



Wit Grzesik

Podstawy
**SKRAWANIA
MATERIAŁÓW
KONSTRUKCYJNYCH**

Wydanie 3
zmienione i uaktualnione

Wydawnictwo WNT



Podstawy
SKRAWANIA
MATERIAŁÓW
KONSTRUKCYJNYCH

Wit Grzesik

Podstawy
SKRAWANIA
MATERIAŁÓW
KONSTRUKCYJNYCH

Wydanie 3
zmienione i uaktualnione

Projekt okładki i stron tytułowych: **GRAFOS**
Fotografia na okładce: **Whisky/Fotolia**
Wydawca: **Adam Filutowski**
Koordynator ds. redakcji: **Adam Kowalski**
Redaktorzy: **inż. Ewa Kiliś, mgr inż. Marek Kośnik (2. wydanie)**
Redakcja i korekta 3. wydania (2018): **Paweł Wielopolski**
Produkcja: **Mariola Grzywacka**
Dział reklamy: **Małgorzata Pasenik** (Malgorzata.Pasenik@pwn.pl)
Skład i łamanie: **Marta Jeczeń-Bańkowska**

Opiniodawcy (2. wydania): **prof. dr hab. inż. Mieczysław Kawalec**
prof. dr hab. inż. Jan Kosmol

Wydanie książki dofinansowała Politechnika Opolska.

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo WNT
Warszawa 1998, 2010

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2017, 2018

ISBN 978-83-01-19919-7

Wydanie III (zmienione i uaktualnione)
(I wydanie WN PWN)

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

Spis treści

Od Autora	XI
Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	XIII
Ważniejsze oznaczenia	XIII
Skróty	XIX
Wykaz norm wykorzystanych w książce	XXI
1. Ogólna charakterystyka procesu skrawania	1
1.1. Klasyfikacja procesów obróbki ubytkowej	1
1.2. Rola obróbki skrawaniem we współczesnym wytwarzaniu	4
1.3. Kinematyka procesu i parametry skrawania	10
1.4. Geometryczna charakterystyka ostrza skrawającego	12
1.5. Geometria warstwy skrawanej	19
1.6. Przyszłościowa wizja obróbki skrawaniem	23
Literatura	30
2. Materiały narzędziowe	32
2.1. Klasyfikacja i właściwości materiałów ostrzy skrawających	32
2.2. Powłoki ochronne na narzędziach skrawających	36
2.3. Stale szybko tnące	39
2.4. Węglik spiekane	40
2.5. Cermetale	42
2.6. Ceramika	43
2.7. Materiały supertwarde	45
Literatura	47
3. Fizyczne aspekty procesu skrawania	48
3.1. Zjawiska fizyczne w strefie skrawania	48
3.2. Charakterystyka stanu naprężenia i odkształcenia	50

3.3.	Mechanizmy odkształcenia w mikro- i nanoskali	54
3.4.	Przebieg odkształcenia materiału	58
3.5.	Warunki uplastycznienia materiału w strefie skrawania	60
3.6.	Dekohezja materiału w strefie tworzenia wióra	66
3.6.	Warunki zainicjowania mikroskrawania, minimalna grubość warstwy skrawanej	68
	Literatura	72
4.	Modelowanie procesu skrawania	74
4.1.	Klasyfikacja modeli procesu skrawania.	74
4.2.	Konstrytutywne modele materiałowe	79
4.3.	Techniki oceny właściwości mechanicznych w warunkach skrawania.	85
4.4.	Techniki modelowania	87
4.4.1.	Cele i zakres badań symulacyjnych	87
4.4.2.	Symulacja metodą elementów skończonych	90
4.4.3.	Symulacja metodą różnic skończonych	94
	Literatura	96
5.	Mechanika procesu skrawania.	98
5.1.	Klasyfikacja modeli mechanistycznych.	98
5.2.	Stan odkształcenia w strefie ścinania.	100
5.2.1.	Warunki realizacji płaskiego i przestrzennego stanu odkształcenia.	100
5.2.2.	Charakterystyka stanu odkształcenia w strefie tworzenia wióra.	100
5.3.	Rozkład prędkości w strefie tworzenia wióra	105
5.4.	Modele tworzenia wióra	108
5.4.1.	Model z rozwiniętą strefą poślizgu	108
5.4.2.	Model z równoległymi granicami strefy poślizgu	109
5.4.3.	Model z pojedynczą płaszczyzną poślizgu	113
5.4.4.	Model tworzenia wióra segmentowego.	117
5.4.5.	Model zlokalizowanej strefy ścinania adiabatycznego	119
5.4.6.	Dyslokacyjny model tworzenia wióra	122
5.4.7.	Modele tworzenia wióra w nanoskali	124
5.5.	Modelowanie kąta poślizgu	126
5.5.1.	Zastosowanie rozwiązań teorii plastyczności	126
5.5.2.	Doświadczalne metody wyznaczania kąta poślizgu	132
5.6.	Numeryczna symulacja procesu tworzenia wióra	134
5.6.1.	Opis tworzenia wióra metodą elementów skończonych	134
5.6.2.	Symulacja tworzenia wióra ciągłego i segmentowego	136

5.7.	Siły w procesie skrawania	138
5.7.1.	Rozkład całkowitej siły skrawania	138
5.7.2.	Rozkład sił w strefie poślizgu i na powierzchni natarcia	140
5.7.3.	Metody oszacowania sił na powierzchni przyłożenia ostrza	142
5.7.4.	Teoretyczno-doświadczalne i doświadczalne metody wyznaczania składowych sił skrawania	145
5.7.5.	Wpływ warunków obróbki na składowe całkowitej siły skrawania	151
5.8.	Stan naprężeń w strefie tworzenia wióra	154
5.8.1.	Stan i rozkład naprężeń	154
5.8.2.	Ocena wartości naprężenia poślizgu	156
5.9.	Energia i moc skrawania	158
5.9.1.	Bilans energetyczny procesu	158
5.9.2.	Energia tworzenia wióra	159
5.9.3.	Moc skrawania	162
5.10.	Zwijanie i łamanie wióra	163
5.10.1.	Klasyfikacja kształtów wióra	163
5.10.2.	Warunki tworzenia wiórów odrywanych i ścinanych	164
5.10.3.	Charakterystyka spływu wióra	166
5.10.4.	Mechanizmy zwijania wióra	169
5.10.5.	Warunki i przebieg łamania wióra	172
5.10.6.	Kontrola wióra	176
	Literatura	178
6.	Drgania w procesie skrawania	181
6.1.	Źródła i klasyfikacja drgań	181
6.2.	Mechanizmy generowania drgań samowzbudnych	187
6.3.	Stabilność układu OUPN i metody jej poprawy	191
	Literatura	196
7.	Tribologia procesu skrawania	197
7.1.	Charakterystyka strefy styku ostrza z obrabianym materiałem	197
7.2.	Rozkład naprężeń w strefie styku wiór-ostrze	200
7.3.	Narost	204
7.4.	Związki korelacyjne charakterystyk odkształceń z procesem tarcia	207
7.5.	Doświadczalne metody wyznaczania współczynnika tarcia	209
	Literatura	213
8.	Ciepło w procesie skrawania	215
8.1.	Źródła i rozptyw ciepła w strefie skrawania	215

8.2.	Temperatura skrawania	218
8.3.	Analityczne wyznaczenie temperatury w strefie skrawania	220
8.3.1.	Partycja ciepła w modelu ruchomego źródła ciepła	220
8.3.2.	Temperatura na płaszczyźnie poślizgu	223
8.3.3.	Temperatura na powierzchni natarcia ostrza	225
8.4.	Numeryczne metody określania pól temperatury w strefie skrawania	227
8.5.	Doświadczalne metody wyznaczania temperatury skrawania	231
8.6.	Wpływ warunków obróbki na temperaturę skrawania	237
8.7.	Ciecze chłodząco-smarujące	242
	Literatura	249
9.	Zużycie i trwałość ostrza	251
9.1.	Charakterystyka stref zużycia ostrza	251
9.2.	Fizyczne mechanizmy zużycia ostrza	255
9.3.	Zużycie powłok ochronnych	260
9.4.	Przebieg zużycia i stopień ostrza	266
9.5.	Matematyczne modelowanie i prognozowanie okresu trwałości ostrza	271
9.6.	Nadzorowanie stanu ostrza narzędzia	282
	Literatura	288
10	Skrawalność materiałów konstrukcyjnych	290
10.1.	Wskaźniki skrawalności	290
10.2.	Związki skrawalności ze strukturą i właściwościami materiałów	296
10.3.	Charakterystyka skrawalności materiałów konstrukcyjnych	299
10.3.1.	Stale konstrukcyjne niestopowe i stopowe	299
10.3.2.	Stale austenityczne nierdzewne i kwasoodporne	301
10.3.3.	Żeliwa i staliwa	303
10.3.4.	Metale nieżelazne i ich stopy	306
10.3.5.	Tytan i jego stopy	308
10.3.6.	Stopy na osnowie niklu i kobaltu	310
10.3.7.	Materiały kompozytowe	311
10.4.	Systemy wspomagające dobór warunków obróbki	314
	Literatura	319
11.	Ekonomiczność i optymalizacja procesu skrawania	321
11.1.	Wskaźniki i modele procesu	321
11.2.	Kryteria i algorytmy optymalizacji doboru warunków skrawania	322
11.3.	Techniki optymalizacji warunków skrawania	326
	Literatura	334

12. Przegląd technologii ubytkowego kształtowania materiałów	335
12.1. Obróbka z podwyższonymi i dużymi prędkościami skrawania	335
12.2. Obróbka materiałów twardych i w stanie utwardzonym	340
12.3. Obróbka na sucho i ze zminimalizowanym użyciem mediów chłodząco-smarujących	347
12.3.1. Obróbka na sucho	347
12.3.2. Obróbka ze zminimalizowanym smarowaniem	351
12.4. Obróbka wysokowydajna	355
12.5. Obróbka kompletna	366
12.6. Mikroobróbka	372
12.7. Nanoobróbka	379
12.8. Hybrydowe metody obróbki	384
12.8.1. Klasyfikacja hybrydowych procesów wytwórczych/obróbki	384
12.8.2. Obróbka hybrydowa wspomagana termicznie	386
12.8.3. Obróbka hybrydowa wspomagana energią drgań	389
12.8.4. Obróbka kriogeniczna	394
Literatura	397
13. Rola techniki komputerowej i informacyjnej w procesie skrawania	399
13.1. Komputerowe wspomaganie procesu obróbki	399
13.1.1. Zastosowanie symulacji i wizualizacji w programowaniu CAD/CAM	399
13.1.2. Bazy danych do oceny skrawalności i doboru warunków obróbki	406
13.2. Zastosowanie sensorów i sztucznej inteligencji	408
13.3. Zastosowanie wirtualnej rzeczywistości	416
13.4. Techniki internetowe w procesie obróbki	422
Literatura	427
14. Technologiczna warstwa wierzchnia	429
14.1. Strukturalne modele budowy warstwy wierzchniej	429
14.2. Modele kształtowania mikronierówności powierzchni	431
14.2.1. Modele stereometryczno-kinematyczne	431
14.2.2. Modele uwzględniające niektóre oddziaływania fizyczne w procesie skrawania	435
14.3. Charakterystyka chropowatości powierzchni	439
14.3.1. Parametry profilu i topografii powierzchni	439
14.3.2. Pomiary chropowatości powierzchni	445
14.4. Fizyczne właściwości warstwy wierzchniej	448
14.4.1. Charakterystyka właściwości fizycznych warstwy wierzchniej	448

14.4.2.	Naprężenia własne w warstwie wierzchniej	449
14.4.3.	Umocnienie materiału i zmiana mikrostruktury w warstwie wierzchniej	453
	Literatura	455
	Słownik ważniejszych terminów i skrótów w języku angielskim	456

Od Autora

Obróbka skrawaniem jest podstawową techniką wytwarzania w budowie maszyn i według prognoz jej udział w przyszłości nie ulegnie zmianie, a w przypadku obróbki hybrydowej, mikro- i nanoobróbki nawet się zwiększy. Od kilku dekad obserwuje się dynamiczny wzrost automatyzacji, informatyzacji i cyfryzacji procesów wytwórczych. Aby można było w pełni urzeczywistnić sterowanie przebiegiem procesu obróbkowego i jakością wytwarzanego wyrobu, niezbędny jest pełny, trójwymiarowy model procesu skrawania. Postęp w modelowaniu i symulacji 3D procesu skrawania przy użyciu zaawansowanej techniki komputerowej jest wyraźny, szczególnie modelowania wirtualnego na potrzeby Produkcji 4.0. Głównie ze względów ekonomicznych i niewielkie zainteresowanie przemysłu udział ośrodków badawczych z Polski w światowym programie skrawania „komputerowego” jest niewielki. Nie znaczy to jednak, że studenci wydziałów mechanicznych politechnik i inżynierowie-technologowie muszą być pozbawieni nowoczesnej wiedzy w postaci literatury fachowej, podstaw modelowania i baz danych. Od pierwszego wydania mojej książki upłynęło ponad 20 lat, a od drugiego osiem, co w nowoczesnej technologii oznacza całą epokę.

Niniejsza książka w dużej mierze wychodzi naprzeciw tym zapotrzebowaniom, gdyż w miarę możliwości przedstawiłem w niej obecny stan wiedzy z zakresu teorii i praktyki obróbki skrawaniem na świecie i jej miejsce pośród innych technik wytwórczych. Aktualność zamieszczonych informacji gwarantują liczne cytowania z książek, czasopism naukowych i technicznych, a w szczególności z *CIRP Annals Manufacturing Technology*. Układ treści umożliwia Czytelnikowi odróżnienie i ocenę, co można nazwać *informacją technologiczną*, podawaną przez producentów materiałów narzędziowych, narzędzi skrawających i obrabiarek w katalogach lub dostępną w internecie, od *informacji naukowych*, pogłębiających wiedzę o fizycznym mechanizmie procesu skrawania i zasadach jego modelowania.

W obecnym wydaniu książki pozostawiłem układ rozdziałów, ale dokonałem dość istotnych zmian w ich treści i wprowadziłem nowe informacje na temat procesu skrawania, które pojawiły się w ostatniej dekadzie i zostały

zaakceptowane przez środowisko naukowe i badawcze. W ten sposób książka będzie lepiej dostosowana do programów wykładów na studiach II i III stopnia i będzie bardziej przydatna dla inżynierów z przemysłu wytwórczego.

Trudnego wyboru materiałów dokonałem na podstawie moich ponad czterdziestoletnich doświadczeń w pracy naukowej i dydaktycznej, korzystając z międzynarodowych kontaktów naukowych. W tym miejscu chciałbym podziękować wszystkim osobom, które w czasie powstawania trzeciego wydania książki przesyłali mi materiały z własnych zbiorów, nie szczędzili dobrych rad i życzliwie utwierdzali mnie w przekonaniu o celowości kolejnego zadania.

Dziękuję całej mojej Rodzinie za cierpliwość i wsparcie w czasie prac nad książką, a mojemu współpracownikowi, dr. Krzysztofowi Żakowi, za pomoc w przygotowaniu grafiki i obsługę internetową.

Mam nadzieję, że funkcjonująca w nauce zasada ciągłego udoskonalania wiedzy empirycznej zainspiruje Szanownych Czytelników do podzielenia się ze mną swoimi krytycznymi uwagami i spostrzeżeniami.

Moją pracę i włożony w nią trud intelektualny chciałbym, tak jak w poprzednich wydaniach, poświęcić wszystkim Profesorom, którzy tworzyli i rozwijali polską szkołę obróbki skrawaniem.

Wit Grzesik
Opole, luty 2018 r.