

Spis treści

Od Autora	13
1. WPROWADZENIE	15
1.1. Definicje niektórych pojęć procesów tarcia i zużycia	19
1.2. Współczesne kierunki rozwoju nauki o tarcu, smarowaniu i zużywaniu maszyn	22
2. PODSTAWY BUDOWY CIAŁ STAŁYCH I PŁYNÓW	25
2.1. Wiązania między atomami.....	32
2.1.1. Wiązanie kowalencyjne	32
2.1.2. Wiązanie jonowe.....	36
2.1.3. Wiązanie koordynacyjne.....	39
2.1.4. Wiązanie wodorowe.....	40
2.1.5. Wiązanie metaliczne	41
2.2. Siły międzycząsteczkowe	50
2.2.1. Siły dyspersyjne	51
2.2.2. Siły konformacyjne	52
2.2.3. Siły orientacyjne	54
2.2.4. Siły indukcyjne	56
2.3. Siły spójności	59
3. WARSTWA WIERZCHNIA	65
3.1. Warstwa wierzchnia elementów maszyn	65
3.2. Modele budowy warstwy wierzchniej	71
3.3. Parametry opisujące stan warstwy wierzchniej	77
3.4. Powierzchnia ciał stałych i płynów.....	80
3.5. Własności geometryczne powierzchni ciał stałych.....	86
3.5.1. Falistość powierzchni	88
3.5.2. Chropowatość powierzchni	88
3.5.3. Nośność powierzchni	91
3.6. Własności energetyczne powierzchni ciał stałych.....	96
3.6.1. Rodzaje powierzchni ciał stałych	96
3.6.2. Własności powierzchni ciał stałych	98
3.6.3. Zależność między energią powierzchniową a twardością	101
3.7. Metody badania stanu warstwy wierzchniej.....	104
3.7.1. Metody badania geometrii powierzchni	104
3.7.2. Metody badania stanu energetycznego powierzchni	109
3.7.3. Zwilżalność ciał stałych przez ciecz	112
3.7.4. Praca adhezji (zwilżania)	117
3.7.5. Ciepło zwilżania	118
3.7.6. Metoda wyznaczania kąta zwilżania	118

3.8. Metody badania stanu stref podpowierzchniowych warstwy wierzchniej	120
3.8.1. Metody badania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej	120
3.8.2. Metoda badania umocnienia metali warstwy wierzchniej	138
3.8.3. Metody badania zmian strukturalnych materiału warstwy wierzchniej	141
3.8.4. Metoda badania fragmentacji krystalitów warstwy wierzchniej	148
3.8.5. Metoda badania teksturowania warstwy wierzchniej	151
3.8.6. Metody badania wad materiału warstwy wierzchniej	153
4. TARCIE	155
4.1. Tarcie ciał stałych	159
4.1.1. Tarcie spoczynkowe (statyczne) ciał stałych	160
4.1.2. Tarcie ruchowe (kinetyczne) ciał stałych	162
4.1.3. Tarcie ślizgowe	162
4.1.4. Tarcie toczne	162
4.1.5. Hipotezy tarcia suchego ciał stałych	164
4.1.5.1. Mechaniczne teorie tarcia suchego	165
4.1.5.2. Adhezyjne teorie tarcia suchego	173
4.1.5.3. Adhezyjno-mechaniczna teoria tarcia suchego	177
4.1.6. Zjawiska w strefie kontaktu ciało stałe–ciało stałe	181
4.1.6.1. Adhezja	181
4.1.6.2. Zjawiska adhezyjno-dekohezyjne	182
4.1.7. Tarcie monokryształów	186
4.1.7.1. Kryształy o więzi metalicznej	188
4.1.7.2. Kryształy o więzi jonowej	190
4.1.7.3. Kryształy o więzi kowalentnej	191
4.1.8. Tarcie wewnętrzne ciał stałych. Smary stałe	192
4.1.8.1. Budowa i tarcie wewnętrzne smarów stałych	192
4.1.9. Rodzaje smarów stałych i teorie ich oddziaływania	196
4.1.9.1. Zastosowanie smarów stałych	199
4.1.9.2. Grafit i dwusiarczek molibdenu	199
4.1.9.3. Miękkie metale	201
4.1.9.4. Polimery niskotarciowe	201
5. TARCIE GRANICZNE	203
5.1. Adsorpcja i chemisorpcja	203
5.1.1. Formalny i fenomenologiczny zapis adsorpcji	205
5.1.2. Wpływ różnych czynników na proces adsorpcji i chemisorpcji	208
5.1.3. Adsorpcja z roztworu	212
5.1.4. Jednocząsteczkowe warstewki substancji nierozpuszczalnych na powierzchni cieczy	214
5.2. Warstwa graniczna i tarcie graniczne	216
5.2.1. Ogólna charakterystyka warstwy granicznej i tarcia granicznego	216
5.2.2. Badania granicznej warstwy smarującej	217

5.2.3. Modele warstwy granicznej	221
5.2.4. Własności warstwy granicznej	234
5.2.5. Metody badań własności warstwy granicznej	237
5.2.6. Modele tarcia granicznego.....	238
5.3. Smarność	250
5.3.1. Eksperymentalna weryfikacja smarności	253
5.3.2. Pomiary trwałości warstwy granicznej.....	258
5.3.2.1. Zużyciowa interpretacja pomiarów wytrzymałości warstwy granicznej	261
5.3.2.2. Energetyczna interpretacja trwałości warstwy.....	264
5.3.3. Smarność w ujęciu termodynamicznym	273
5.3.4. Zależność między budową chemiczną substancji smarujących a ich zdolnością sorpcyjną	275
5.3.5. Dodatki zwiększające smarność	277
5.3.5.1. Związki tlenowe.....	278
5.3.5.2. Związki siarkowe.....	278
5.3.5.3. Związki chlorowe	283
5.3.5.4. Związki fosforowe	283
5.3.5.5. Związki siarkowo-chlorowe	284
5.3.5.6. Związki chlorowo-fosforowe.....	284
5.3.5.7. Związki siarkowo-fosforowe	284
5.3.5.8. Inne rodzaje dodatków smarnościowych.....	285
6. TARCIE PŁYNNE	287
6.1. Substancje smarujące i ich charakterystyki	287
6.2. Własności reologiczne ciekłych substancji smarnych.....	295
6.2.1. Ciecze newtonowskie i nienewtonowskie	295
6.2.2. Lepkość cieczy i jej miary	299
6.2.2.1. Pomiary lepkości	303
6.2.2.2. Zależność lepkości od ciśnienia.....	308
6.2.2.3. Zależność lepkości od temperatury.....	311
6.2.2.4. Zależność lepkości olejów od ich budowy chemicznej	319
6.2.2.5. Lepkość mieszanin.....	321
6.2.2.6. Lepkość emulsji i zawiesin	323
6.2.2.7. Lepkość olejów zapowietrzonych	323
6.2.2.8. Mechaniczna degradacja dodatków polimerowych (ściananie polimerów)	324
6.2.3. Gęstość cieczy smarujących	330
6.2.4. Własności niskotemperaturowe substancji smarujących	332
6.2.5. Skład frakcyjny produktów naftowych	333
6.2.6. Zapłon i palenie się produktów naftowych	333
6.3. Smarowanie hydrodynamiczne.....	336
6.4. Podstawowe równania tarcia płynnego	338
6.4.1. Równanie Naviera–Stokesa	339

6.4.2. Uogólnione równanie Reynoldsa	343
6.4.3. Równania przepływu i ścinania	351
6.4.4. Równanie energii	353
6.4.5. Równanie stanu	359
6.5. Metody rozwiązywania równań Reynoldsa smarowania hydrodynamicznego	360
6.5.1. Metoda analityczna	360
6.5.2. Metoda numeryczna	362
6.5.3. Metody analogowe	363
6.5.4. Wyniki analizy smarowania hydrodynamicznego	367
6.6. Łożyska poprzeczne i wzdłużne smarowane hydrodynamicznie	371
6.6.1. Łożyska poprzeczne jednowymiarowe	371
6.6.2. Łożysko nieskończenie krótkie, którego długość dąży do zera	383
6.6.3. Łożysko z niepełną panwią	385
6.6.4. Łożysko ściśle pasowane	387
6.6.5. Łożysko z pływającym pierścieniem	388
6.6.6. Łożysko porowate	391
6.6.7. Łożyska wzdłużne jednowymiarowe	394
6.7. Smarowanie hydrostatyczne	400
6.7.1. Zasada smarowania hydrostatycznego	400
6.7.2. Łożysko ślizgowe poprzeczne	405
6.7.3. Łożysko ślizgowe wzdłużne	412
6.8. Smarowanie gazodynamiczne	416
6.9. Smarowanie gazostatyczne	422
6.10. Smarowanie elastohydrodynamiczne	428
6.10.1. Zasada smarowania elastohydrodynamicznego	428
6.10.2. Geometria styku kontaktowego	429
6.10.3. Smarowanie hydrodynamiczne obszaru styku skoncentrowanego	432
6.10.4. Elastohydrodynamiczna teoria smarowania	434
6.10.5. Analiza wymiarowa smarowania elastohydrodynamicznego	435
6.10.6. Elastohydrodynamiczne smarowanie przekładni zębatych	446
7. TARCIE MIESZANE	453
7.1. Charakterystyka tarcia mieszanego	453
7.2. Teorie tarcia mieszanego	454
7.2.1. Modele tarcia mieszanego	459
7.3. Wpływ obciążenia normalnego na wartość siły tarcia mieszanego	469
7.4. Wpływ lepkości substancji smarującej na wartość siły tarcia mieszanego	470
7.5. Wpływ ilości oleju na wartość siły tarcia mieszanego	470
7.6. Wpływ własności powierzchni na wartość siły tarcia mieszanego	471
7.7. Wpływ czasu styku mikroobszarów na wartość siły tarcia mieszanego ...	473
7.8. Praca tarcia mieszanego zamieniana na ciepło	474

7.9. Przykłady zastosowania teorii tarcia mieszanego do analizy wybranych obszarów tribologicznych	475
7.9.1. Cylinder o powierzchni chropowatej współpracującej z płaszczyzną	475
7.9.2. Łożysko poprzeczne	477
8. ZUŻYWANIE MASZYN NA SKUTEK TARCIA	479
8.1. Modele tribologiczne	479
8.2. Zużywanie ściernie	482
8.3. Zużywanie adhezyjne	489
8.4. Scuffing	492
8.5. Zużywanie przez utlenianie	493
8.6. Zużywanie zmęczeniowe	496
8.6.1. Zużywanie przez łuszczenie (spalling)	499
8.6.2. Pitting	500
8.7. Fretting	501
8.8. Miary wartości zużycia i odporności na zużycie tribologiczne	502
8.9. Procesy tribologiczne w stawach człowieka	504
9. METODY BADANIA SIŁY TARCIA I ZUŻYCIA	
WARSTWY WIERZCHNIEJ ELEMENTÓW MASZYN	509
9.1. Metody pomiaru siły i momentu tarcia	510
9.1.1. Czujniki piezoelektryczne	522
9.2. Metody pomiaru temperatury w obszarach tarcia	526
9.2.1. Rezystory termometryczne	527
9.2.2. Termistory	528
9.2.3. Termoelementy (termopary)	529
9.2.4. Pomiary temperatury na podstawie zmian rezystancji	530
9.2.5. Pomiary siły termoelektrycznej termoelementów	531
9.2.6. Wychyłowe metody pomiaru siły termoelektrycznej	531
9.2.7. Kompensacyjne metody pomiaru siły termoelektrycznej ...	533
9.2.8. Analiza błędów przy pomiarze temperatury warstwy wierzchniej za pomocą termoelementów	534
9.2.9. Pomiar temperatury obszarów tribologicznych za pomocą kryptonatów	535
9.2.10. Pomiar temperatury za pomocą wskaźników temperatury i termowizji	537
9.3. Ilościowe metody badania zużycia tribologicznego	538
9.3.1. Pomiary zużycia metodą wagową	538
9.3.2. Pomiary zużycia metodą metryczną	539
9.3.3. Pomiary zużycia metodą profilografowania	539
9.3.4. Pomiary zużycia metodą sztucznych baz	540
9.3.5. Pomiar zużycia za pomocą pneumatycznego pomiaru mikrometrycznego	544

9.3.6. Pomiar zużycia za pomocą czujników zegarowych	547
9.3.7. Pomiar zużycia za pomocą dynamometrów puszkowych	547
9.3.8. Pomiar zużycia za pomocą czujników indukcyjnych.....	548
9.3.9. Pomiar zużycia za pomocą tensometrów.....	549
9.3.10. Pomiar zużycia za pomocą izotopów promieniotwórczych	549
9.3.11. Metody wprowadzania znaczników promieniotwórczych do badanych elementów	551
9.3.12. Metody pomiaru aktywności produktów zużycia.....	559
10. SYSTEMY BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH	563
10.1. Charakterystyki urządzeń do badań tribologicznych.....	569
11. PLANOWANIE EKSPERYMENTALNYCH BADAŃ	
TARCIA I ZUŻYCIA	597
11.1. Podstawowe układy eksperymentalne i ich klasyfikacja.....	598
11.1.1. Układ kompletnej randomizacji	598
11.1.2. Bloki kompletnie zrandomizowane	600
11.1.3. Kwadrat łaciński.....	601
11.2. Doświadczenia czynnikowe	604
11.3. Estymacja wartości średniej dla populacji generalnej na podstawie wyników badań próby	605
11.4. Wnioskowanie statystyczne na podstawie parametrycznych testów istotności	608
11.4.1. Test dla dwóch średnich	609
11.5. Test analizy wariancji dla wielu średnich	611
11.6. Test zgodności χ^2	613
11.7. Test zgodności λ Kołmogorowa.....	614
11.8. Model analizy korelacji dla dwóch cech	617
11.9. Estymacja funkcji regresji dla dwóch zmiennych.....	620
Zakończenie	627
Literatura	629