

# Spis treści

<b>Od Autora .....</b>	<b>11</b>
<b>1. WPROWADZENIE .....</b>	<b>13</b>
1.1. Definicje niektórych pojęć procesów tarcia i zużycia .....	17
1.2. Współczesne kierunki rozwoju nauki o tarcia, smarowaniu i używaniu maszyn .....	20
<b>2. PODSTAWY BUDOWY CIAŁ STAŁYCH I PŁYNÓW .....</b>	<b>23</b>
2.1. Wiązania między atomami.....	30
2.1.1. Wiązanie kowalencyjne .....	30
2.1.2. Wiązanie jonowe.....	34
2.1.3. Wiązanie koordynacyjne.....	37
2.1.4. Wiązanie wodorowe.....	38
2.1.5. Wiązanie metaliczne .....	39
2.2. Siły międzycząsteczkowe .....	48
2.2.1. Siły dyspersyjne .....	49
2.2.2. Siły konformacyjne .....	50
2.2.3. Siły orientacyjne .....	52
2.2.4. Siły indukcyjne .....	54
2.3. Siły spójności .....	57
<b>3. WARSTWA WIERZCHNIA .....</b>	<b>63</b>
3.1. Warstwa wierzchnia elementów maszyn .....	63
3.2. Modele budowy warstwy wierzchniej .....	69
3.3. Parametry opisujące stan warstwy wierzchniej .....	75
3.4. Powierzchnia ciał stałych i płynów.....	78
3.5. Własności geometryczne powierzchni ciał stałych.....	84
3.5.1. Falistość powierzchni .....	86
3.5.2. Chropowatość powierzchni .....	86
3.5.3. Nośność powierzchni .....	89
3.6. Własności energetyczne powierzchni ciał stałych.....	94
3.6.1. Rodzaje powierzchni ciał stałych .....	94
3.6.2. Własności powierzchni ciał stałych .....	96
3.6.3 Zależność między energią powierzchniową a twardością .....	99
3.7. Metody badania stanu warstwy wierzchniej.....	102
3.7.1. Metody badania geometrii powierzchni .....	102
3.7.2. Metody badania stanu energetycznego powierzchni .....	107
3.7.3 Zwilżalność ciał stałych przez ciecz .....	110
3.7.4. Praca adhezji (zwilżania) .....	115
3.7.5. Ciepło zwilżania .....	116
3.7.6. Metoda wyznaczania kąta zwilżania .....	116

3.8.	Metody badania stanu stref podpowierzchniowych warstwy wierzchniej	118
3.8.1.	Metody badania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej	118
3.8.2.	Metoda badania umocnienia metali warstwy wierzchniej .....	136
3.8.3.	Metody badania zmian strukturalnych materiału warstwy wierzchniej .....	139
3.8.4.	Metoda badania fragmentacji krystalitów warstwy wierzchniej...	146
3.8.5.	Metoda badania teksturowania warstwy wierzchniej .....	149
3.8.6.	Metody badania wad materiału warstwy wierzchniej .....	151
<b>4.</b>	<b>TARCIE .....</b>	<b>153</b>
4.1.	Tarcie ciał stałych .....	157
4.1.1.	Tarcie spoczynkowe (statyczne) ciał stałych .....	158
4.1.2.	Tarcie ruchowe (kinetyczne) ciał stałych .....	160
4.1.3.	Tarcie ślizgowe .....	160
4.1.4.	Tarcie toczne .....	160
4.1.5.	Hipotezy tarcia suchego ciał stałych .....	162
4.1.5.1.	Mechaniczne teorie tarcia suchego .....	163
4.1.5.2.	Adhezyjne teorie tarcia suchego .....	171
4.1.5.3.	Adhezyjno-mechaniczna teoria tarcia suchego .....	175
4.1.6.	Zjawiska w strefie kontaktu ciało stałe–ciało stałe .....	179
4.1.6.1.	Adhezja .....	179
4.1.6.2.	Zjawiska adhezyjno-dekohezyjne .....	180
4.1.7.	Tarcie monokryształów .....	184
4.1.7.1.	Kryształy o więzi metalicznej .....	186
4.1.7.2.	Kryształy o więzi jonowej.....	188
4.1.7.3.	Kryształy o więzi kowalentnej .....	189
4.1.8.	Tarcie wewnętrzne ciał stałych. Smary stałe .....	190
4.1.8.1.	Budowa i tarcie wewnętrzne smarów stałych .....	190
4.1.9.	Rodzaje smarów stałych i teorie ich oddziaływania .....	194
4.1.9.1.	Zastosowanie smarów stałych.....	197
4.1.9.2.	Grafit i dwusiarczek molibdenu .....	197
4.1.9.3.	Miękkie metale.....	199
4.1.9.4.	Polimery niskotarciowe.....	199
<b>5.</b>	<b>TARCIE GRANICZNE .....</b>	<b>201</b>
5.1.	Adsorpcja i chemisorpcja .....	201
5.1.1.	Formalny i fenomenologiczny zapis adsorpcji .....	203
5.1.2.	Wpływ różnych czynników na proces adsorpcji i chemisorpcji ..	206
5.1.3.	Adsorpcja z roztworu .....	210
5.1.4.	Jednocząsteczkowe warstewki substancji nierozpuszczalnych na powierzchni cieczy .....	212
5.2.	Warstwa graniczna i tarcie graniczne .....	214
5.2.1.	Ogólna charakterystyka warstwy granicznej i tarcia granicznego	214
5.2.2.	Badania granicznej warstwy smarującej .....	215

5.2.3. Modele warstwy granicznej .....	219
5.2.4. Własności warstwy granicznej .....	232
5.2.5. Metody badań własności warstwy granicznej .....	235
5.2.6. Modele tarcia granicznego.....	236
5.3. Smarność .....	248
5.3.1. Eksperymentalna weryfikacja smerności .....	251
5.3.2. Pomiar trwałości warstwy granicznej.....	256
5.3.2.1. Zużyciowa interpretacja pomiarów wytrzymałości warstwy granicznej .....	259
5.3.2.2. Energetyczna interpretacja trwałości warstwy .....	262
5.3.3. Smarność w ujęciu termodynamicznym.....	271
5.3.4. Zależność między budową chemiczną substancji smarujących a ich zdolnością sorpcyjną .....	273
5.3.5. Dodatki zwiększające smarność .....	275
5.3.5.1. Związki tlenowe .....	276
5.3.5.2. Związki siarkowe.....	276
5.3.5.3. Związki chlorowe .....	281
5.3.5.4. Związki fosforowe.....	281
5.3.5.5. Związki siarkowo-chlorowe .....	282
5.3.5.6. Związki chlorowo-fosforowe.....	282
5.3.5.7. Związki siarkowo-fosforowe.....	282
5.3.5.8. Inne rodzaje dodatków smarnościowych.....	283
<b>6. TARCIE PŁYNNE .....</b>	<b>285</b>
6.1. Substancje smarujące i ich charakterystyki .....	285
6.2. Własności reologiczne ciekłych substancji smarnych.....	293
6.2.1. Ciecze newtonowskie i nienewtonowskie .....	293
6.2.2. Lepkość cieczy i jej miary .....	297
6.2.2.1. Pomiar lepkości.....	301
6.2.2.2. Zależność lepkości od ciśnienia .....	306
6.2.2.3. Zależność lepkości od temperatury .....	309
6.2.2.4. Zależność lepkości olejów od ich budowy chemicznej	317
6.2.2.5. Lepkość mieszanin .....	319
6.2.2.6. Lepkość emulsji i zawiesin .....	321
6.2.2.7. Lepkość olejów zapowietrzonych .....	321
6.2.2.8. Mechaniczna degradacja dodatków polimerowych (ściananie polimerów) .....	322
6.2.3. Gęstość cieczy smarujących .....	328
6.2.4. Własności niskotemperaturowe substancji smarujących .....	330
6.2.5. Skład frakcyjny produktów naftowych .....	331
6.2.6. Zapłon i palenie się produktów naftowych .....	331
6.3. Smarowanie hydrodynamiczne.....	334
6.4. Podstawowe równania tarcia płynnego .....	336
6.4.1. Równanie Naviera–Stokesa .....	337

6.4.2. Uogólnione równanie Reynoldsa .....	341
6.4.3. Równania przepływu i ścinania .....	349
6.4.4. Równanie energii .....	351
6.4.5. Równanie stanu .....	357
6.5. Metody rozwiązywania równań Reynoldsa smarowania hydrodynamicznego .....	358
6.5.1. Metoda analityczna .....	358
6.5.2. Metoda numeryczna .....	360
6.5.3. Metody analogowe .....	361
6.5.4. Wyniki analizy smarowania hydrodynamicznego .....	365
6.6. Łożyska poprzeczne i wzdłużne smarowane hydrodynamicznie .....	369
6.6.1. Łożyska poprzeczne jednowymiarowe .....	369
6.6.2. Łożysko nieskończenie krótkie, którego długości dążą do zera .....	381
6.6.3. Łożysko z niepełną panwią .....	383
6.6.4. Łożysko ściśle pasowane .....	385
6.6.5. Łożysko z pływającym pierścieniem .....	386
6.6.6. Łożysko porowate .....	389
6.6.7. Łożyska wzdłużne jednowymiarowe .....	392
6.7. Smarowanie hydrostatyczne .....	398
6.7.1. Zasada smarowania hydrostatycznego .....	398
6.7.2. Łożysko ślizgowe poprzeczne .....	403
6.7.3. Łożysko ślizgowe wzdłużne .....	410
6.8. Smarowanie gazodynamiczne .....	414
6.9. Smarowanie gazostatyczne .....	420
6.10. Smarowanie elastohydrodynamiczne .....	426
6.10.1. Zasada smarowania elastohydrodynamicznego .....	426
6.10.2. Geometria styku kontaktowego .....	427
6.10.3. Smarowanie hydrodynamiczne obszaru styku skoncentrowanego .....	430
6.10.4. Elastohydrodynamiczna teoria smarowania .....	432
6.10.5. Analiza wymiarowa smarowania elastohydrodynamicznego .....	433
6.10.6. Elastohydrodynamiczne smarowanie przekładni zębatych ..	444
<b>7. TARCIE MIESZANE .....</b>	<b>451</b>
7.1. Charakterystyka tarcia mieszanego .....	451
7.2. Teorie tarcia mieszanego .....	452
7.2.1. Modele tarcia mieszanego .....	459
7.3. Wpływ obciążenia normalnego na wartość siły tarcia mieszanego ..	467
7.4. Wpływ lepkości substancji smarującej na wartość siły tarcia mieszanego ..	468
7.5. Wpływ ilości oleju na wartość siły tarcia mieszanego .....	468
7.6. Wpływ własności powierzchni na wartość siły tarcia mieszanego ..	469
7.7. Wpływ czasu styku mikroobszarów na wartość siły tarcia mieszanego ...	471
7.8. Praca tarcia mieszanego zamieniana na ciepło .....	472

7.9. Przykłady zastosowania teorii tarcia mieszanego do analizy wybranych obszarów tribologicznych .....	473
7.9.1. Cylinder o powierzchni chropowatej współpracującej z płaszczyzną .....	473
7.9.2. Łożysko poprzeczne .....	475
<b>8. ZUŻYWANIE MASZYN NA SKUTEK TARCIA .....</b>	<b>477</b>
8.1. Modele tribologiczne .....	477
8.2. Zużywanie ściernie .....	480
8.3. Zużycie adhezyjne .....	487
8.4. Scuffing .....	490
8.5. Zużywanie przez utlenianie .....	491
8.6. Zużywanie zmęczeniowe.....	494
8.6.1. Zużywanie przez łuszczenie (spalling) .....	497
8.6.2. Pitting.....	498
8.7. Fretting.....	499
8.8. Miary wartości zużycia i odporności na zużycie tribologiczne .....	500
8.9. Procesy tribologiczne w stawach człowieka .....	502
<b>9. METODY BADANIA SIŁY TARCIA I ZUŻYCIA WARSTWY WIERZCHNIEJ ELEMENTÓW MASZYN .....</b>	<b>507</b>
9.1. Metody pomiaru siły i momentu tarcia .....	508
9.1.1. Czujniki piezoelektryczne .....	520
9.2. Metody pomiaru temperatury w obszarach tarcia.....	524
9.2.1. Rezystory termometryczne .....	525
9.2.2. Termistory .....	526
9.2.3. Termoelementy (termopary) .....	527
9.2.4. Pomiary temperatury na podstawie zmian rezystancji .....	528
9.2.5. Pomiary siły termoelektrycznej termoelementów.....	529
9.2.6. Wychyłowe metody pomiaru siły termoelektrycznej .....	529
9.2.7. Kompensacyjne metody pomiaru siły termoelektrycznej ...	531
9.2.8. Analiza błędów przy pomiarze temperatury warstwy wierzchniej za pomocą termoelementów .....	532
9.2.9. Pomiar temperatury obszarów tribologicznych za pomocą kryptonatów .....	533
9.2.10. Pomiar temperatury za pomocą wskaźników temperatury i termowizji.....	535
9.3. Ilościowe metody badania zużycia tribologicznego .....	536
9.3.1. Pomiary zużycia metodą wagową .....	536
9.3.2. Pomiary zużycia metodą metryczną.....	537
9.3.3. Pomiary zużycia metodą profilografowania.....	537
9.3.4. Pomiary zużycia metodą sztucznych baz .....	538
9.3.5. Pomiar zużycia za pomocą pneumatycznego pomiaru mikrometrycznego .....	542
9.3.6. Pomiar zużycia za pomocą czujników zegarowych .....	545

9.3.7.	Pomiar zużycia za pomocą dynamometrów puszkowych	545
9.3.8.	Pomiar zużycia za pomocą czujników indukcyjnych.....	546
9.3.9.	Pomiar zużycia za pomocą tensometrów.....	547
9.3.10.	Pomiar zużycia za pomocą izotopów promieniotwórczych .	547
9.3.11.	Metody wprowadzania znaczników promieniotwórczych do badanych elementów.....	549
9.3.12.	Metody pomiaru aktywności produktów zużycia.....	557
<b>10.</b>	<b>SYSTEMY BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH .....</b>	<b>561</b>
10.1.	Charakterystyki urządzeń do badań tribologicznych.....	567
<b>11.</b>	<b>PLANOWANIE EKSPERYMENTALNYCH BADAŃ</b>	
	<b>TARCIA I ZUŻYCIA .....</b>	<b>595</b>
11.1.	Podstawowe układy eksperymentalne i ich klasyfikacja.....	596
11.1.1.	Układ kompletnej randomizacji .....	596
11.1.2.	Bloki kompletnie zrandomizowane.....	598
11.1.3.	Kwadrat łaciński.....	599
11.2.	Doświadczenia czynnikowe .....	602
11.3.	Estymacja wartości średniej dla populacji generalnej na podstawie wyników badań próby .....	603
11.4.	Wnioskowanie statystyczne na podstawie parametrycznych testów istotności .....	606
11.4.1.	Test dla dwóch średnich.....	607
11.5.	Test analizy wariancji dla wielu średnich .....	609
11.6.	Test zgodności $\chi^2$ .....	611
11.7.	Test zgodności $\lambda$ Kołmogorowa.....	612
11.8.	Model analizy korelacji dla dwóch cech .....	615
11.9.	Estymacja funkcji regresji dla dwóch zmiennych.....	618
	<b>Zakończenie .....</b>	<b>625</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>627</b>