze. W wariatorach, które pracują bez smaru współczynnik tarcia jest stosunkowo wysoki, a w związku z tym jest mniejsze obciążenie na wały i opory ale ślizganie powoduje znaczne uwalnianie ciepła. Przenoszona moc jest ograniczona do 15 kW.

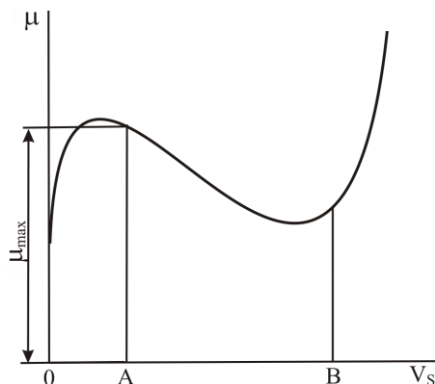
Coraz powszechniej stosowane są wariatory pracujące w kąpieli smarowej. Mimo, że mają niższy współczynnik tarcia i wskutek tego znacznie wyższą kompresję, mogą być one zaprojektowane na znacznie większą moc, niż w przypadku pracy bez smaru, z dużym kontaktem w punkcie i wysoką wydajnością.



Rys. 5.1. Schemat kinematyczny różnych wariatorów

Ogólny charakter zależności współczynnika tarcia ślizgowego przy walcowaniu od prędkości pokazuje krzywa przedstawiona na rys. 5.2.

Na krzywej zaznaczone są dwa charakterystyczne punkty A i B. Punkt A charakteryzuje się ślizganiem, co odpowiada pojawieniu się maksymalnego współczynnika tarcia. W punkcie B występuje katastroficzne zniszczenie warstewki smaru i powierzchni kontaktujących się. Wskutek tego punkt ten określa ograniczenie nośności kontaktu w przypadku pojawienia się zadzioru.



Rys. 5.2. Zależność współczynnika tarcia od prędkości poślizgu w wariatorach

5.5. Połączenia zębate (wielowypustowe)

Połączenia zębate (wielowypustowe) są szeroko stosowane w obrabiarkach, samochodach, traktorach, samolotach, statkach, generatorach turbin i układach napędowych. W elektrowniach morskich mufki zębate przekazują moment obrotowy, kompensują błędy technologiczne w instalacji oraz deformację platform nośnych i fundamentów i deformacje termiczne części.

Według kształtu przekroju poprzecznego, profilowe połączenia zębate mogą być z prostymi, ewolwentnymi i trójkątnymi zębami. W konstrukcyjnym wykonaniu mufki zębate są pojedyncze i podwójne. Stosuje się również połączenia zębate z czołowymi, śrubowymi i stożkowymi zębami.

Cechą tych połączeń jest ich wysoka nośność, niezawodność i technologiczność. Mają dobre masowo gabarytowe charakterystyki, wygodne do montażu i demontażu.

Główną przyczyną utraty zdolności do pracy połączeń zębatych jest zużycie powierzchni roboczych zębów, zwłaszcza przy biegu jałowym, jak również w przypadku ruchu rewersowego. Intensywność zużycia zębów jest proporcjonalna do jednostkowej pracy sił tarcia i zależy od właściwości fizyczno-mechanicznych, chemicznych i smarujących materiałów, grubości warstwy smaru, obecności cząstek ściernych, zanieczyszczeń, warunków temperaturowych w strefie kontaktu.

Należy zauważyć, że w procesie pracy przekładni zębatych mogą powstawać zatarcia i zadziory, ponieważ powierzchnie ściskają się, odwracalnie poślizgują się. Z trudnego dostępu materiału smarnego do strefy kontaktu wynika niedostateczne smarowanie. W ogólnym przypadku połączeń zębatych (wielowypustowych) głównymi rodzajami zużycia są: ściernie, mechano-chemiczne, fretting-korozyjne i adhezyjne (zatarcie).

5.6. Przekładnia śruba-nakrętka

Przekładnia śruba-nakrętka służy do przekształcania ruchu obrotowego w posuwisty. Ze względu na prostą konstrukcję, kompaktowość, ekonomię, dużą nośność, stała się powszechnie stosowana w różnych dziedzinach inżynierii mechanicznej oraz w produkcji elementów maszyn i urządzeń.

Techniczne zalety przekładni obejmują możliwość uzyskania dużych obciążeń przy wysokiej dokładności przemieszczeń, stabilnym przełożeniem, powolnymi ruchami zapewniającymi samohamowanie i zwiększoną nośnością. Maszyny podnośnikowe i transportowe (podnośniki, popychacze, mechanizmy regulacyjne wysunięcie dźwignika), obrabiarki (mechanizmy dostarczania narzędzi roboczych, ruchów precyzyjnych), przyrządy pomiarowe, roboty i inne wyroby zawierają przekładnie śruba-nakrętka. Główną wadą jest niska sprawność, intensywność zużycia materiałów głównie zwojów nakrętki, która zależy od dużej liczby czynników – fizycznych, chemicznych i mechanicznych. Decydującym czynnikiem zdolności do pracy ślizgowej przekładni śrubowej są warunki temperaturowe pracy tego węzła. Wraz ze wzrostem temperatury następuje zmiana odkształcenia smaru, skrawanie mikronierówności, powstawanie powierzchni juwenilnych (czystych atomowo) – ognisk powstawania mikrozadziórów. Intensywność zużycia pary śruba-nakrętka zależy od naprężeń jednostkowych.

Do mało przebadanych czynników wpływających na wydajność pary śruba-nakrętka należą: wibracje, typ i rodzaj środka smarnego i jego degradacja, obecność cząstek ściernych, szybkość poślizgu, wahania temperatury itp.

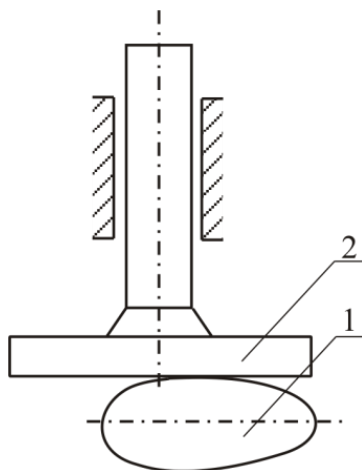
Aby zapewnić wysoką wydajność pary śruba-nakrętka stosuje się kulki, w których tarcie ślizgowe jest zastępowane tarciem tocznym. W tym przypadku przekładnia składa się ze śruby, nakrętki i kulek umieszczonych pomiędzy zwojami śruby i nakrętki. Uzyskuje się mechanizm o wysokiej sprawności ($\eta = 0,9$), a współczynnik tarcia tocznego wynosi $\mu = 0,005\text{--}0,2$. Możliwe jest wyeliminowanie luzów osiowych i promieniowych w przekładni poprawiając dokładność maszyn, urządzeń pomiarowych, robotów, mechanizmów kontroli podwozia, stabilizatorów w samolotach itp.

5.7. Mechanizmy krzywkowe

Do więcej skomplikowanych par kinematycznych odnoszą się kombinacje mobilne dwóch łączy, oddziaływanie których odbywa się wzdłuż linii lub w punkcie. Takie pary kinematyczne są szeroko stosowane w mechanizmach krzywkowych o różnych zastosowaniach.

Od charakterystyk części pary kinematycznej zależy praca całego mechanizmu krzywkowego. Za pomocą profilu krzywki 1 (rys. 5.3) zadajemy dokładną lokalizację zadanej części 2, która zależy od zużycia profilu wiodących i wiodącego elementów mechanizmu krzywkowego. Profil wiodącej krzywki jest

zazwyczaj krzywoliniowy, profil wiodącej krzywki (części) – płaski lub zakrzywiony. Niezawodna praca mechanizmu krzywkowego jest możliwa tylko przy zachowaniu wymaganej wielkości elementów interaktywnych, czyli wyznaczonych wielkościach zużycia powierzchni roboczych, jak również przy rozłożeniu zużycia na obwodzie profilu krzywki.



Rys. 5.3. Podstawowy schemat pary krzywkowej

Intensywność zużycia elementów par krzywkowych zależy od wielu czynników, w tym: charakterystyk mechanicznych oddziaływujących ciał stałych, mikrotopografii ich powierzchni, geometrycznego kształtu profilu krzywki i wielkości obciążeń.

Głównymi przyczynami niszczenia powierzchniowego w parach krzywkowych są zadziory i zniszczenia zmęczeniowe, zużycie ściernie i korozyjno-mechaniczne. Na przykład, powierzchnie tarcia par krzywkowych mechanizmu gazo-dystrybucyjnego silników spalinowych pracują przy wysokich ciśnieniach, prędkościach i temperaturach, co prowadzi do niszczenia warstwy smarującej i zatarcia powierzchni.

Mechanizmy krzywkowe szybkochochodzące (KMSz) znacznie różnią się dynamicznym obciążeniem powierzchni tarcia, które są powszechnie stosowane w silnikach spalinowych. W wyniku zewnętrznego i tarcowego rozgrzewania, działania naprężeń stycznych, zużycia się warstwy smarowej, co jest warunkiem koniecznym do prawidłowego działania w KMSz, mechanizm może zniszczyć się. W takim przypadku dochodzi do zatarcia i powstają zadziory powierzchni kontaktujących. Należy zauważyć, że w KMSz zatarcie może wystąpić przy niskiej i wysokiej częstotliwości obrotów wału krzywkowego.

5.8. Elementy grupy cylindrowo-tłokowe

W warunkach ruchu posuwisto-zwrotnego występują warunki najbardziej niekorzystnej pracy elementów w miejscach rewersu (ruchu posuwistego-zwrotnego), to znaczy w obszarach z minimalną prędkością ruchu tłoka, a zwłaszcza w komorze sprężania, gdzie występuje maksymalne ciśnienie oraz najwyższa temperatura na powierzchni tarcia cylindra i pierścieni. Grubość warstwy smarnej zmienia się wraz z ruchem tłoka. Podczas wtryskiwania występuje rozcieńczenie warstwy smarującej na lustrze cylindra za pomocą mieszaniny roboczej. Warstwa jest wydmuchiwana spod pierwszych pierścieni w czasie suwu (ruchu) sprężania i wypala się przy zapaleniu. Prowadzi to do praktycznego wyeliminowania (zniszczenia) warstwy smarującej lub utraty smerności.

W zakresie małych prędkości tłoka wraz ze wzrostem liczby obrotów współczynnik tarcia i zużycia zmniejsza się, potem wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wału wzrasta; gdy wzrasta obciążenie, zużycie rośnie. Na zużycie znacząco wpływają produkty spalania, zwłaszcza związki wanadu i siarki, które przyspieszają rozwój procesów zmęczenia korozyjnego, wytworzenia sadzy na głowicach i rowkach tłoków. Pogarsza to wymianę ciepła, przyczynia się do gromadzenia cząstek stałych w środku smarnym. Drugim źródłem cząstek ściernych jest powietrze. Zużycie sprzężonych powierzchni w cylindrze zwiększa się wprostproporcjonalnie do zanieczyszczenia powietrza.

Cylindry są wytwarzane głównie z żelaza, stali 41Cr4, 35CrMo4-100, 38CrMoAl-4-10-10, 38CrWV4-4-10 i innych. Bloki i tuleje cylindrowe wykonane są z odlewów ze stopu aluminium AL2 AL5, AL6, AL7, AL10W. Pierścienie tłokowe produkowane są ze zmodyfikowanych i szarych żeliw, stali, brązu, spiekanych metali ceramicznych i materiałów niemetalicznych.

Aby zwiększyć trwałość elementów stosuje się powierzchniowe hartowanie prądami wysokiej częstotliwości, azotowanie i chromowanie.

5.9. Urządzenia uszczelniające

Urządzenie uszczelniające jest zestawem elementów, które tworzą konstrukcję dla zabezpieczenia uszczelnienia. Głównym wskaźnikiem skuteczności urządzeń uszczelniających jest zdolność uszczelniania (stopień uszczelnienia) charakteryzujący się ilością przepływającej substancji przez to urządzenie (wyciek). Wymóg dotyczący stopnia szczelności urządzenia jest ustalany na podstawie warunków zapewniających niezbędną niezawodność i trwałość określonej maszyny (urządzenia).

Urządzenia uszczelniające węzły tarcia maszyn są podzielone na ruchome i nieruchome (stacjonarne); kontaktowe i bezkontaktowe; stabilne, zmieniające formę i te, które nie mają własnego kształtu; gazowe, ciekłe i mieszane-heterogeniczne.

Trwałość któregokolwiek urządzenia uszczelniającego zależy od wielu czynników o różnym charakterze, które często są ze sobą powiązane. Na przykład w przypadku wzmocnionych kauczuków decydujące znaczenie ma 30 różnych czynników. Zdolność do pracy urządzenia, które charakteryzuje się stratami, zależy od tych czynników i temperatury, których poziom zależy od ich warunków pracy. Temperatura jest ważnym czynnikiem determinującym efekty tarcia w obszarze styku.

Głównymi sposobami zwiększenia odporności na ścieranie materiałów jest obecność dodatniego gradientu właściwości mechanicznych i minimalna powierzchnia styku w strefie kontaktu. Sztywność i gładkość powierzchni metalu stałego przyczynia się do minimalnego wprowadzenia interaktywnych powierzchni.

Literatura

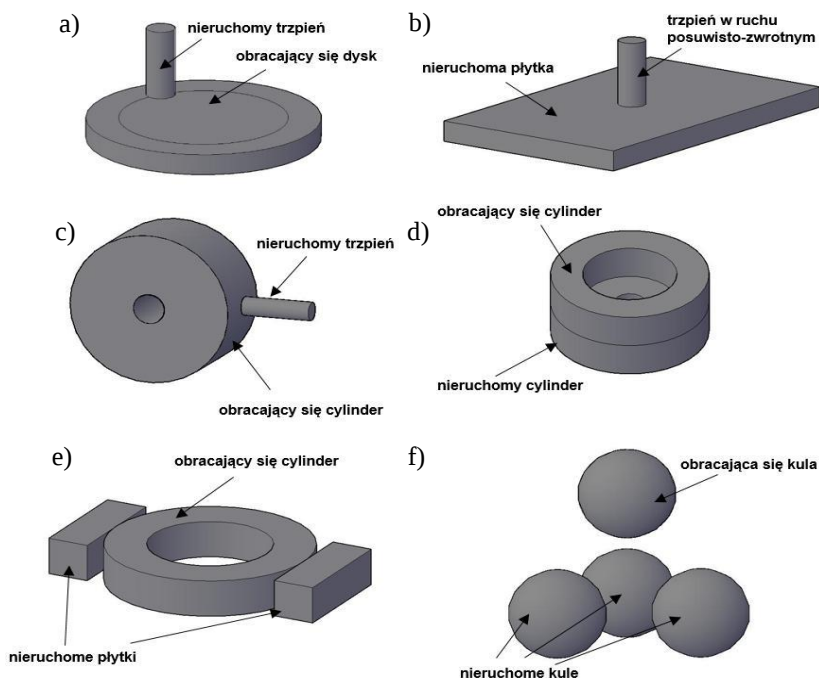
1. *Поверхностная прочность материалов при трении*, Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. Под ред. Б.И. Костецкого, К.: Техника, 1976, с. 296.
2. Szczerek M., Wiśniewski M. *Tribologia i Tribotechnika*. Inst. Tech. i Eksploatacji, Radom 2000.
3. Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa 2002.
4. Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria Powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
5. Kula T., *Inżynieria warstwy wierzchniej*, Łódź 2000.
6. Lawrowski Z., *Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie*, PWN, Warszawa 1993.

ROZDZIAŁ VI. URZĄDZENIA STOSOWANE DO BADANIA PROCESU TARCIA I ZUŻYCIA ORAZ OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

6.1. Klasyczne urządzenia do badania właściwości tribologicznych

Modelowanie procesów tarcia i zużycia jest przeprowadzane na urządzeniach ciernych. W literaturze są one nazywane tribometrami lub tribotesterami.

W większości przypadków urządzenia te zaprojektowane są do modelowania procesów tarcia i zużycia (zużycia ściernego, tarcia ślizgowego, tarcia ruchowego, etc.). Badanie odporności na ścieranie materiałów z których zbudowane są skojarzenia tracę, w warunkach przemysłowych wiąże się najczęściej z dużymi trudnościami i kosztami. Dlatego też szeroko stosowane są eksperymenty modelowe. Przeprowadza się je na maszynach (stanowiskach) tribologicznych różniących się konstrukcją oraz sposobem działania [1–9]. Przykładowe styki tarciove pokazano na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Schemat styków tarciowych stosowanych w badaniach tarcia ślizgowego i zużycia: a) trzpień-tarcza, b) trzpień-płaszczyzna, c) trzpień-cylinder, d) płaszczyzna-płaszczyzna e) płaszczyzna dociskowa-obracający się cylinder, f) cztery kule

Maszyny do badań tribologicznych powinno dobierać się tak, aby jak najdokładniej odtwarzały warunki panujące w rzeczywistym skojarzeniu trącym. Najczęściej stosowane są stanowiska ze skojarzeniem trącym trzpień-tarcza lub kula-tarcza. Typowymi mierzonymi wielkościami są zużycie masowe, liniowe lub objętościowe, siła tarcia, współczynnik tarcia oraz temperatura strefy styku.

Metody badań laboratoryjnych i stacjonarnych powinny zapewniać względnie wysoką powtarzalność wyników oceny odporności na ścieranie materiałów. Głównymi parametrami szacowania trwałości materiałów są: zużycie liniowe, zużycie wagowe, zużycie objętościowe, intensywność zużycia, wytrzymałość względna. W warunkach tarcia granicznego, mieszanego i elastohydrodynamicznego zdolność do smarowania jest szacowana grubością ścianek smarowych i innymi czynnikami.

W warunkach produkcyjnych zużycie elementów określane jest metodą wagową, pomiarów geometrycznych, robieniem odcisków części i elementów trących, metodą wstawek i za pomocą wyciętych obszarów.

Maszyny do badania materiałów w warunkach zużycia abrazyjnego są podzielone na sześć grup:

1. maszyny do badania materiałów przy zużyciu ścierniwem stałym;
2. maszyny i urządzenia do badania na nierównomiernie zamocowanych cząstkach ściernych;
3. urządzenia do badań w obecności cząstek ściernych w kontakcie powierzchni ciernych;
4. urządzenia do badań w warunkach zużycia hydroabrazyjnego;
5. urządzenia i instalacje do badań materiałów na zużycie gazo-abrazyjne; maszyny i urządzenia do badania materiałów przy zużyciu uderzeniowo-abrazyjnym.

Badanie materiałów w warunkach ruchu posuwisto-zwrotnego odbywa się na urządzeniu 77MT-71. Schemat kontaktu to płaszczyzna-indentor trzpieniowy. Urządzenie wyposażone jest w mechanizm korbowy, który przemieszcza suwak z badaną próbką. Laboratoryjna maszyna firmy „Boeing” jest przeznaczona do badania materiałów łożysk lotniczych i smarów. Testy porównawcze i kwalifikacyjne środków smarnych przeprowadza się na instalacji laboratoryjnej "Faleks".

Badania materiałów na tarcie i zużycie w szerokim zakresie obciążeń i prędkości poślizgu przeprowadza się na laboratoryjnej maszynie tarcia UMT-1. Cechą charakterystyczną maszyny jest możliwość prowadzenia badań z najróżniejszymi skojarzeniami kontaktowymi: próbka trzpieniowa-dysk; czopy pierścieni; wałek-wkładka.

Na urządzeniu "Timken-Ajshinger" testuje się materiały w wysokich temperaturach w środowisku smarnym. Schemat kontaktu: pryzmat-obwód cylindra.

Wiele badań materiałów odpornych na tarcie ślizgowe, tarcie toczne i tarcie z ślizganiem przeprowadza się na maszynie laboratoryjnej SMC-2. Schemat kontaktu podczas tarcia ślizgowego to wał-wkładka. Podczas tarcia tocznego stosowane są cylindryczne powierzchnie dysków. Testy w warunkach tocznych lub ślizgowych są przeprowadzane na maszynie MI-1M (maszyna tarcia Amslera).

Do badań zużycia ciernego stosowane są zmodernizowane wersje maszyny Amslera pracujące w układzie trzpień-tarcza. W stanowisku opracowanym przez Pashechko M. i Czernieca M. podstawowe parametry charakteryzujące węzeł tarcia były następujące:

- rodzaj styku – rozłożony, płaski (urządzenie przystosowane do badań procesu tarcia ślizgowego w układzie trzpień-tarcza),
- skojarzenie pary trącej – trzpień-tarcza realizowane przez obracającą się tarczę i dociskaną do niej próbkę,
- rodzaj ruchu – tarcie ślizgowe,
- obciążenie styku modeluje współpracę pary trącej dla nacisków jednostkowych 3, 7, 10, 15 MPa,
- tarcie suche, w środku smarnym lub korozyjnym.

Głowicę badawczą zmodernizowanego tribotestera przedstawiono na rys. 6.2.



Rys. 6.2. Widok głowicy badawczej zmodernizowanego tribotestera

Badania procesów tarcia i zużycia według skojarzenia wał-wkładka są prowadzone na stanowiskach laboratoryjnych „OLMEN” NIDY, MTG, LTS i M22-M. Do badań właściwości tribologicznych materiałów w próżni służą maszyny MTG, MTV, MTVV, I-47-B-2.

Badania w warunkach tarcia czołowego prowadzone są na urządzeniach laboratoryjnych MFT-1, I-47-B-2, AE-5, MT-66, IM-58 i maszynie tarcia Arczarda. Laboratoryjna maszyna testowa MPI-1 służy do badania zużycia tworzyw sztucznych (schemat kontaktu: czoło cylindra-peryferyjny cylindryczny bęben). Testy materiałów ciernych hamulców samochodowych przeprowadza się na maszynie laboratoryjnej opracowanej przez A.J. Wilsona, U.G. Belforda i G.T. Bauchera. Schemat kontaktu: czopy dysków.

Badania charakterystyk tribotechnicznych uszczelnień czołowych w warunkach wysokich temperatur prowadzi się na maszynie laboratoryjnej Bettelewekowskiego Instytutu Memoriałowego. Schemat kontaktu: próbki trzpieniowe-czoło dysku. Badawcza maszyna laboratoryjna IM-58 służy do badań charakterystyk tribotechnicznych materiałów ciernych w warunkach testów dynamicznych. Schemat kontaktu: czoła pierścieni.

Do przeprowadzenia testów dynamicznych dysków tarczowych hydrotransmisji wykorzystuje się maszynę SAE-1; dyski tarczowe mufek sprzęgła samochodów – maszyna GMR. Badania materiałów ciernych w warunkach tarcia stacjonarnego bez smarowania i przy podtrzymywaniu niezmienniej pracy tarcia (momentu tarcia) są przeprowadzane na maszynie FA-T.

Wyznaczanie współczynnika tarcia statycznego i badania ruchu skokowego podczas tarcia prowadzone są na maszynie laboratoryjnej MPA-1, której roboczymi elementami są suwak z płytą z badanego materiału, przesuwający się krok po kroku po prowadnicach, napęd wibracyjno-ochronny i płytka z badanymi próbkami.

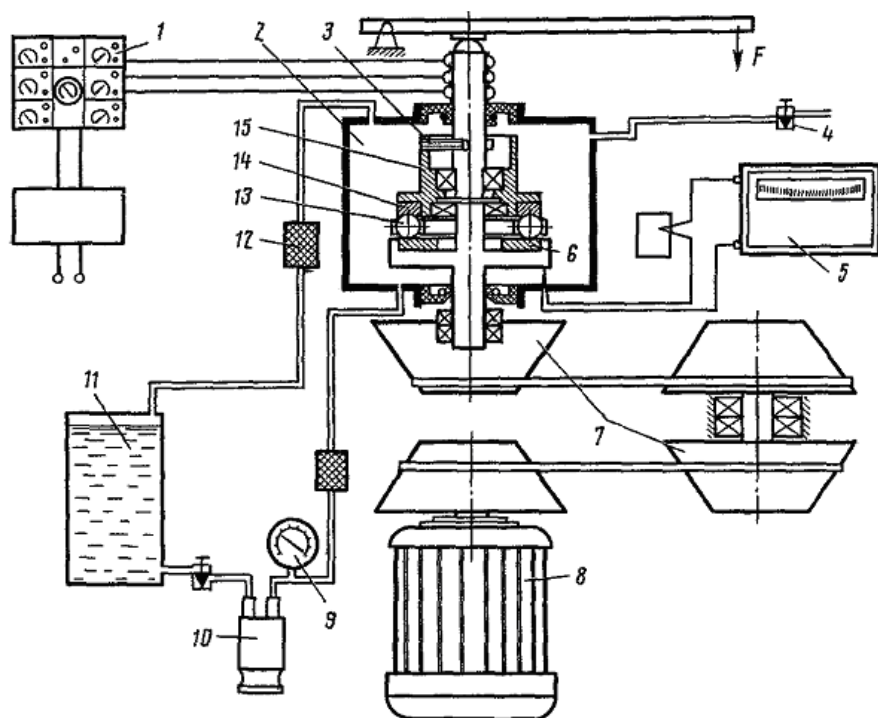
Badania charakterystyk tribotechnicznych dysków frykcyjnych wykonywane są na uniwersalnych urządzeniach laboratoryjnych:

1. typu inercyjnego – MIFI-1;
2. typu dwumasowego – MIFI-2.

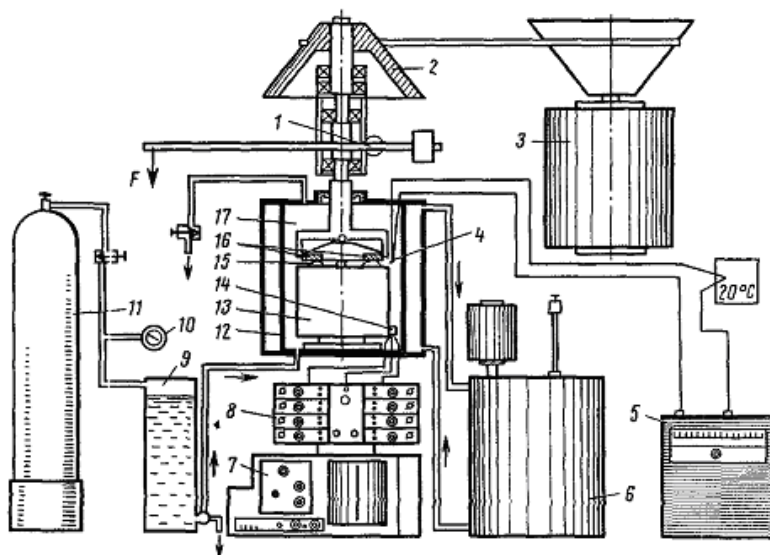
Do oceny laboratoryjno-doświadczalnej, właściwości tribotechnicznych i kontroli jakości materiałów antyfrykcyjnych oraz powłok, stosowane jest uniwersalne urządzenie M-22PV. Zbudowane jest ono na zasadzie modułowej. Podstawą jest uniwersalny węzeł tarcia, który zapewnia badania zarówno jak po promieniowych (wał-wkład, wał-płaszczyzna), jak czołowych (pierścień-pierścień, pierścień-próbki trzpieniowe) powierzchniach, imitację zazębienia przekładni, pomiar czterokulowy bezpośrednio podczas testu momentu tarcia i całkowitego liniowego zużycia próbek. Napęd umożliwia zarówno przemieszczenie obrotowe jak i posuwisto-zwrotne o regulowanej prędkości lub amplitudzie. Przewidziane jest programowalne obciążenie próbki. Podczas badań rejestrowane są: prędkość obrotowa wału, droga tarcia, obciążenie,

temperatura, całkowite zużycie liniowe pary trącej, moment tarcia i bieżąca wartość współczynnika tarcia. Możliwość pomiarów przy podwyższonych parametrach pozwala prowadzenie przyspieszonych badań materiałów.

Badania właściwości przeciwzużyciowych paliw lotniczych odbywają się w nowoczesnym laboratorium tribologii pod kierunkiem członka NANU O.F. Aksionowa (m. Kijów, Państwowy Awiacyjny Uniwersytet), które odtwarzają warunki tarcia tocznego (rys. 6.3) i tarcia ślizgowego (rys. 6.4).

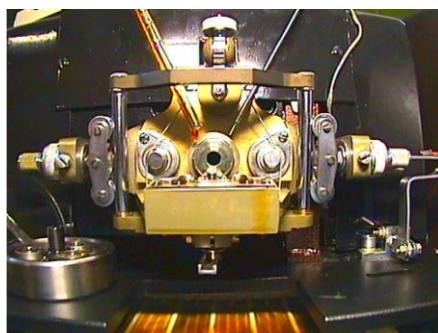


Rys. 6.3. Schemat urządzenia do badania właściwości przeciwzużyciowych paliw lotniczych przy tarcu tocznym: 1 – wzmacniacz; 2 – komora z paliwem; 3 – belka sensoryczna; 4 – zawór; 5 – mikroamperomierz; 6 – próbka; 7 – koła pasowe; 8 – silnik elektryczny; 9 – manometr; 10 – pompa; 11 – zbiornik paliwa; 12 – filtr; 13 – separator; 14 – łożyska; 15 – głowica



Rys. 6.4. Główny schemat urządzenia do badania właściwości przeciwzużyciowych paliw lotniczych przy tarcu ślizgowym: 1 – urządzenie obciążające układ badawczy; 2 – koło pasowe; 3 – silnik elektryczny; 4 – termopara; 5 – mikroamperomierz; 6 – termostat; 7 – oscyloskop; 8 – wzmacniacz; 9 – zbiornik paliwa; 10 – manometr; 11 – zbiornik z izotopem; 12 – radiator; 13 – ruchomy blok; 14 – belka z tensoczułnikami; 15 – kółka; 16 – próbka; 17 – komora paliwa

Do prowadzenia krótkotrwałych badań laboratoryjnych opracowany został skomputeryzowany układ pomiarowy (rys. 6.5), który składa się z czterech modułów przygotowania próbki dla prowadzenia badań modelowych; modułu badań tribotechnicznych; modułu 3D do kontroli powierzchni trących i pomiarów objętościowych zużycia oraz modułu przetwarzania danych z bazą danych. Zaprojektowany układ testowo-pomiarowy może być szeroko stosowany w przemyśle naftowym i budowie maszyn.



Rys. 6.5. Moduł do badań tribotechnicznych

Układ ten pozwala:

- określać porównawczą skuteczność produktów handlowych według właściwości antyfrykcyjnych i przeciwzużyciowych;
- określać właściwości tribotechniczne smarów i dodatków z uwzględnieniem warunków pracy maszyny;
- opracowywać wysokoefektywne środki smarne i nowe dodatki, optymalizować ich skład i dodatki specjalnego przeznaczenia;
- eksperymentalnie zidentyfikować oleje przemysłowe i nowe dodatki do nich wedługich głównych właściwości – przeciwzużyciowych i przeciwtarciowych;
- wybierać najbardziej skuteczne kompozycje materiałów konstrukcyjnych tribosystemów;
- określać wymagania dotyczące warunków ich obróbki cieplno-chemicznej i jakości powierzchni tarcia;
- opracowywać nowe o wysokiej efektywności dodatki lub pakiety dodatków do materiałów smarujących.

Główne parametry techniczne układu testowo-pomiarowego:

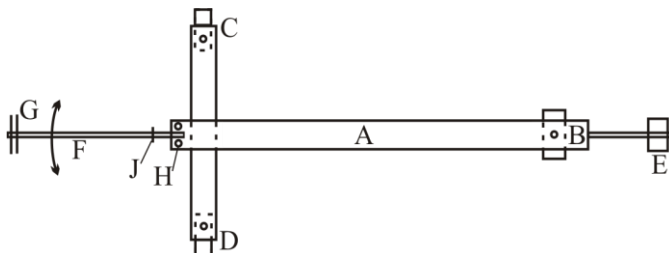
- tribosystem bazowy: rolka o średnicy 33 mm, szerokość cylindra 3 mm;
- zakres regulowanej i podtrzymywanej prędkości liniowej w kontakcie od 0,1 do 1,2 m/s;
- maksymalne obciążenie osiowe 500 N;
- smarowanie: zanurzeniowe lub cyrkulacyjne za pomocą pompy perystaltycznej.

Istnieje wielka różnorodność urządzeń do badania materiałów w warunkach korozji spowodowanej frettingiem. Z jednej strony, modelowanie procesów korozji spowodowanej frettingiem w warunkach laboratoryjnych powinno być zbliżone do warunków tego typu zużycia powierzchni w rzeczywistych konstrukcjach. Z drugiej strony wybrana metoda powinna umożliwiać przeprowadzenie porównania otrzymanych wyników z wynikami badań z innych prac. W związku ze specyfikacją warunków powstania korozji spowodowanej frettingiem dla urządzeń testowych stawiane są następujące wymagania: mocowania próbek w odpowiednich urządzeniach zaciskowych (brak luzów), sztywność na skręcanie i mała deformacja urządzenia, możliwość ruchu wibroślizgowego o regulowanej częstotliwości i amplitudzie, obecność kontrolowanej siły normalnej w celu stworzenia niezbędnego nacisku kontaktowego, możliwość kontrolowania składu i wilgotności środowiska gazowego.

Ze względu na charakter kontaktu powierzchni, urządzenia stosowane do badania korozji spowodowanej frettingiem mogą być podzielone na dwie kategorie:

- urządzenia, w których realizowany jest kontakt punktowy lub liniowy (kulka-płaszczyzna, cylinder-płaszczyzna);
- urządzenia do wytworzenia wibracji w kontakcie powierzchni płaskich.

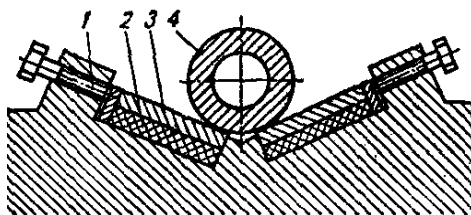
W pierwszym badaniu pilotażowym Tomlinson (1927 r.) wykorzystał podporę kulkową, która naciska na płaszczyznę stalowej powierzchni. Drugie urządzenie Tomlinsona (rys.6.6) zostało zaprojektowane w celu zbadania dolnej granicy amplitudy ruchu względnego, poniżej której nie występują uszkodzenia.



Rys. 6.6. Urządzenie do badania frettingu zaprojektowane przez Tomlinsona (widok z góry)

A.R. Vason dla badania procesów fretting-korozji zaprojektował urządzenie, w której oddziaływanie kontaktowe odbywa się według schematu kulka-płaszczyzna.

I.S. Holiday i V. Hirstskon skonstruowali oryginalne urządzenie (rys. 6.7), za pomocą którego badano intensywność frettingu-korozji w zależności od częstotliwości, amplitudy, ciśnienia, ilości cykli. Mierzono także współczynnik tarcia. Próbkami były stalowy pusty cylinder 4 i dwie stalowe płyty 3, które przez wkładki 2 mocowane są pod kątem 30° do kształtu U-podobnej podstawki za pomocą śruby 1. Fretting-korozja odbywała się pomiędzy nieruchomymi płytami a powierzchnią cylindra, który wykonywał ruch obrotowo-oscylacyjny. Amplituda drgań wynosiła 0,002–0,42 mm.



Rys. 6.7. Schemat kontaktu próbek w urządzeniu Holideja i Hirsta

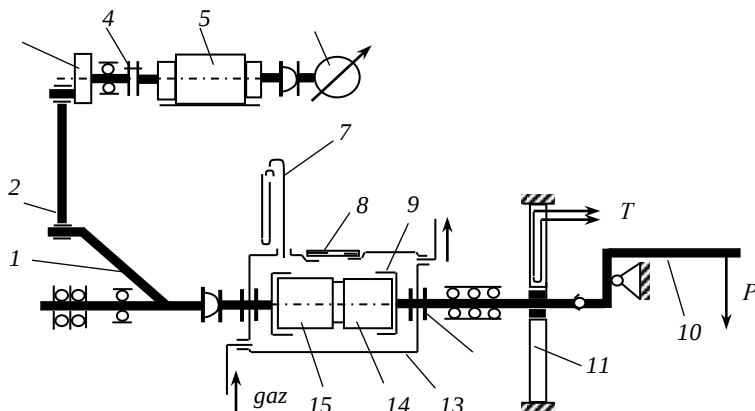
G.A. Tomlinson i inni opracowali i badali urządzenia, powodujące wahania obrotowe obejm pierścieniopodobnych, które kontaktują po powierzchni płaskich. Ta zasada została wykorzystana przez innych badaczy, zwłaszcza G.G. Uligema i jego współpracowników.

W aparacie G.G. Uliga i jego współpracowników, który bazuje się na tej samej zasadzie, nie wykorzystano obejm, a jednorodne cylindryczne próbki z powierzchniami pierścieniowymi.

Urządzenie I.M. Fenga i G.G. Uliga umożliwia jednocześnie testowanie dwóch par próbek, które kontaktują się po kołowym występie.

Ostrowski M.S. i Andriiowski V.M. opracowali metodykę badania frettingu, która umożliwia otrzymywanie (zachodzących w procesie rozwoju frettingu) informacji o zmianach właściwości fizyko-mechanicznych warstw powierzchniowych według rejestrowanej siły tarcia.

W urządzeniu przedstawionym na rys. 6.8 zastosowano tarcie czołowe współpracujących próbek wykonanych w postaci czopów (próbka ruchoma) i cylindra (próbka stała).



Rys. 6.8. Podstawowy schemat urządzenia MFK-1:

- 1 – poziomy korbowód; 2 – pionowy korbowód; 3 – regulowany mimośród;
- 4 – sprzęgło; 5 – silnik elektryczny; 6 – licznik ilości cykli; 7 – manometr; 8 – okienko przeglądowe; 9 – tulejka zaciskowa; 10 – urządzenie obciążające; 11 – belka z tensometrami; 12 – uszczelnienia; 13 – komora; 14 – próbka nieruchoma; 15 – próbka ruchoma

Powierzchnia kontaktu wynosi $0,5 \text{ cm}^2$. Urządzenie umożliwia testowanie przy amplitudzie poślizgu $0,001\text{--}2,5 \text{ mm}$; częstotliwości drgań $10\text{--}30 \text{ Hz}$, obciążeniu jednostkowemu do 2000 kg/cm^2 .

Urządzenie laboratoryjne testowe MFK-1 jest zbudowane z poziomej ramy, wykonanej w formie stołu, na której zamontowane są dwa oddzielne mechanizmy. To rozwiązanie konstrukcyjne pozwala wykonywać jednocześnie eksperymenty na dwóch parach próbek. Częstotliwość oscylacji jest mierzona elektrycznym tachometrem i strobatahometrem. Amplitudę poślizgu mierzy się za pomocą mikroskopu MBS-2 i stroboskopu typu ST-5. Urządzenie umożliwia badanie w komorze gazowej, którą można łatwo zdemontować.

Specjalną grupę stanowią urządzenia przeznaczone do badania wpływu fretting-korozji na wytrzymałość zmęczeniową (zmęczenie frettingowe). W tym przypadku możliwe są dwa podejścia. W pierwszym, badania mogą być wykonane dwustopniowo. Na początku na próbkach formuje się uszkodzenia od

fretting-korozji, a następnie prowadzi testy zmęczeniowe. W drugim możliwe jest połączenie testów, gdy obciążeniu zmęczeniowemu towarzyszy jednocześnie występowanie fretting-korozji wskutek poślizgu pomiędzy powierzchniami kontaktującymi przy deformacji próbki ze zmiennym znakiem.

Jednym z patologicznych rodzajów zużycia jest zużycie erozyjne. Powstaje ono w wyniku wpływu na materiał wyładowań elektrycznych lub sił mechanicznych. Erozja mechaniczna jest spowodowana działaniem na materiał gazów, cieczy lub fazy stałej, ich mieszanin (erozja gazoabrazyjna, erozja hydrościerna). Rodzajem erozji chemicznej jest kawitacja. W zależności od rodzaju erozji używane są różne urządzenia laboratoryjne i stanowiska testowe [10–15].

6.2. Ocena właściwości tribologicznych oraz stanu powierzchni stali narzędziowej do pracy na gorąco 55NiCrMoV6

Stal 55NiCrMoV6 wykorzystywana jest najczęściej do wytwarzania narzędzi pracujących w procesie obróbki plastycznej (matryce, wkładki do matryc, matryce do pras mechanicznych i hydraulicznych, części i elementy mało obciążonych pras do wyciskania rur i prętów (głównie metali lekkich i miedzi)). Stosowana jest także na silnie nagrzewające się noże do cięcia na gorąco. W zastosowaniach przemysłowych w celu poprawy właściwości mechanicznych i tribologicznych stal 55NiCrMoV6 poddaje się ulepszaniu cieplnemu lub azotowaniu. Skład chemiczny stali 55NiCrMoV6 przedstawiono w tabeli 2. Próbkę wycinano z pręta o średnicy 30 mm dostarczonego w stanie zmiękczonym (normalizowanym) (stan dostawy) o twardości 11 HRC. Następnie obrabiano je poprzez toczenie. Próbkę poddano ulepszaniu cieplnemu zgodnie z wytycznymi dla tego gatunku stali. Nagrzewano je do temperatury austenitycznej 845°C, wytrzymywano w tej temperaturze a następnie chłodzono w oleju. Po hartowaniu zastosowano odpuszczanie w temperaturze 310°C. Po ulepszaniu cieplnym powierzchnie czołowe próbek szlifowano na szlifierce do płaszczyzn. Twardość mierzono aparatem Rockwella. Przed pomiarami aparat sprawdzono ze wzorcem twardości 59.8 HRC.

Tab. 6.1. Skład chemiczny stali 55NiCrMoV6

C	Mn	Si	P	S	Cr
0,5–0,6	0,5–0,8	0,15–0,4	MAX 0,03	MAX 0,03	0,5–0,8
Ni	Mo	W	V	Co	Cu
1,4–1,8	0,15–0,25	MAX 0,03	MAX 0,01	MAX 0,03	MAX 0,03

Testy tribologiczne zrealizowano na tribotesterze wysokotemperaturowym THT 1000 Anton Parr (Austria), rys. 6.9 a. Jest to nowoczesne stanowisko do badań tribologicznych umożliwiające badania w wysokich temperaturach pracy pary tarczej. Badania prowadzono według norm ASTM G133. Wykorzystano skojarzenie tarcie typu ball-on-disc, rys. 6.9 b. Próbkę ze stali 55NiCrMoV6 wykonano w kształcie dysku (disc) o średnicy 20 mm i wysokości 6 mm., Jako przeciwpróbek (ball) użyto kulek o średnicy 6 mm wykonanych ze stali 100Cr6. Podczas testów tribologicznych zastosowano obciążenia 5 N oraz 20 N. Badania prowadzono z prędkością poślizgu węzła tarcia 0.15 m/s na promieniu 4 mm. Całkowitą drogę tarcia przyjęto 200 m. W związku z tym, że stal 55NiCrMoV6 wykorzystywana jest na elementy pracujące w podwyższonych temperaturach, badania tribologiczne przeprowadzono w temperaturze pokojowej (ok. 26°C) oraz w temperaturze podwyższonej (150°C). Temperaturę mierzono termoparą na wysokości 2 mm od powierzchni tarcia (rzeczywista temperatura styku oraz próbki mogła osiągnąć wyższe wartości). Podczas próby rejestrowano zmianę współczynnika tarcia, siłę tarcia oraz temperaturę. Częstotliwość zbierania danych wynosiła 10 Hz.

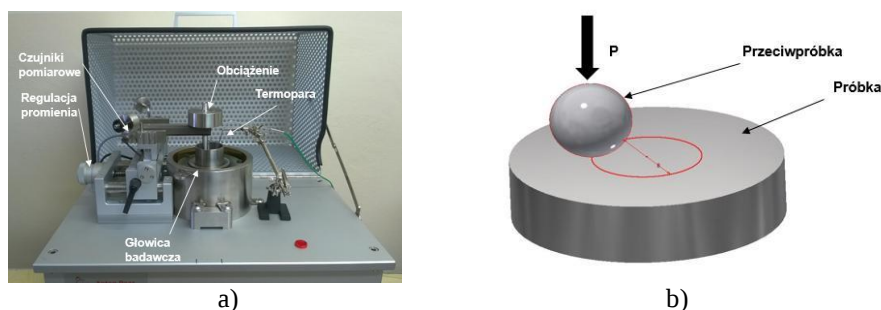


Fig. 6.9. Widok stanowiska do badań tribologicznych – tribotester Anton Parr THT1000 (a), skojarzenie pary tarczej ball on disc (b)

Jako porównawczą miarę zużycia, która uwzględniałaby obciążenie oraz drogę tarcia obliczono współczynnik zużycia dla pary tarczej według ASTM G133 wykorzystując równanie (1).

$$w_d = \frac{V_f}{F_n \times l} \quad (1)$$

gdzie: w_d – współczynnik zużycia, V_f – zużycie objętościowe, F_n – siła obciążająca, l – droga testu (dystans).

Miarą zużycia próbki był ubytek objętościowy powstały, jako ślad wytarcia w wyniku współpracy próbki z przeciwpróbką. W tym celu za pomocą profilometru stykowego Surtronic 3+ po obwodzie próbki (w 10 miejscach) mierzono pole profilu prostopadle do śladów wytarcia próbki. Pomiaru wykonywano na długości odcinka pomiarowego 4 mm. Odcinek elementarny chropowatości 0.8 mm. Zużycie objętościowe wyznaczono, jako iloczyn średniej

wartości pola wytarcia próbki i obwodu koła śladu wytarcia powstałego w teście ball-on-disc stosując równanie (2).

$$V_f = A \times L \quad (2)$$

gdzie: V_f – zużycie objętościowe, A – średnia wartość pola wytarcia próbki, L – obwód tarcia.

Zużycie przeciwpróbki obliczano mierząc średnice wytarcia kulki za pomocą mikroskopu metalograficznego i stosując równania (3) i (4).

$$V = \frac{\pi h^2}{3} (3r - h) \quad (3)$$

$$h = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (4)$$

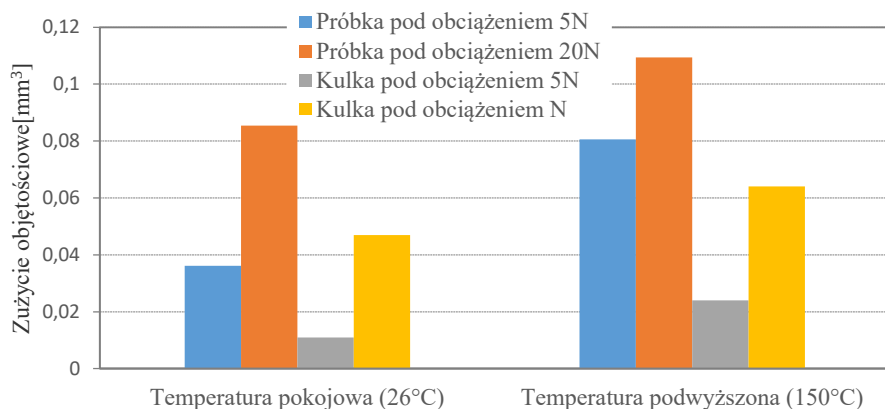
gdzie: r – promień kulki (3 mm), h – wysokość wytarcia kulki, d – średnica wytarcia kulki.

Po przeprowadzonych badaniach tribologicznych dokonano oceny powierzchni wytarcia. W celu dokonania analizy otrzymanych wyników powierzchnie próbek i przeciwpróbek badano również przed testami tribologicznymi. W pierwszym etapie powierzchnie poddano badaniom parametrów chropowatości, które mierzono przed i po testach tribologicznych wykorzystując profilografometr Surtronic 3+. Następnie przeprowadzono badania mikroskopowe. Obserwacje mikrostruktury próbek wykonano przy różnych powiększeniach za pomocą mikroskopu metalograficznego Nikon Eclipse 100. Do pomiaru topografii oraz oceny mechanizmu zużycia powierzchni próbek i przeciwpróbek wykorzystano optyczne urządzenie pomiarowe 3D InfiniteFocus G5 firmy Alicona.

Zastosowanie ulepszania cieplnego stali 55NiCrMoV6 z przyjętymi parametrami, spowodowało wzrost twardości o 18–19% w stosunku do twardości wejściowej. Po hartowaniu średnia twardość próbek wynosiła 58,5 HRC a po odpuszczaniu 57 HRC. Przeprowadzone badania na profilometrze Surtronic 3+ (zgodnie z normą PN ISO 4288) wykazały, że po szlifowaniu chropowatość powierzchni czołowych była zbliżona dla wszystkich próbek i wynosiła $R_a = 0,59 \mu\text{m}$.

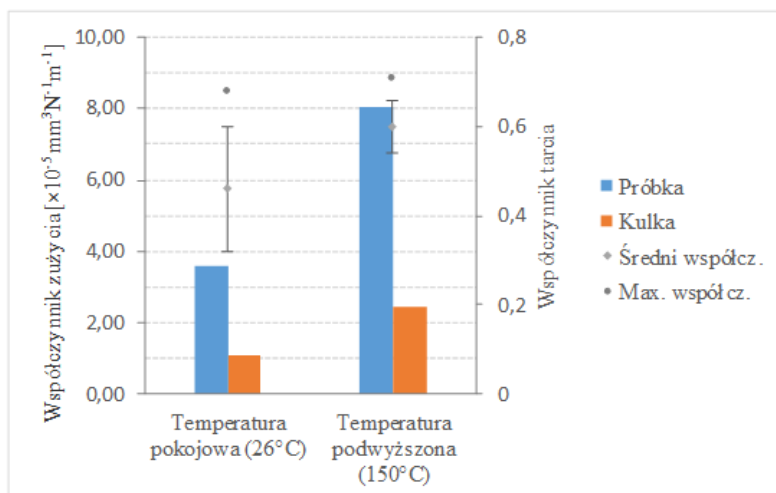
Przebieg procesu zużycia materiałów zależy od wielu czynników takich jak materiał pary trącej, temperatura styku, chropowatość, twardość powierzchni, obciążenie i prędkość poślizgu. W pierwszym etapie badań określono zużycie objętościowe stosując równanie (2). Zużycie objętościowe dla próbek przy obciążeniu 5 N w temperaturze pokojowej wyniosło $0,036 \text{ mm}^3$. Natomiast w podwyższonej wzrosło do $0,081 \text{ mm}^3$. Podobną zależność zaobserwowano dla próbek po tarcu przy obciążeniu 20 N. W temperaturze pokojowej wyniosło $0,085 \text{ mm}^3$. W podwyższonej temperaturze wzrosło osiągając wartość $0,109 \text{ mm}^3$. Zużycie masowe dla przeciwpróbek przy obciążeniu 5 N

w temperaturze pokojowej wyniosło $0,0011 \text{ mm}^3$. Natomiast w podwyższonej wzrosło do $0,024 \text{ mm}^3$. Podobną zależność zaobserwowano dla przeciwpróbek po tarcu przy obciążeniu 20 N. W temperaturze pokojowej wyniosło $0,047 \text{ mm}^3$. W podwyższonej temperaturze wzrosło osiągając wartość $0,064 \text{ mm}^3$. Analizując otrzymane wyniki zużycia objętościowego próbek i przeciwpróbek można zauważyć, że zużycie osiąga większe wartości zarówno przy wzroście obciążenia jak i przy wzroście temperatury co potwierdza istotny wpływ temperatury pracy skojarzenia trącego na jego właściwości tribologiczne. Wzrost nacisków jednostkowych w obszarze styku tarcowego powoduje zwiększenie intensywności usuwania materiału. Maksymalne naprężenia Herza przy obciążeniu 5 N wyniosły 1,099 GPa. Natomiast przy obciążeniu 20 N – 1,741 GPa. Na rys. 6.10 przedstawiono zużycie objętościowe próbek i przeciwpróbek w temperaturze pokojowej (ok. 26°C) oraz w podwyższonej (150°C) dla dwóch obciążeń 5 i 20 N.

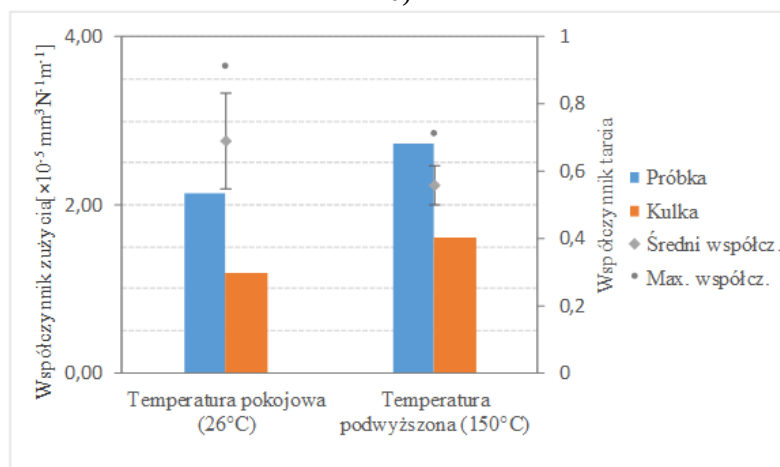


Rys. 6.10. Zużycie objętościowe

Istotnymi czynnikami uwzględnianymi podczas obliczania i charakteryzowania wielkości zużycia jest obciążenie i droga tarcia. Wykorzystując porównawczą miarę zużycia, która uwzględnia zarówno obciążenie jak i drogę tarcia obliczono współczynnik zużycia dla pary trącej według równania 1. Współczynnik zużycia oraz współczynnik tarcia dla testu tribologicznego przy obciążeniu 5 N przedstawiono na rys. 6.11 a.



a)



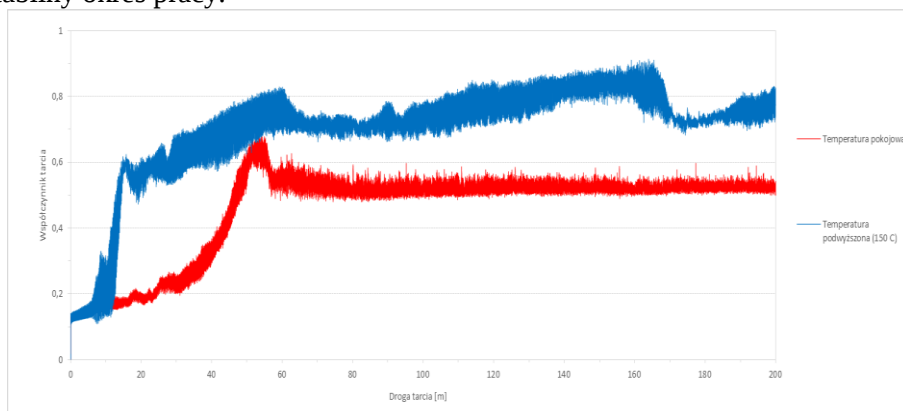
b)

Rys. 6.11. Współczynnik zużycia oraz tarcia: przy obciążeniu 5 N (a), przy obciążeniu 20 N (b)

Analizując wartości współczynnika zużycia można zauważyć, wzrost jego wartości zarówno dla próbki i przeciwpróbki w podwyższonej temperaturze. Dla próbki w temperaturze pokojowej współczynnik zużycia wyniósł $3,62 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$. W podwyższonej temperaturze wyraźnie wzrósł i jest równy $8,06 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Dla przeciwpróbki w temperaturze pokojowej współczynnik zużycia osiągnął wartość $1,08 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$. W podwyższonej temperaturze wzrósł do wartości $2,42 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Średni współczynnik tarcia w czasie trwania testów tribologicznych przy obciążeniu 5 N wzrósł wraz ze wzrostem temperatury. W temperaturze pokojowej średni współczynnik tarcia

wyniósł 0,46 a maksymalny 0,68. Natomiast w podwyższonej temperaturze średni współczynnik tarcia wzrósł i osiągnął wartość 0,6. Z kolei zarejestrowany maksymalny współczynnik tarcia w podwyższonej temperaturze wyniósł 0,71. Współczynnik zużycia oraz współczynnik tarcia dla testu tribologicznego przy obciążeniu 20 N przedstawia rys. 6.11 b. Analizując wartości współczynnika zużycia można zauważyć, podobnie jak przy obciążeniu 5 N, wzrost jego wartości zarówno dla próbki i przeciwpróbki w podwyższonej temperaturze. Dla próbki w temperaturze pokojowej współczynnik zużycia wyniósł $2,14 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$. W podwyższonej temperaturze wzrósł i jest równy $2,74 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$. Dla przeciwpróbki w temperaturze pokojowej współczynnik zużycia wyniósł $1,19 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$. W podwyższonej temperaturze wzrósł i osiągnął wartość $1,60 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$. Średni współczynnik tarcia w czasie trwania testów tribologicznych przy obciążeniu 20 N nieznacznie spadł wraz ze wzrostem temperatury. W temperaturze pokojowej średni współczynnik tarcia wyniósł 0,69 a maksymalny 0,91. Natomiast w podwyższonej temperaturze średni współczynnik tarcia wyniósł 0,56. Z kolei zarejestrowany maksymalny współczynnik tarcia w podwyższonej temperaturze wyniósł 0,71.

W trakcie prowadzonych testów tribologicznych rejestrowano zmiany współczynnika tarcia. Na rys. 6.12 przedstawiono zmiany przy obciążeniu 5 N zarejestrowanego na drodze 200 m. Jak widać na rys. 6.12 okres docierania styku trwał na drodze ok. 60 m a następnie można zaobserwować bardziej stabilny okres pracy.



Rys. 6.12. Współczynnik tarcia przy obciążeniu 5 N

Na rys. 6.13 przedstawiono zmiany współczynnika tarcia przy obciążeniu 20 N zarejestrowanego na drodze 200 m. Jak widać na rys. 6.13 okres docierania przy obciążeniu 20 N następował szybciej na drodze ok. 15 m a następnie można zaobserwować stabilny okres pracy. Podobne zależności można obserwować analizując wyniki zarejestrowanej siły tarcia.

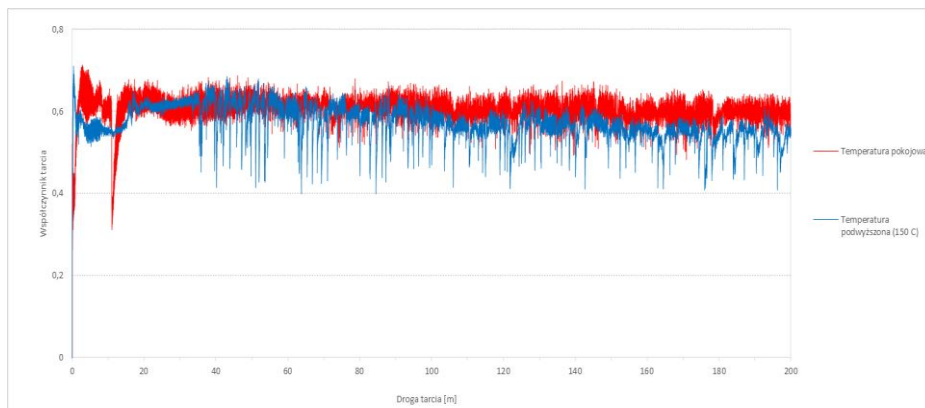
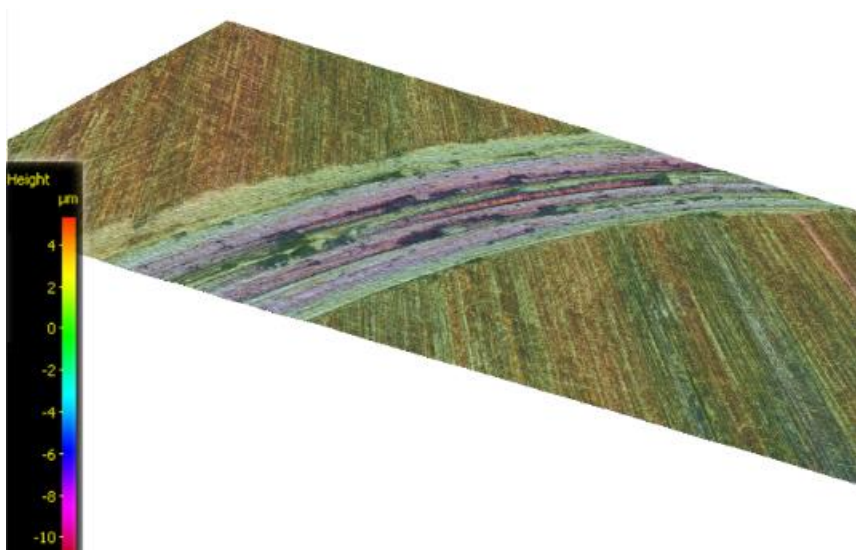
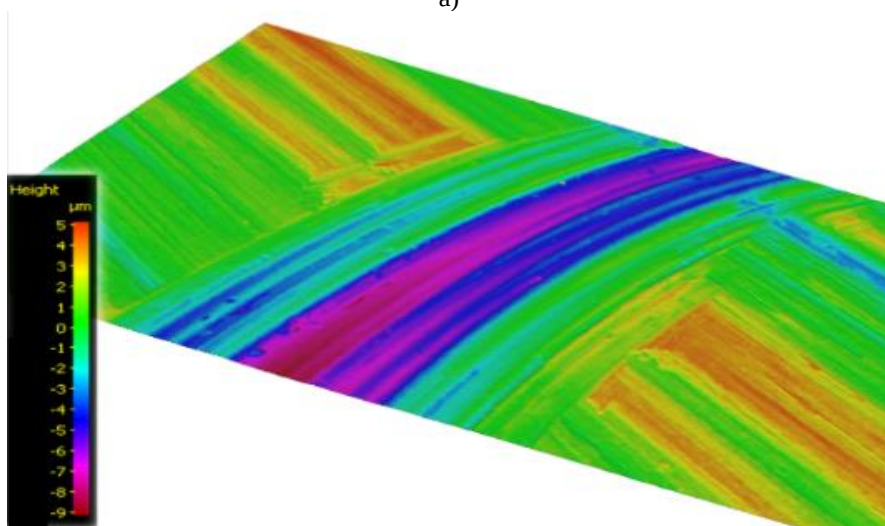


Fig. 6.13. Współczynnik tarcia przy obciążeniu 20 N

Następnie powierzchnie tarcia poddano obserwacjom mikroskopowym w celu identyfikacji zachodzących zjawisk oraz mechanizmu zużycia. Widok topografii powierzchni po tarcu przedstawia rys. 6.14. Obserwacje mikroskopowe powierzchni ujawniły charakterystyczne mechanizmy ich zużycia. Można zaobserwować nierówności powierzchni z wyraźnymi śladami mikroskrawań. Po tarcu na powierzchni zaobserwowano powstające luźne cząstki pełniące rolę ścierniwa i intensyfikujące mikroskrawanie powierzchni, co wyraźnie widać na rys. 6.14 a i b. Podobne zjawiska zachodzą w warunkach rzeczywistych, w jakich współpracują układy tribologiczne. Zużycie jest często powiązane z luźnymi cząsteczkami ściernymi znajdującymi się pomiędzy dwoma trącymi powierzchniami. W rezultacie dwie powierzchnie i znajdujące się pomiędzy nimi cząsteczki tworzą układ trzech ciał. Twarde cząsteczki tlenków, jakie mogą w większej ilości powstawać w podwyższonych temperaturach mogą także prowadzić do przyspieszenia zużycia metali poprzez zużycie mechaniczne lub ścierno-mechaniczne. Potwierdzają to wyniki zużycia objętościowego otrzymanego podczas testów.



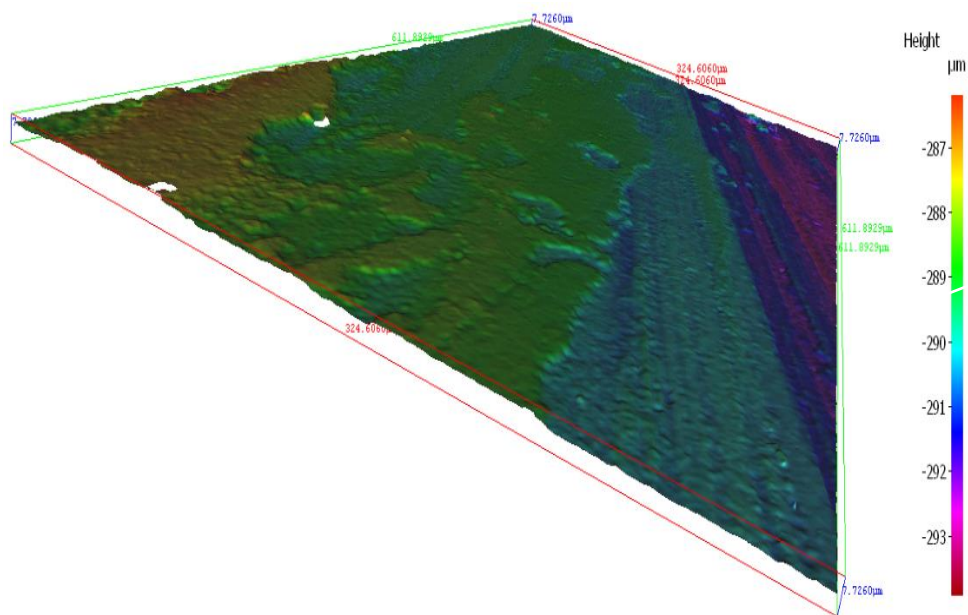
a)



b)

Rys. 6.14. Widok topografii powierzchni próbki: pow. x100 (a), pow. x200 (b)

Z kolei plastyczne deformacje warstwy wierzchniej trącego metalu często doprowadzają do przemieszczania się materiału na drugie ciało. Analizując profile powierzchni oraz jego topografię zaobserwowano miejscowe przenoszenie materiału na próbkę rys. 6.15. Intensyfikuje je wzrost obciążenia i temperatury podczas badań tribologicznych.



Rys. 6.15. Widok topografii śladu tarcia powierzchni próbki pow. x500

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że podczas testów tribologicznych przeważał ścierno-mechaniczny charakter zużycia z dużą ilością luźnych cząstek ścierniwa.

W zależności od rodzaju urządzenia, zastosowanego skojarzenia trącego, warunków pracy, metodyki i oczekiwanych rezultatów opracowanie wyników badań tribologicznych może się różnić [16].

Literatura

1. M. Szczerek, M. Wiśniewski. *Tribologia i Tribotechnika*,. Inst. Tech. i Eksploatacji, Radom 2000.
2. Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa 2002.
3. Stand F., Adamczyk J., Cieślak K., Gubata J., Maciejny A., *Metaloznawstwo*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
4. Lawrowski Z., *Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie*, PWN, Warszawa 1993.
5. Worosznin L., Lachowicz L., *Borirowanije stali*. M. Metałurgija, 1978, c. 239.
6. Łachtin Yu., *Metałlowedenije i termiczieskaja obrabotka metałłow*, M. Metałurgija, 1983, c. 360.
7. Gudremon Э., *Specialnyje stali*, M., Gosudarstwenyje izdatelstwo literat. po czornoj i cwet. metałurgii, 1960, w 2 tomach.

8. Czerniec M., Paszeczko M., Niewczas A., *Metody prognozowania ta podwyższczenia znosostijkości tribotechnicznych system kowzannia*. T. 3, Ewtektyczni znosostijki pokryttia systemy Fe-Mn-C-B, Drohobycz, Koło 2001, cc. 236.
9. Samsonow G., Priadko I., Priadko L., *Konfiguracionnaja model wieszczestwa*, Naukowa Dumka, Kijew 1971.
10. Paszeczko M., Lenik K., Paszeczko L., *Podwyższczenia dowgowiczności detalej maszyn metodom plazmowego napławlennia z wykorzystanniam ewtektycznych splawiw systemy Fe-Mn-C-B*, Wisnyk Dwigatelestrojenija № 1-2002, c. 127–131.
11. Lenik K., *Odporne na zużycie eutektyczne pokrycia układu Fe-Mn-C-B*, Lwów, Jewroswit, 2004, cc. 288.
12. Lenik K., Paszeczko M., Paszeczko L., *Znosostijki ewtektyczni kompozycijni pokryttia systemy Fe-Mn-C-B-Si*. Problems of Tribology, № 3, 2001, c. 61–64.
13. Paszeczko M., Duriagina Z.A., *Samoorganizacija powerchni pry znoszuwanni ta koroziji*. (Ogliad), Struktura, Znoszuwannia, Rujnuwannia. Metaloznawstwo ta obrobka metaliw, MOM Nr 3, 2002, c. 26–35.
14. Paszeczko M., Popławskij O., *Wpływ powerchnewoji segregacji atomiw na tribologiczni włastywosti splawiw*, Problems of Tribology, Nr 4/2001, s. 115–125.
15. Pashechko M., Dziedzic K., Barszcz M., *Study of the structure and properties of wear-resistant eutectic Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr coatings*, Powder metallurgy and metal ceramics, no 7–8, vol. 52, 2013, p. 469–476.
16. Dziedzic K., Józwik J.B., Barszcz M., *The assessment of tribological properties and the condition of the surface of tool steel for hot work 55NiCrMoV6 subjected to the process of friction*, Manufacturing Technology: Journal for Science, Research and Production, T. 16, no. 1, 2016, p. 69–76.