



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

Wydawnictwo WNT



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 szybkołtne	39
2.4. Węgliki 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.	Konstryktywne 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-technolodzy 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.

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

Ważniejsze oznaczenia

a_p	– głębokość skrawania (dosuw)
A	– amplituda drgań, nominalne pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej, wydłużenie względne
A_k	– pole strefy styku wiór–ostrze
A_{rz}	– rzeczywiste pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej
A_{sh}	– pole powierzchni płaszczyzny poślizgu
A_{α}, A_{γ}	– powierzchnia przyłożenia, natarcia
b (b_D)	– szerokość warstwy skrawanej (nominalna)
b_{ch}	– szerokość wióra
b_k	– szerokość styku wiór–ostrze
c	– ciepło właściwe, stała sztywności
CF	– wskaźnik zużycia powierzchni natarcia
C_i	– stałe we wzorach empiryczno-statystycznych
C_T, C_v	– stałe w równaniu trwałości ostrza
e_{tw}, e_{sh}	– energia właściwa tworzenia wióra i poślizgu
E	– energia skrawania (całkowita)
E_c, E_f	– energia ruchu głównego i posuwowego
$E_{p'}, E_t$	– energia odkształceń plastycznych i tarcia
E_{sh}	– energia odkształceń postaciowych (poślizgu)
f	– posuw, częstotliwość drgań narzędzia
f_{opt}	– optymalny posuw
f_z	– posuw na ostrze
F	– siła całkowita* (wypadkowa siła skrawania)
F_a	– siła czynna, siła tworzenia wióra
F_c	– siła skrawania* (składowa obwodowa, styczna, główna siły całkowitej)

* Nazwy proponowane w normie PN-92/M-01002/03; 1992.

F_{cd}, F_{fd}	– składowe dynamiczne sił F_c i F_f
F_D	– siła poprzeczna
F_f	– siła posuwowa* (składowa posuwowa siły całkowitej)
F_{max}	– maksymalna wartość siły wymuszającej harmoniczej
F_p	– siła odporowa* (składowa odporowa, promieniowa siły całkowitej)
$F(t)$	– siła wymuszająca drgania
$F_{\alpha}, F_{\alpha N}$	– siła równoległa i prostopadła do powierzchni przyłożenia
$F_{\gamma}, F_{\gamma N}$	– siła równoległa (tarcia) i prostopadła do powierzchni natarcia
F_{sh}, F_{shN}	– siła równoległa i prostopadła do płaszczyzny poślizgu
F'_c	– opór właściwy skrawania liniowy (siła skrawania na jednostkę szerokości warstwy skrawanej*)
G	– moduł sprężystości postaciowej
h	– grubość warstwy skrawanej, wysokość progu zwijacza wióra, współczynnik tłumienia drgań
$h_{ch} (h_w)$	– grubość wióra
h_d	– dynamiczna składowa grubości warstwy skrawanej
h_{min}	– minimalna grubość warstwy skrawanej
h_r	– graniczna głębokość penetracji wgłębnika
h_D	– nominalna grubość warstwy skrawanej
H_n	– wysokość narostu
H_M	– twardość materiału obrabianego
H_N	– twardość materiału narzędziowego
i_s	– intensywność wpływu dodatku stopowego na prędkość skrawania
I	– intensywność zużycia ostrza
J	– mechaniczny równoważnik ciepła, strumień atomów dyfundujących w jednostce czasu
k	– granica plastyczności przy czystym ścinaniu, parametr wzmocnienia, stała topnienia, wykładnik w równaniu trwałości
$k_h (A_h),$ $k_b (A_b), k_l (A_l)$	– współczynnik zgrubienia, rozszerzenia, skrócenia wióra
k_c	– opór właściwy skrawania powierzchniowy (siła skrawania na jednostkę powierzchni warstwy skrawanej*)
$k_{c1.1}$	– wartość oporu właściwego dla jednostki grubości warstwy skrawanej
k_w	– objętościowy współczynnik wióra
k_{xd}	– dynamiczny opór właściwy skrawania
K_i	– współczynniki poprawkowe we wzorach empiryczno-statystycznych

* Ibidem.

K_{int}	– współczynnik skrócenia styku wiór–ostrze
K_j	– koszt jednostkowy
K_{jmin}	– minimalny koszt jednostkowy
K_{xd}	– współczynnik dynamicznej sztywności siły skrawania
K_1	– dyfuzyjność cieplna
K_{IC}	– współczynnik intensywności naprężeń
K_M	– wskaźnik skrawalności
KE	– cofnięcie naroża
KF	– odległość początkowego położenia krawędzi skrawającej od początku krateru
KM	– odległość początkowego położenia krawędzi skrawającej od największej głębokości krateru
KT	– największa głębokość rowka zużycia
KT/KM	– współczynnik rowka zużycia
$l_{ch} (l_w)$	– długość wióra
l_k	– długość styku wiór–powierzchnia natarcia
$l_{k\gamma}, l_{k\alpha}$	– długość strefy kontaktu od strony powierzchni natarcia i przyłożenia
l_p	– długość styku plastycznego
l_{rc}	– długość skrócenia styku wiór–ostrze
l_s	– długość styku sprężystego
L	– ciepło topnienia
L_t	– długość drogi tarcia
m	– masa, wykładnik umocnienia w równaniu Ludwika
m_z	– masa zastępcza układu drgającego
$Mr1$ i $Mr2$	– udziały materiałowe na górnej granicy profilu rdzenia i na linii przecięcia oddzielającej głębokie wgłębienia od profilu rdzenia
n	– prędkość obrotowa wrzeciona, wykładnik we wzorze Taylora
n_{opt}	– optymalna prędkość obrotowa
N	– liczba fal naciętych na powierzchni przedmiotu
N_u	– liczba Nusselta
p	– naprężenie hydrostatyczne
p_c	– moc skrawania właściwa
P_c	– moc skrawania
P_e	– liczba Pecleta, moc całkowita (robocza)
P_f, P_n, P_o, P_p	– płaszczyzny: boczna, normalna, ortogonalna (przekroju głównego), tylna
P_{fe}	– płaszczyzna robocza
P_r	– płaszczyzna podstawowa
P_s	– płaszczyzna krawędzi skrawającej, moc odkształceń poślizgu
P_{sh}	– płaszczyzna poślizgu

q_n	– promień rowka (zwijacza wióra) w płytce
q_s	– intensywność źródła ciepła na płaszczyźnie poślizgu
q_{wv} q_{nv} q_m	– strumienie cieplne wnikaające w wiór, narzędzie i materiał obrabiany
Q	– ciepło skrawania, energia aktywacji procesu dyfuzji
Q_a	– ciepło unoszone do atmosfery otoczenia
Q_o , Q_{tr} Q_{wv}	– ciepło odkształceń plastycznych, tarcia i odkształceń poniżej linii skrawania
Q_v	– objętościowa wydajność skrawania
Q_{wv} Q_{nv} Q_m	– ciepło przejmowane przez wiór, narzędzie, materiał obrabiany
r_n (r_β)	– promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej
r_{nn}	– promień wierzchołka narostu
r_s r_u	– promień wióra przy zwijaniu bocznym i wznoszącym
r_{uv} r_{uf}	– promień zwiniętego wióra w chwili styku z przeszkodą i podczas łamania
r_ε	– promień naroża
R	– liczba cieplna, uniwersalna stała gazowa
Ra	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości
Ra_t	– teoretyczna wartość parametru Ra
R_e	– granica plastyczności na rozciąganie
R_f	– promień freza
Rk	– głębokość rdzenia chropowatości
Rku	– współczynnik nachylenia profilu (kurioza)
R_m	– maksymalna wysokość nierówności, wytrzymałość doraźna na rozciąganie
$Rmr(c)$	– udział materiałowy profilu
R_o	– wytrzymałość rozdzielcza
R_p	– wysokość najwyższego wzniesienia profilu
R_{pk}	– zredukowana wysokość wzniesień
R_q	– średnia kwadratowa rzędnych profilu
R_{sk}	– współczynnik asymetrii profilu (skośność)
RS_m	– średnia szerokość rowków elementów profilu
R_t	– całkowita wysokość profilu
R_v	– głębokość najniższego wgłębienia profilu
R_{vk}	– zredukowana głębokość wgłębień
R_z	– największa wysokość profilu
R_{z_t}	– teoretyczna wartość parametru R_z
$R_{z_{tg}}$	– teoretyczna wartość parametru R_z uwzględniająca efekt wygładzenia nierówności
$R\Delta q$ (Rd_q)	– średni kwadratowy wznios profilu
S	– cena sprzedaży wyrobu

S, S'	– krawędź skrawająca główna, pomocnicza
t	– czas
t_j	– czas jednostkowy
t_{jmin}	– minimalny koszt jednostkowy
t_k	– temperatura kontaktowa
t_m, t_n	– czas maszynowy, niemaszynowy
t_o	– temperatura otoczenia
t_{opt}	– optymalna temperatura skrawania
t_s	– temperatura w strefie poślizgu (pierwotnych odkształceń plastycznych)
t_t	– temperatura w strefie wtórnych odkształceń plastycznych (tarcia)
t_z	– czas zamiany stępionego narzędzia
$t_{\gamma sr}, t_{\alpha sr}$	– średnia temperatura na powierzchni natarcia i przyłożenia
T	– okres trwałości ostrza
T_e	– ekonomiczna trwałość ostrza
T_{ef}	– trwałość największej efektywności (zysku)
T_{kr}	– temperatura krytyczna na wykresie Salomona
T_{mod}	– zmodyfikowana temperatura odkształcenia
T_{sh}	– temperatura na płaszczyźnie poślizgu
T_t	– temperatura topnienia
T_w	– trwałość największej wydajności
T_{γ}, T_{α}	– temperatura styku od strony powierzchni natarcia i przyłożenia
u	– wysokość strefy zastoju
v_c	– prędkość skrawania
v_{ce}	– prędkość skrawania dla najmniejszych kosztów (ekonomiczna prędkość skrawania)
v_{cef}	– prędkość skrawania dla największego zysku
$v_{ch} (v_w)$	– prędkość ruchu wióra
v_{cT}	– okresowa prędkość skrawania
v_{cW}	– prędkość skrawania dla największej wydajności
$v_s (v_{sh})$	– prędkość poślizgu
V_{ch}, V_{skr}	– objętość wióra, objętość warstwy skrawanej
VB_B	– średnia szerokość pasma zużycia powierzchni przyłożenia
VB_{Bmax}	– maksymalna szerokość pasma zużycia powierzchni przyłożenia
VB_C	– szerokość pasma zużycia naroża
VB_N	– szerokość zużycia skoncentrowanego
w	– szerokość strefy zastoju
$W_{g'}, W_c$	– współczynniki we wzorze Taylora uwzględniające wpływ rowka i powłoki
W_p	– wydajność produkcji

W_s, W_r	– praca odkształcenia postaciowego i rozciągania
x_t, x_T	– przemieszczenia narzędzia względem przedmiotu obrabianego
Z	– przewężenie względne
α	– rodzina linii poślizgu, dyfuzyjność cieplna
$\alpha_f, \alpha_n, \alpha_o, \alpha_p$	– kąty przyłożenia: boczny, normalny, ortogonalny (główny), tylny
β	– wskaźnik zlokalizowanego płynięcia, rodzina linii poślizgu
$\beta_f, \beta_n, \beta_o, \beta_p$	– kąty ostrza: boczny, normalny, ortogonalny (główny), tylny
ΔR_{z_p}	– przyrost wysokości nierówności w wyniku plastycznego płynięcia materiału
ΔR_{z_s}	– przyrost wysokości nierówności wywołany sprężystym powrotem WW
ΔR_{z_α}	– przyrost wysokości nierówności wywołany tarciem powierzchni przyłożenia o nierówności powierzchni
ΔR_{z_d}	– przyrost wysokości nierówności w wyniku względnych przemieszczeń ostrza i przedmiotu obrabianego
Δs	– grubość strefy poślizgu
ε	– odkształcenie liniowe
ε_b	– odkształcenie wióra przy zginaniu
ε_i	– intensywność odkształcenia
ε_{max}	– graniczne odkształcenie materiału wióra przy rozciąganiu
$\bar{\varepsilon}$	– odkształcenie zastępcze, odkształcenie logarytmiczne
$\dot{\varepsilon}$	– prędkość odkształcenia
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	– odkształcenia główne
γ	– odkształcenie postaciowe, współczynnik losowości profilu chropowatości powierzchni
$\gamma_{eff}, \gamma_{nn}$	– efektywny, rzeczywisty kąt natarcia
$\gamma_f, \gamma_n, \gamma_o, \gamma_p$	– kąty natarcia: boczny, normalny, ortogonalny (główny), tylny
γ_{max}	– maksymalne odkształcenie postaciowe
γ_{sh}	– odkształcenie poślizgu
$\dot{\gamma}_{max}$	– maksymalna prędkość odkształcenia postaciowego
η	– kąt zgniotu, współczynnik długości styku
η_c	– kąt spływu wióra
η_s, η_b	– kąt spływu wióra boczny i tylny
ϑ	– bezwymiarowy współczynnik tłumienia
φ_f	– kąt fazowy
φ_i	– intensywność odkształcenia (w mierze logarytmicznej)
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	– logarytmy współczynników spęczenia k_{fr} , k_{br} i k_l
Φ	– kąt poślizgu
Φ_n, Φ_l	– składowa kąta poślizgu normalna i równoległa do krawędzi skrawającej

κ	– dyfuzyjność cieplna
κ_r, κ'_r	– kąty przystawienia: główny, pomocniczy
λ	– przewodność cieplna właściwa
λ_s	– kąt pochylenia krawędzi skrawającej
Θ, Θ_n	– kąt tarcia, normalny kąt tarcia
μ	– współczynnik tarcia, współczynnik uwielokrotnienia amplitudy drgań
μ_n, μ_m	– składowa adhezyjna i mechaniczna współczynnika tarcia
μ_α	– średni współczynnik tarcia wióra o powierzchnię przyłożenia
μ_ε	– wskaźnik odkształceń Lodego
μ_γ	– średni współczynnik tarcia wióra o powierzchnię natarcia
ρ	– gęstość materiału
σ	– kąt nachylenia nakładanego zwijacza wióra
σ_i	– intensywność naprężenia
σ_k	– naprężenie normalne w strefie styku wiór–ostrze
σ_p	– naprężenie uplastyczniające
σ_{rz}	– naprężenie rzeczywiste w próbie rozciągania
σ_s	– naprężenie normalne na płaszczyźnie poślizgu
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	– naprężenia główne
τ	– kąt odchylenia wióra, opóźnienie czasowe w regeneracji śladu
τ_a	– wytrzymałość na ścinanie złączy adhezyjnych
τ_k	– naprężenie styczne w strefie styku wiór–ostrze
$\tau_s (\tau_{sh})$	– naprężenie styczne (poślizgu)
ω	– częstość drgań swobodnych, kąt działania
ω_F	– częstość drgań wymuszonych
ω_0	– częstość drgań własnych
ξ	– współczynnik pilokształtności wióra
ψ	– kąt włóknistości wióra

Skróty

2D	– dwuwymiarowy (układ)
3D	– trójwymiarowy (układ)
A/D	– przetwornik analogowo-cyfrowy
ACG	– sterowanie adaptacyjne graniczne
ACO	– sterowanie adaptacyjne optymalizujące
ACT	– sterowanie adaptacyjne technologiczne
AE	– emisja akustyczna
AE RMS	– wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej
AI	– sztuczna inteligencja
ANNs	– sztuczne sieci neuronowe

APSD	– gęstość widmowa mocy sygnału
ASO	– autonomiczna stacja obróbkowa
CAD	– wspomagane komputerowo projektowanie
CAM	– wspomagane komputerowo wytwarzanie
CBN	– (RBN) regularny azotek boru
CCD	– system wizyjny złożony ze sprzężonych kamer TV
CCS	– ciecz chłodząco-smarująca
CIM	– zintegrowane komputerowo wytwarzanie
CNC	– sterowanie numeryczne komputerowe
CVD	– chemiczne (niskotemperaturowe) osadzanie z pary
DM	– wytwarzanie cyfrowe
DNiPS	– diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania
EDM	– obróbka elektroerozyjna
EL	– odcinek elementarny <i>l_r</i>
EM	– emulsja olejowa
EP	– dodatek do olejów mineralnych typu extreme pressure
ESO	– elastyczny system obróbkowy
FFBP	– sieć neuronowa typu propagacji wstecznej
FFT	– szybka transformacja Fouriera
FTP	– protokół transferu pliku
GA	– algorytm genetyczny
HB	– twardość Brinella
Hi-E	– obszar zalecanych prędkości skrawania
HEM	– obróbka wysokoefektywna
HM	– obróbka na twardo
HPC	– obróbka wysokowydajna
HPM	– obróbka części na twardo
HRC	– twardość wg Rockwella w skali C
HSC	– skrawanie z dużą prędkością
HSM	– obróbka z dużą prędkością
HVM	– obróbka z dużą prędkością obrotową wrzeciona
IMS	– inteligentny system obróbkowy
IR	– promieniowanie podczerwone
IT	– technologia informacyjna
KSO	– katastroficzne stępienie ostrza
LAM	– obróbka wspomagana laserem
MDB	– baza danych o skrawalności materiałów
MDS	– układ masowo-dyssypacyjno-sprężysty
MEB	– (BEM) metoda elementów brzegowych
MEMS	– miniaturowy system mechano-elektryczny
MES	– (FEM) metoda elementów skończonych
mMT	– obrabiarka do obróbki w skali mezo/mikro
MPL	– metoda programowania liniowego

MQC	– obróbka ze zminimalizowanym chłodzeniem
MLQ	– obróbka ze zminimalizowanym smarowaniem
MRS	– (DEM) metoda różnic skończonych
OUPN	– układ obrabiarka–uchwyt–przedmiot–narzędzie
PAM	– obróbka ze wspomaganiem plazmą
PCBN	– polikrystaliczny azotek boru
PCD	– polikrystaliczny diament
PKM	– obrabiarka o kinematycznej strukturze równoległej
PLC	– programowalny sterownik logiczny
PLM	– zarządzanie cyklem życia produktu
PVD	– fizyczne (wysokotemperaturowe) osadzanie z pary
RUM	– rotacyjna obróbka ultradźwiękowa
SAM	– obróbka ze wspomaganiem sensorycznym
SAIM	– wspomagany sensorycznie inteligentny system obróbkowy
SEM	– mikroskopia skaningowa
SF	– front poślizgu
SGP	– struktura geometryczna powierzchni
SL	– odcinek pomiarowy ln
SM	– zrównoważone wytwarzanie
STE	– siła termoelektryczna
SUS	– swobodne ukośne (nieortogonalne) skrawanie
TAM	– obróbka wspomagana termicznie
TMS	– system monitorowania stanu ostrza
TWW	– technologiczna warstwa wierzchnia
UAM	– obróbka ze wspomaganiem drgań ultradźwiękowych
UHSM	– obróbka z ultrawysokimi prędkościami
UMC	– skrawanie ultraprecyzyjne
VAM	– obróbka ze wspomaganiem drgań
VCS	– system kompensacji objętościowej
VF	– wirtualna fabryka
VMT	– wirtualna obrabiarka
VHM	– ultradrobnoziarnisty węgiel spiekany
WW	– warstwa wierzchnia

Wykaz norm wykorzystanych w książce

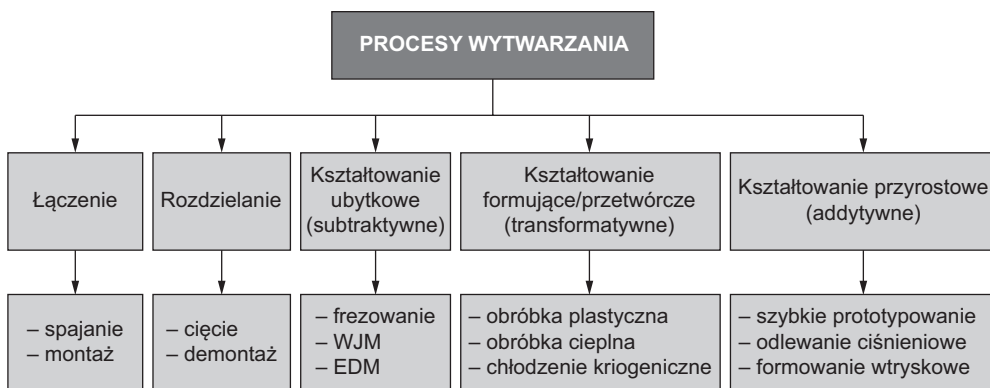
1. **PN-92/M-01002/01:** Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ścierniej. Geometria części roboczej narzędzi skrawających. Terminologia ogólna, układy odniesienia, kąty narzędzia i kąty robocze oraz łamacze wióra.
2. **PN-92/M-01002/02:** Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ścierniej. Geometria części roboczej narzędzi skrawających. Ogólne wzory konwersji kątów narzędzia i kątów roboczych.

3. **PN-92/M-01002/03:** Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ścierniej. Wielkości geometryczne i kinematyczne w obróbce skrawaniem.
4. **PN-92/M-01002/04:** Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ścierniej. Siły, energia i moc.
5. **PN-ISO 3685 (PN-83/M-58350):** Badanie trwałości noży tokarskich punktowych.
6. **PN-86/H-85022:** Stal szybko tnąca. Gatunki.
7. **PN-92/M-18000:** Płytki wieloostrzowe (wymienne) do narzędzi skrawających. Oznaczanie.
8. **PN-88/H-89500:** Węglik spiekane. Gatunki.
9. **PN-87/M-04251:** Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów.
10. **PN-87/M-04256/02:** Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Terminologia ogólna.
11. **PN-87/M-04250:** Warstwa wierzchnia. Terminologia.
12. International Standard Ref. No. **ISO 3685-1977 (E):** Tool-life testing with single-point turning tools.
13. International Standard Ref. No. **ISO 3002/1-1982 (E):** Basic quantities in cutting and grinding. **Part 1:** Geometry of the active part of cutting tools. General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers.
14. International Standard Ref. No. **ISO 3002/3-1984 (E):** Basic quantities in cutting and grinding. **Part 3:** Geometric and kinematic quantities in cutting.
15. International Standard Ref. No. **ISO 3002/4-1984 (E):** Basic quantities in cutting and grinding. **Part 4:** Forces, energy, power.

Ogólna charakterystyka procesu skrawania

1.1. Klasyfikacja procesów obróbki ubytkowej

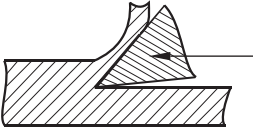
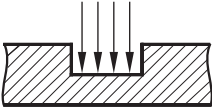
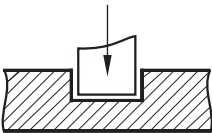
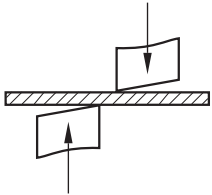
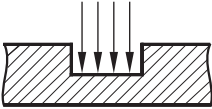
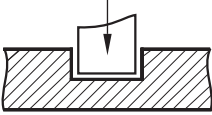
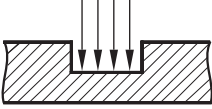
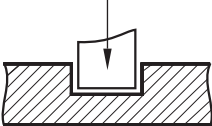
Obróbka ubytkowa jest jedną z pięciu podstawowych grup ogółu technologii wytwórczych obejmujących procesy *łączenia*, *rozdzielania* oraz *kształtowania ubytkowego* (subtraktywnego), *bezubytkowego* (przetwórczego, transformatywnego) i *przyrostowego* (addytywnego) (patrz rys. 1.1). Podział ten zaproponowano [20, 32] w związku z widocznym w ostatnich latach intensywnym rozwojem hybrydowych procesów wytwórczych. Jak wynika z rys. 1.1 i rzeczywistego stanu przemysłu wytwórczego, istotnego znaczenia nabierają procesy kształtowania przyrostowego, które ograniczają, a w wielu przypadkach eliminują konwencjonalne procesy ubytkowe i bezubytkowe. Zasady tworzenia hybrydowych procesów wytwórczych na bazie pięciu grup procesów podstawowych sklasyfikowanych na rys. 1.1 i ich praktyczne zastosowania zostaną omówione w rozdz. 12.



Rys. 1.1. Podział procesów wytwórczych na grupy [32]

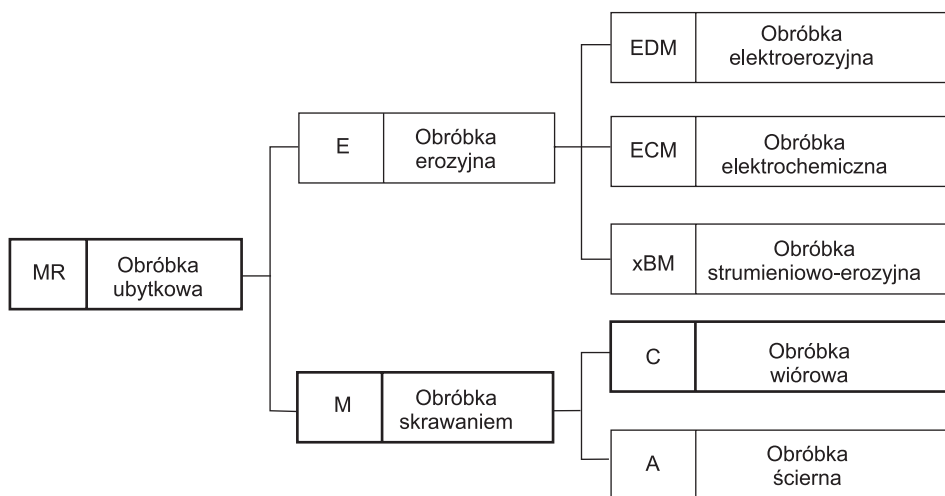
Podstawowe techniki wytwarzania stosowane obecnie do kształtowania elementów maszyn i urządzeń technicznych to kształtowanie *bezubytkowe*, do którego zalicza się odlewanie i obróbkę plastyczną, oraz obróbka *ubytkowa*,

Tab. 1.1. Klasyfikacja procesów kształtowania ubytkowego oparta na rodzaju wykorzystanej energii wg Altinga [10]

Rodzaj i grupa procesu podstawowego		Schemat usuwania materiału	Przykłady procesów
Mechaniczny	I		Obróbka skrawaniem: toczenie, frezowanie, wiercenie, szlifowanie itd.
	II		Obróbka wysokociśnieniowym strumieniem wody (WJM), obróbka wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym (AWJM), obróbka strumieniowo-ścierna, aerościerna itd.
	III		Obróbka udarowo-ścierna (ultradźwiękowa) (USM)
	IV		Wykrawanie, dziurkowanie, cięcie
Termiczny	II		Obróbka przez topienie i parowanie, obróbka wiązką elektronów (EBM), obróbka wiązką lasera (LBM)
	III		Obróbka elektroerozyjna (EDM)
Chemiczny	II		Obróbka chemiczna (wytrawianie) (CM), obróbka przez wypalanie
	III		Obróbka elektrochemiczna (ECM)

obejmująca procesy sklasyfikowane w tab. 1.1. Redukcja masy półfabrykatu może zasadniczo następować z wykorzystaniem energii mechanicznej, termicznej i chemicznej, chociaż coraz częściej łączy się oddziaływanie dwóch lub więcej rodzajów energii, jak w przypadku obróbki *hybrydowej*.

Najbardziej rozpowszechniony, dzięki dużej uniwersalności i dokładności kształtowania, jest *proces skrawania* oparty na modelu usuwania warstw nadkładu materiału w postaci wiórów przez ostrze skrawające narzędzia. W krajowej literaturze technicznej [15, 23, 26] przyjęto dzielić *obróbkę skrawaniem* na *obróbkę wiórową* i *obróbkę ścierną* (rys. 1.2), chociaż w obydwóch przypadkach powstaje wiór. Dokonuje się jednakże rozróżnienia między wiórami widocznymi „gołym okiem”, charakterystycznymi dla obróbki wiórowej, i niedostrzegalnymi zwykle drobnymi wiórami (mikrowiórami, opiłkami), które tworzą się podczas obróbki ścierniej. Podlegają one często, jak w przypadku szlifowania, w części albo w całości topnieniu, względnie spalaniu.



Rys. 1.2. Klasyfikacja sposobów obróbki ubytkowej wg Kaczmarka [15] i Oczosia [22, 23]

Z tych względów precyzyjniejszy wydaje się być podział na obróbkę narzędziami o określonej (zdefiniowanej) geometrii ostrza (ang. *machining with geometrically defined cutting edges*) i obróbkę narzędziami o nieoznaczonej ściśle liczbie i nieokreślonej geometrii ostrzy (ang. *machining with geometrically undefined cutting edges*) [10, 18]. W pierwszym przypadku są używane narzędzia jedno- i wieloostrowe, w drugim natomiast narzędzia ściernie spojone i nasypowe, zawiesziny ściernie, kształtki i luźne ziarna ściernie. W potocznym rozumieniu, które nie jest ściśle, obróbka narzędziami o określonej geometrii ostrza odpowiada obróbce wiórowej. Klocke [18] uwzględnia, zgodnie z DIN 8580, w grupie procesów obróbki skrawaniem procesy, w których wyjściowy kształt półfabrykatu jest zmieniany wskutek osłabienia kohezji materiału.

1.2. Rola obróbki skrawaniem we współczesnym wytwarzaniu

Łączny udział obróbki skrawaniem w przemyśle maszynowym jest zwykle oceniany na ok. 50% i wg prognoz Międzynarodowej Akademii Inżynierii Produkcji (CIRP) udział ten będzie nadal znaczący. Wynika to ze wzrastających możliwości zastosowań skrawania i uzyskiwanych dokładności wymiarowych i jakości powierzchni. Oprócz konwencjonalnych zastosowań do kształtowania części z metali i stopów technicznych o dowolnych własnościach mechanicznych możliwa jest obróbka kompozytów na osnowie metalowej i ceramicznej, ceramiki technicznej, a w przypadku obróbki ultradokładnej (nanoobróbki) także elementów optycznych i elektronicznych [24].

Procesy obróbki skrawaniem spełniają współczesne, surowe wymagania dotyczące jakości wyrobów, wydajności i efektywności, a także niezawodności, energochłonności i ekologiczności. W automatyzowanych systemach obróbkowych dochodzi dodatkowy wymóg elastyczności [3, 8, 19].

Jak wynika z rys. 1.3, procesy skrawania są konkurencyjne w stosunku do dokładnych procesów odlewania (kokilowego odlewania ciśnieniowego, odlewania metodą traconego wosku) i obróbki plastycznej na zimno, ponieważ zapewniają porównywalną lub wyższą dokładność i jakość powierzchni przy tym samym wskaźniku kosztów. Wskaźnik kosztów równy 1 przyjęto dla obróbki plastycznej na gorąco i odlewania w formach piaskowych, czyli nadal popularnych procesów wytwarzania półfabrykatów. Należy zwrócić uwagę, że osiągnięcie chropowatości powierzchni wynoszącej $0,1\text{ }\mu\text{m}$ i tolerancji wymiarowej poniżej $10\text{ }\mu\text{m}$ zapewniają procesy bardzo dokładnej obróbki ścierniej (szlifowania, polerowania i docierania), jednakże wiąże się to z wyraźnym wzrostem kosztów (wskaźnik kosztów w granicach $32\div 64$). Tak więc ich stosowalność jest ograniczona do powierzchni, od których wymaga się specjalnych własności użytkowych.

Jakość technologiczną wyrobu charakteryzuje struktura geometryczna powierzchni (błędy kształtu, falistość, chropowatość, wady powierzchni) oraz fizyczne właściwości warstwy wierzchniej (mikrostruktura, utwardzenie, naprężenia własne). Dokładność obróbki konwencjonalnej rozpatrywana jest zwykle w funkcji cech wszystkich składników układu OUPN (głównie dokładności wykonania i ustalania oraz sztywności statycznej i dynamicznej) oraz parametrów skrawania ze względu na ich związki z siłami, temperaturą i zużyciem ostrza. Podstawowe źródło błędów upatruje się w niestabilności i sprężystym odkształcaniu układu OUPN.

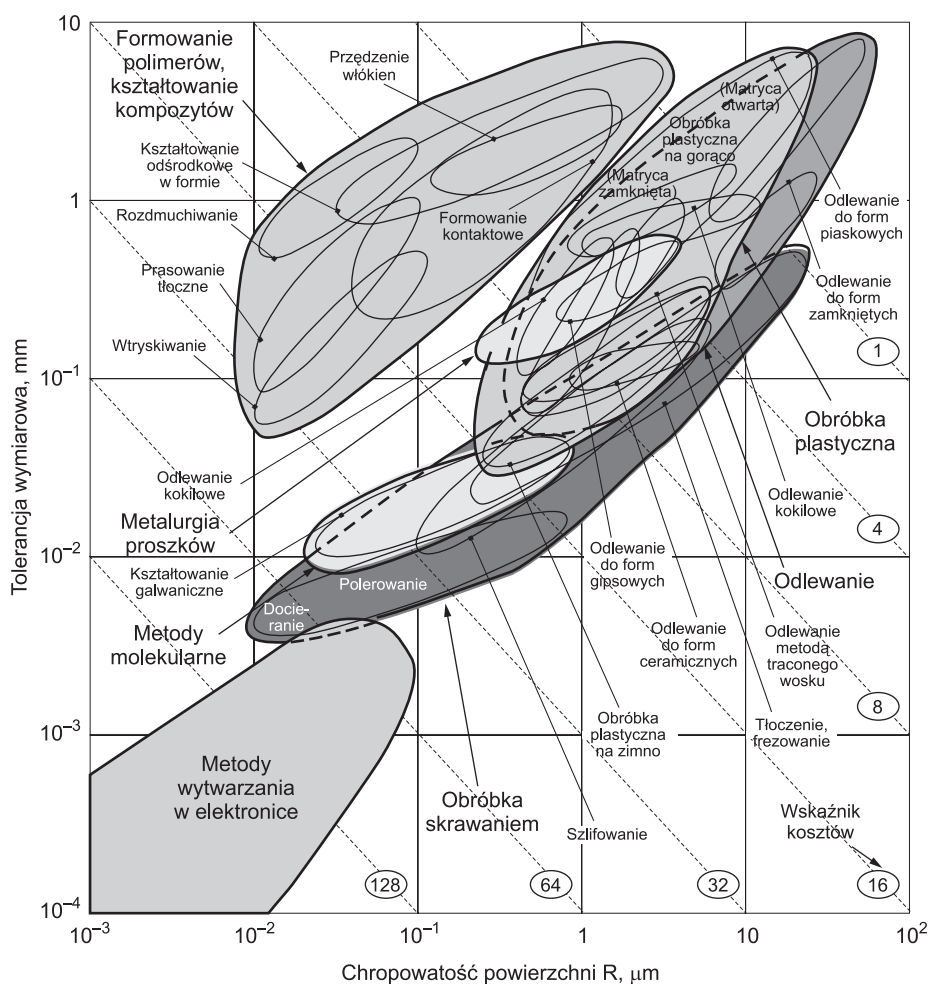
W miarę wzrostu dokładności obróbki znaczenia nabierają odkształcenia cieplne, wpływ otaczającego środowiska (drżania, temperatura, wilgotność) oraz stan krawędzi skrawającej (ostrość, szczyrbałość) i obrabianego materiału (obecność naprężeń, anizotropia). Poglądowo możliwości wzrostu do-

kładności w procesach obróbki ubytkowej od normalnych wymagań w przemyśle maszynowym (IT8-IT5) aż do nanodokładności przedstawia rys. 1.4.

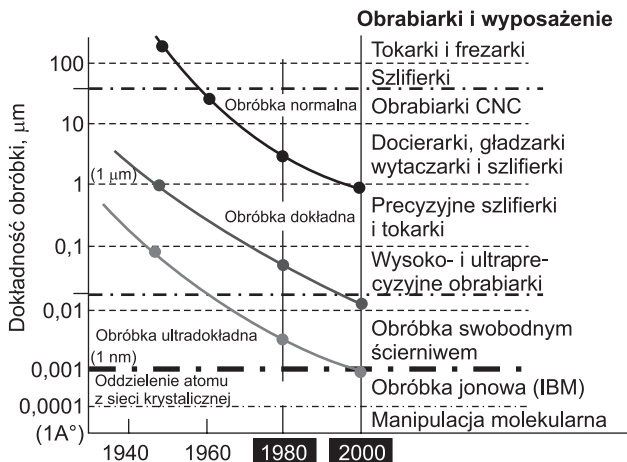
Wydajność procesu skrawania jest umowną wielkością określającą prędkość ubywania materiału w jednostce czasu. Może być definiowana jako wydajność objętościowa, masowa (wagowa), powierzchniowa i liniowa [6]. *Wydajność objętościowa* jest iloczynem technologicznych parametrów skrawania:

$$\text{dla toczenia} \quad Q_v = 1000 v_c f a_p \text{ mm}^3/\text{min} \quad (1.1a)$$

$$\text{dla frezowania} \quad Q_v = 1000 v_f a_p a_e \text{ mm}^3/\text{min} \quad (1.1b)$$



Rys. 1.3. Związki wymaganej tolerancji wymiarowej i chropowatości powierzchni z kosztami w różnych procesach wytwórczych [2]



Rys. 1.4. Wzrost osiągniętej dokładności obróbki ubytkowej wg Taniguchiego [10, 21]

Dlatego zwiększenie każdego z tych parametrów spowoduje proporcjonalne skrócenie czasu skrawania t_{skr} , który odpowiada czasowi trwania styku ostrza z materiałem obrabianym.

$$t_{skr} = \frac{l_{skr}}{fn} i \quad (1.2)$$

Gdzie: l_{skr} – długość drogi skrawania, f – posuw obrotowy, n – prędkość obrotowa wrzeciona.

Należy jednak liczyć się ze skróceniem okresu trwałości ostrza, które jest szczególnie widoczne przy wzroście prędkości skrawania. W rezultacie częstsza wymiana ostrza może doprowadzić do spadku wydajności skrawania.

Jeśli wydajność obróbki mierzy się czasem wykonania jednej sztuki wyrobu, czyli *czasem jednostkowym* $t_j = t_m + t_n$, to uwzględnia się wpływ rzeczywistego czasu skrawania (czasu maszynowego) t_m oraz czasów niemaszynowych t_n , które obejmują ruchy ustawcze i jałowe, wymianę narzędzi i przestoje. Liczbę sztuk wyrobu wykonanych w jednostce czasu określa w takim przypadku zależność:

$$W = \frac{1}{t_j} = \frac{1}{t_m + t_n} = \frac{1}{t_n \left(1 + \frac{t_m}{t_n} \right)} \quad (1.3)$$

Analiza wzoru (1.3) prowadzi do oczywistego wniosku, że zwiększenie W przez skrócenie czasu maszynowego, np. wzrost v_c lub f , jest bardziej skuteczne przy większych wartościach wyrażenia t_m/t_n , a przy jego mniejszych wartościach rezerw w wydajności procesu należy szukać w innych składnikach wzoru, czyli czasach niemaszynowych.

Efektywność procesu jest wymiernym wskaźnikiem zysku i z tego względu jest ściśle uzależniona od kosztu wykonania jednostki wyrobu. W analizach kosztów obróbki uwzględnia się trzy podstawowe składniki: koszty maszynowe, narzędziowe i materiałowe. Nawiązując do analizy wydajności procesu, można stwierdzić, że skrócenie czasu obróbki wpływa na poprawę efektywności procesu, chociaż należy mieć na uwadze zwiększony udział kosztów narzędziowych. Natomiast udział kosztów materiałowych zmniejsza się przez dokładne wykonanie półfabrykatów, minimalizację naddatków obróbkowych (ang. *near-net-shape technology*) i ponowne zużytkowanie odpadów technologicznych.

Niezawodność procesu (w potocznym rozumieniu) jest zasadniczym wymaganiem stawianym zautomatyzowanym procesom obróbkowym. Sprowadza się do płynnej, bezzakłócenkowej i bezawaryjnej pracy urządzeń technologicznych i sterujących w czasie pojedynczych operacji, całych procesów technologicznych lub w czasie całej doby jak w przypadku systemów bezzałogowych.

Źródła zakłóceń procesu tkwią we wszystkich elementach układu obróbkowego, chociaż prawdopodobieństwo ich wystąpienia oddzielnie jest różne. Najczęstszymi przyczynami zakłóceń są: katastroficzne stępienie ostrza, kolizje narzędzia i zakłócenia/zanik łamania wióra. Rzadziej pojawiają się awarie układów sterujących i serwonapędów obrabiarek oraz obsługujących je robotów.

Konieczność wykrywania nieprzewidzianych zakłóceń, łagodzenie ich skutków, a nawet całkowite eliminowanie spowodowały rozwój układów nadzoru i diagnostyki. W klasycznych strukturach elastycznych systemów obróbkowych (ESO) i autonomicznych stacji obróbkowych (ASO) wyróżnia się oddzielny *podsystem nadzoru i diagnostyki*, co potwierdza wysoką rangę tego problemu w elastycznym wytwarzaniu [19]. Należy podkreślić, że zadaniem układu nadzoru jest osiągnięcie pożądanej jakości (optymalizacji) wytwarzania.

Ekologiczność procesu wskazuje na bezpośrednie lub pośrednie niekorzystne oddziaływanie na środowisko naturalne. Oddziaływanie bezpośrednie pochodzi od odpadów technologicznych (wiórów i pyłów), cieczy obróbkowych, hałasu i drgań. Natomiast wpływ pośredni wiąże się z ilością i rodzajem zużywanej energii oraz zmniejszaniem zasobów surowcowych. W tym znaczeniu używane jest oddzielne pojęcie *energochłonności procesu*.

W trakcie projektowania produktu, począwszy od opracowania koncepcji, konieczne jest uwzględnienie pełnego *cyklu życia produktu*, który dotyczy aspektu rynkowego lub technicznego (ang. *life cycle*). W analizie czynników wpływających na techniczny cykl życia produktów należy uwzględnić przepływ materiałów i energii z możliwością, czy wręcz koniecznością, polepszenia oddziaływania danego produktu na środowisko naturalne. Ważnym zagadnieniem jest przewidzenie ponownego wykorzystania elementów lub

odzyskania materiałów, z których jest wykonany produkt. Jest rzeczą oczywistą, że w procesie wytwarzania należy bezwzględnie stosować technologię, która ogranicza lub eliminuje odpady i nie powoduje utrudnień w produkcji.

Według Poduraeva [25] wszystkim technikom wytwarzania wyrobu ze stali można przyporządkować trzy charakterystyczne poziomy energetyczne:

- I poziom, gdy energia kształtowania nie przewyższa energii topnienia metalu, tj. $1 \times 10^4 \text{ J/cm}^3$. Proces dekohezji ma wtedy charakter zlokalizowany i przebiega w niewielkiej objętości materiału, np. obróbka plastyczna i obróbka skrawaniem.
- II poziom, obejmujący wszystkie metody kształtowania w przedziale od energii topnienia do energii parowania, np. odlewanie. Dla stali jest to zakres $(1 \div 6) \times 10^4 \text{ J/cm}^3$.
- III poziom, w którym wydatek energetyczny przewyższa energię parowania, tj. $6 \times 10^4 \text{ J/cm}^3$. Wynika to z charakteru mechanizmu rozdzielania, który polega na całkowitym zniszczeniu wiązań atomowych i jonowych. W tej grupie klasyfikuje się takie sposoby obróbki erozyjnej, jak: obróbka elektroiskrowa, elektroimpulsowa, elektrochemiczna, elektronowa i laserowa.

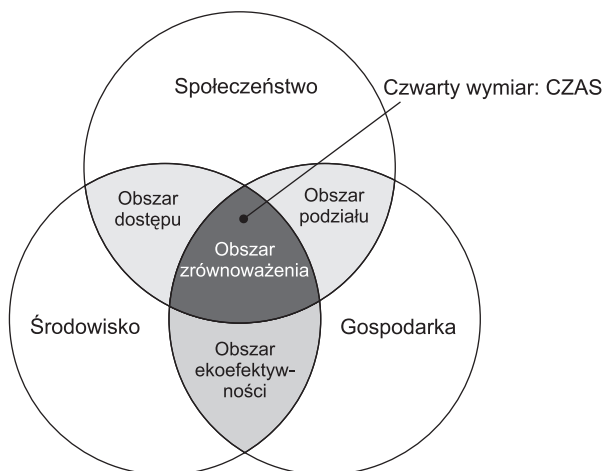
W tabeli 1.2 zestawiono charakterystyki energetyczne typowych operacji obróbki mechanicznej w powiązaniu z objętościową wydajnością procesu. Z przedstawionych w niej danych wynika, że zmniejszenie przekroju warstwy skrawanej wiąże się z wyraźnym wzrostem energii właściwej skrawania i spadkiem objętościowej wydajności procesu. Przykładowo, energia właściwa w operacji szlifowania wzrasta 100 razy w porównaniu z toczeniem. Jeśli dodatkowo uwzględni się ekologiczną korzyść toczenia na sucho, to w pełni uzasadnione jest zastępowanie szlifowania zahartowanych żeliw i stali dokładną obróbką narzędziami o określonej geometrii ostrza z materiałów super-twardych lub ceramicznych. Obróbka ta skraca proces technologiczny, a przez to zwiększa efektywność wytwarzania [17].

Obecnie dynamicznie rozwijaną koncepcją na bazie globalizacji jest zrównoważone (stabilne) wytwarzanie (ang. *sustainable manufacturing*, SM) [10, 11, 14], które dotyczy trzech obszarów: ekonomii, społeczeństwa i środowiska, oraz

Tab. 1.2. Wskaźniki energetyczne wybranych sposobów skrawania [25]

Sposób skrawania	Przekrój warstwy skrawanej, mm^2	Energia właściwa 10^3 J/cm^3	Prędkość skrawania m/s	Wydajność objętościowa cm^3/s
Toczenie	1,0	0,5÷0,7	1,5÷7,5	$5 \times 10^{-2} \div 5 \times 10$
Przeciąganie	0,5	2,5÷3,7	0,01÷0,1	$4 \times 10^{-3} \div 1 \times 10^{-1}$
Frezowanie	0,3	5,0÷7,5	2÷6	$2 \times 10^{-3} \div 1,0$
Rozwiercanie	0,1	12÷30	0,15÷1,6	$5 \times 10^{-3} \div 5 \times 10^{-1}$
Szlifowanie	5×10^{-5}	55÷70	25÷30	$5 \times 10^{-3} \div 2 \times 10^{-2}$

ich wzajemnych oddziaływań przedstawionych na rys. 1.5. Możliwe kierunki implementacji koncepcji SM, w tym do procesów obróbki ubytkowej, zostaną zasygnalizowane w rozdz. 1.4.



Rys. 1.5. Fundamenty zrównoważonego rozwoju [7, 14]

Uważa się, że docelowym paradygmatem w tym obszarze realizowanym w ciągu XXI w. będzie *konkurencyjne, stabilne wytwarzanie* (ang. *competitive sustainable manufacturing*, CSM) wpływające na:

- przemysł wytwórczy, tj. produkty i usługi, procesy, modele biznesu, i ściśle z nim związany
- system edukacyjno-badawczo-technologiczno-innowacyjnego rozwoju (ang. *Education, Research and Technological Development, Innovation, E&RTD&I*).

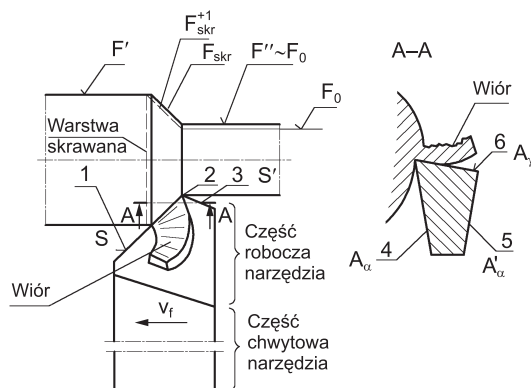
Przewiduje się w przyszłości rozwój i wdrażanie systemu CSM w każdym regionie i kraju świata. Szczególny nacisk, co jest ważne dla uczelni, będzie właśnie skierowany na tworzenie efektywnych powiązań między strategiami wywarzania a edukacją, nauką i rozwojem technologicznym. W Unii Europejskiej taką ponadrządową inicjatywą jest program EUREKA, którego zadaniem jest wzrost konkurencyjności w przemyśle europejskim przez wspieranie pro-rynkowych, innowacyjnych badań rozwojowych. Z tych haseł rodzą się konkretne wyzwania inżynierskie, aby projektować produkty i procesy z większą przydatnością dla społeczeństwa i mniejszą szkodliwością dla środowiska.

Obecnie wiodącą strategią rozwoju przemysłu jest tzw. Przemysł 4.0 (Produkcja 4.0) (ang. *Industry 4.0*, *Production 4.0*), traktowana jako czwarta rewolucja przemysłowa, oparta na cyfryzacji, doskonałych narzędziach wizualizacji i nowoczesnych systemach informatycznych, które ułatwiają wymianę i przetwarzanie danych w „chmurze” (ang. *cloud computing*). Istotnymi elementami Produkcji 4.0, która docelowo oznacza urzeczywistnienie *inteligentnej fabryki*,

jest bezprzewodowe przesyłanie danych z sensorów do internetu, stosowanie na dużą skalę wirtualnych symulacji obiektów rzeczywistych i inteligentnych komunikacji (interfejsów) maszyna–maszyna i maszyna–człowiek oraz nowoczesnych technik wytwórczych. Początek czwartej rewolucji przemysłowej, w oryginale niemieckim *Industrie 4.0*, datuje się na 2011 r., kiedy rząd Niemiec przyjął projekt strategii komputeryzacji wysoko zaawansowanych procesów technik wytwórczych. W 2013 r. przyjęto końcową koncepcję wdrożeniową Przemysłu 4.0 opracowaną przez firmę Robert Bosch GmbH [33].

1.3. Kinematyka procesu i parametry skrawania

Poglądowo proces usuwania nadmiaru obróbkowego i uczestniczące w nim elementy przedstawiono na rys. 1.6.

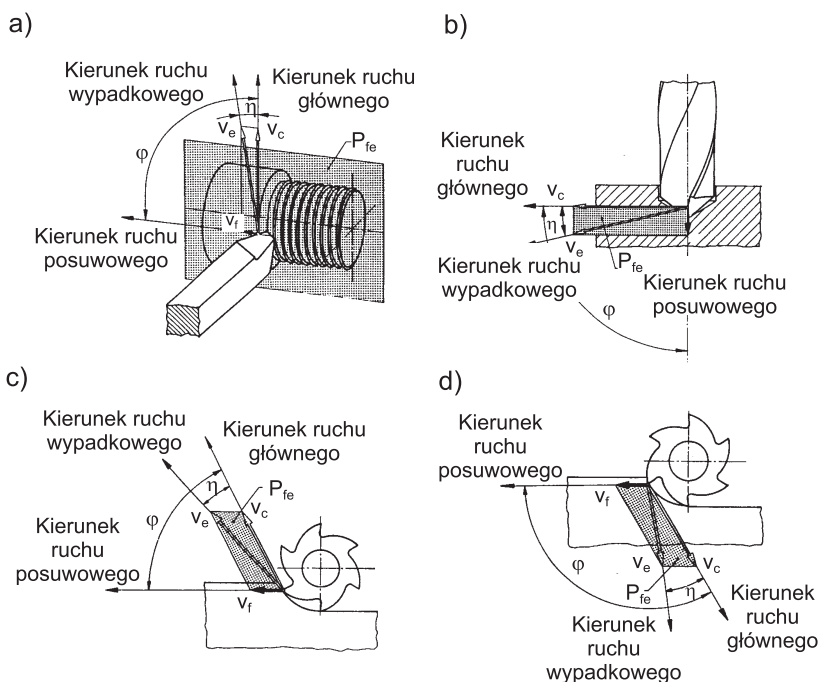


Rys. 1.6. Schemat realizacji procesu skrawania na przykładzie toczenia: 1 – główna krawędź skrawająca, 2 – naroże ostrza, 3 – pomocnicza krawędź skrawająca, 4 – powierzchnia przyłożenia, 5 – ostrze skrawające, 6 – powierzchnia natarcia

W rzeczywistości dodatkowo wymaga się odpowiedniej *kinematyki* procesu, czyli układu ruchów prostoliniowych lub obrotowych nadawanych narzędziu i przedmiotowi obrabianemu. Usytuowanie kierunków ruchów skrawania dla toczenia, wiercenia i frezowania przedstawiono na rys. 1.7. W przypadku toczenia (rys. 1.7a) ruch obrotowy, zwany *ruchem głównym*, realizuje przedmiot obrabiany, który obraca się z zależną od warunków obróbki prędkością obwodową v_c , zwaną *prędkością skrawania*. Ciągłość procesu w czasie zapewnia prostoliniowe przemieszczanie narzędzia z prędkością liniową v_f , określaną jako *prędkość ruchu posuwowego*. Geometryczną sumą tych dwóch prędkości jest *prędkość ruchu wypadkowego* v_e . Należy zauważyć, że wektory trzech wymienionych prędkości leżą na jednej płaszczyźnie, którą określa się nazwą *płaszczyzny roboczej (bocznej)* P_{fe} , a zależnie od sposobu skrawania kąt φ między kierunkami ruchu głównego i posuwowego może być mniejszy, równy lub większy od 90° .

W praktyce zamiast prędkości ruchu posuwowego są używane *posuwy*: obrotowy f w mm/obr, minutowy f_t w mm/min i na ostrze f_z w przypadku narzędzi wieloostrzowych. Prędkość skrawania v_c łącznie z posuwem f i głębokością skrawania a_p noszą nazwę *technologicznych parametrów skrawania*.

Głębokość skrawania jest definiowana jako odległość między powierzchnią obróbką F'' i obrabianą F' (zob. rys. 1.6). Czynna część krawędzi skrawającej S_a odwzorowuje chwilową powierzchnię F_{skry} nazywaną *powierzchnią przejściową*, która łączy F' i F'' . Powierzchnia nominalna F_o różni się od powierzchni obróbkowej (rzeczywistej) F'' ze względu na błędy kształtu oraz pozostawiane ślady obróbkowe obejmujące falistość i chropowatość.



Rys. 1.7. Kinematyka podstawowych sposobów skrawania (a) toczenia – $\varphi = 90^\circ$; (b) wiercenia – $\varphi = 90^\circ$; (c) frezowania przeciwbieżnego – $\varphi < 90^\circ$; (d) frezowania współbieżnego – $\varphi > 90^\circ$

W zależności od stosowanych narzędzi i cech kinematycznych oraz osiągalnej dokładności wymiarowo-kształtowej w procesie skrawania wyróżnia się:

- *Sposoby skrawania*, ze względu na cechy kinematyczne obrabiarki, narzędzia i przedmiotu obrabianego. Sposobami skrawania są: toczenie, wiercenie, rozwiercanie, frezowanie, przeciąganie itd. Należy zaznaczyć, że dane narzędzie nie musi być przypisane tylko do jednego sposobu skrawania, np. frez może być również stosowany w odmiennych warunkach kinematycznych, np. w toczeniu. Powstały z połączenia frezowania i toczenia sposób obróbki powierzchni obrotowych znany jest pod nazwą *frezotoczenia* (rozdz. 12.4).

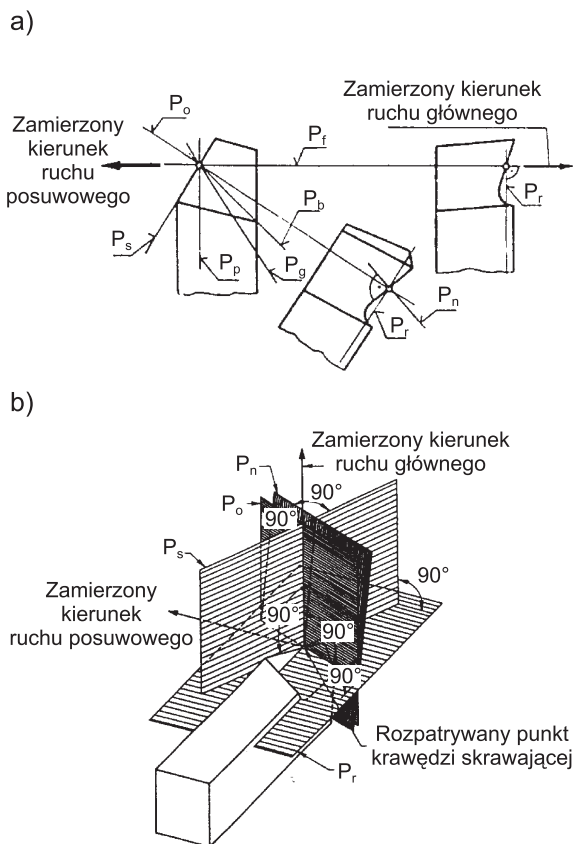
- *Odmiany skrawania* definiujące kierunki ruchów podstawowych lub usytuowanie obrabianej powierzchni w bryle przedmiotu. Przykładowo, w toczeniu wyróżnia się: toczenie wzdłużne, stożkowe i czołowe, toczenie zewnętrzne (obtaczanie) i wewnętrzne (wytaczanie, roztaczanie) oraz ich kombinacje, np. zewnętrzne toczenie wzdłużne.
- *Rodzaje skrawania* związane z uzyskiwaną dokładnością wymiarową-kształtową i jakością powierzchni. W każdym ze sposobów rozróżnia się cztery rodzaje obróbki: *zgrubną, średnio dokładną, dokładną i bardzo dokładną* (niekiedy *ultradokładną*, gdy dokładność sięga nanometrów, jak na rys. 1.4). Ze względu na stadium procesu technologicznego wydziela się również *obróbkę wstępną, kształtującą i wykańczającą* (obecnie także *wykończeniową*).

Często w zaleceniach firm narzędziowych i w praktyce produkcyjnej podaje się rodzaje skrawania bez uwzględnienia tych kryteriów, np. obróbkę zgrubną i wykańczającą. Szczegółowy podział sposobów skrawania na rodzaje z uwzględnieniem klasy dokładności IT i parametru chropowatości powierzchni Ra można znaleźć w poradnikach, np. [26] lub materiałach firmowych [33].

1.4. Geometryczna charakterystyka ostrza skrawającego

Geometrię części roboczej narzędzi skrawających określa się w sposób podany w normie PN-ISO 3002-1:1996, która zastąpiła normę PN-M-01002:01:1996. Do określenia położenia geometrycznego klina skrawającego, krawędzi skrawającej, powierzchni natarcia i przyłożenia w bryle ostrza skrawającego służą cztery grupy kątów definiowane w dwóch układach odniesienia: narzędzia i roboczym. Pierwszy z układów (*układ narzędzia*) przeznaczony jest do określenia geometrii narzędzia z uwzględnieniem przewidywanych kierunków ruchów skrawania i jest używany podczas jego wykonywania i kontroli. Drugi układ (*układ roboczy*) wykorzystuje się do określenia geometrii ostrza w rzeczywistych warunkach skrawania (względem kierunku ruchu wypadkowego). Stąd też pochodzi dodatkowy (drugi) indeks e od słowa *efektywny*, czyli roboczy. W celu konwersji kątów narzędzia na kąty robocze i na odwrót wprowadzono wzory transformacyjne zestawione w oddzielnej normie PN-ISO 3002-2:1999. W niniejszym rozdziale będą przytoczone niezbędne informacje odnośnie do płaszczyzn układu narzędzia i kątów ważnych dla przebiegu procesu skrawania.

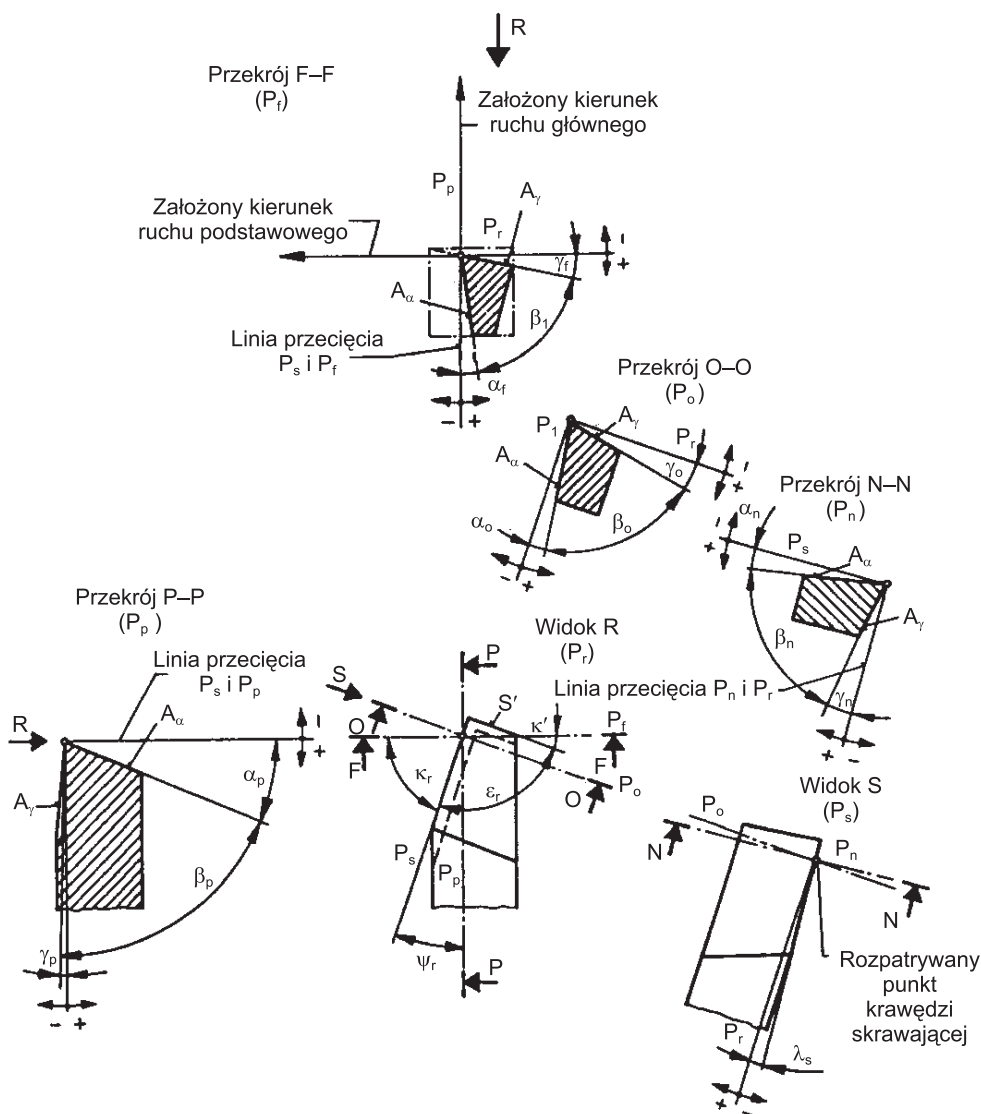
Na rysunku 1.8a przedstawiono usytuowanie zbioru płaszczyzn odniesienia w wyodrębnionej bryle części roboczej noża tokarskiego. Najpierw definiuje się płaszczyznę podstawową P_r , która przechodzi równolegle do elementu bazowego (podstawy) i jest z reguły prostopadła do kierunku ruchu głównego $\bar{v}_c$, jak na rys. 1.8b. Pozostałe płaszczyzny, definiowane w stosunku do płaszczyzny podstawowej i krawędzi skrawającej S , zestawiono w tab. 1.3.



Rys. 1.8. Płaszczyzny odniesienia w układzie narzędzia

Tab. 1.3. Definicje płaszczyzn układu narzędzia

Nazwa	Oznaczenie	Definicja	
		prostopadłe do	równoległe (stycznie) do
1) Płaszczyzna krawędzi skrawającej	P_s	P_r	S
2) Płaszczyzna ortogonalna	P_o	P_r i S	—
3) Płaszczyzna normalna	P_n	S	—
4) Płaszczyzna boczna	P_f	P_r	$\vec{v}_f$
5) Płaszczyzna tylna	P_p	P_r i P_f	—
6) Płaszczyzna największego spadku powierzchni natarcia	P_g	A_γ i P_r	—
7) Płaszczyzna największego spadku powierzchni przyłożenia	P_b	A_α i P_r	—
Oznaczenia płaszczyzn odniesionych do pomocniczej krawędzi skrawającej S' uzupełnia się znakiem <i>prim</i>			



Rys. 1.9. Kąty ostrza noża tokarskiego punktowego w układzie narzędzia

Na rysunku 1.9 przedstawiono kąty wyznaczone przez przecinanie bryły ostrza płaszczyznami odniesienia. Należy zauważyć, że definiowane kąty ostrza narzędzia są kątami dwuściennymi zawartymi między śladami przecięcia danej płaszczyzny odniesienia na powierzchniach roboczych ostrza, płaszczyznach P_r lub P_s oraz innych płaszczyznach odniesienia, gdy kąt mierzony jest w płaszczyźnie P_r . Definicje kątów narzędzia zestawione w czterech charakterystycznych grupach podano w tab. 1.4.

Tab. 1.4. Specyfikacja kątów ostrza narzędzia

I. Kąty położenia krawędzi skrawającej				
Nazwa	Oznaczenie	Płaszczyzna pomiaru	Definicja zawarty między	
1) Kąt przystawienia	κ_r	P_r	P_s	P_f
2) Kąt naroża	ε_r	P_r	P_s	P_s'
3) Kąt odchylenia krawędzi skrawającej	ψ_r	P_r	P_s	P_p
4) Kąt pochylenia krawędzi skrawającej	λ_s	P_s	P_r	S
II. Kąty położenia powierzchni natarcia				
Nazwa	Oznaczenie	Płaszczyzna pomiaru	Definicja zawarty między	
1) Kąt natarcia ortogonalny	γ_o	P_o	A_γ	P_r
2) Kąt natarcia normalny	γ_n	P_n		
3) Kąt natarcia boczny	γ_f	P_f		
4) Kąt natarcia tylny	γ_p	P_p		
5) Kąt natarcia największy	γ_g	P_g		
III. Kąty położenia powierzchni przyłożenia				
Nazwa	Oznaczenie	Płaszczyzna pomiaru	Definicja zawarty między	
1) Kąt przyłożenia ortogonalny	α_o	P_o	A_α	P_s
2) Kąt przyłożenia normalny	α_n	P_n		
3) Kąt przyłożenia boczny	α_f	P_f		
4) Kąt przyłożenia tylny	α_p	P_p		
5) Kąt przyłożenia najmniejszy	α_g	P_g		
IV. Kąty ostrza				
Nazwa	Oznaczenie	Płaszczyzna pomiaru	Definicja zawarty między	
1) Kąt ostrza ortogonalny	β_o	P_o	A_γ	A_α
2) Kąt ostrza normalny	β_n	P_n		
3) Kąt ostrza boczny	β_f	P_f		
4) Kąt ostrza tylny	β_p	P_p		

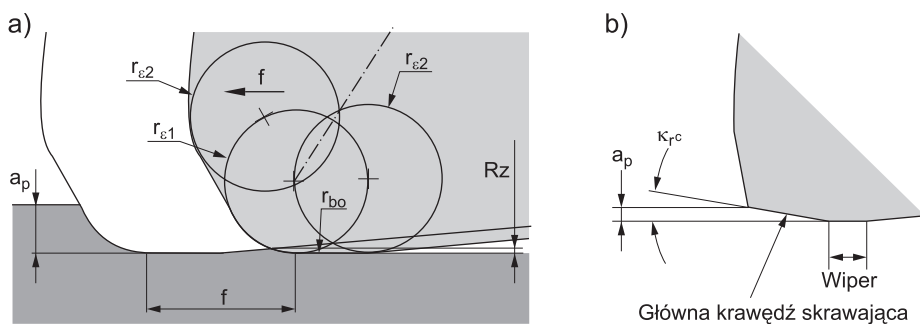
Ponieważ kąty i inne elementy geometryczne mogą zmieniać się w kolejnych punktach wzdłuż krawędzi skrawającej narzędzia, konieczne jest przemieszczanie układu odniesienia do aktualnie rozpatrywanego punktu.

Przedstawiona na rys. 1.8 i 1.9 stereometria ostrza wyróżnia się tym, że krawędzie skrawające są prostoliniowe, a powierzchnie natarcia i przyłożenia

są płaszczyznami. Ostrza rzeczywistych narzędzi skrawających podlegają z reguły modyfikacji poprawiającej ich wytrzymałość i funkcjonalność. Płytki skrawające mają geometrię różniącą się od idealnej utworzonej z płaszczyzn (patrz rys. 1.9), a powierzchni natarcia nadaje się szczególny kształt tak, aby w określonych warunkach obróbki uzyskać ukierunkowane zwijanie i łamanie wióra.

Do najważniejszych modyfikacji ostrza skrawającego należy zaliczyć:

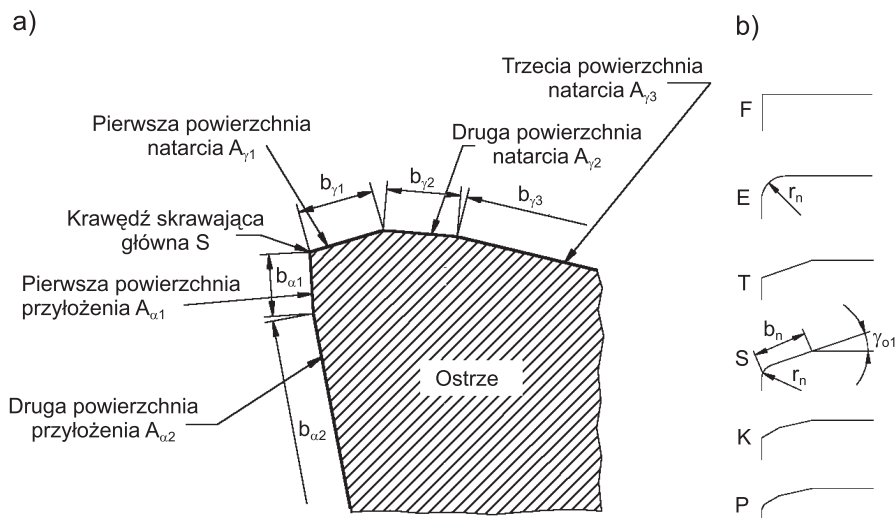
- Wprowadzenie naroża zaokrąglonego promieniem r_ε lub naroża ściętego (krawędzi przejściowej lub wygładzającej). Krawędzie wygładzające są powszechnie stosowane w płytkach do frezowania. Aby uzyskać gładką powierzchnię obrobioną, pomocniczy kąt przystawienia κ' jest w takich przypadkach równy zero. Obecnie coraz częściej stosuje się specjalne ukształtowanie naroża z częścią wygładzającą w postaci łuku okręgu o promieniu r_{bo} lub odcinka prostej (komercyjne nazwy Wiper i Xcel), które przedstawiono na rys. 1.10.



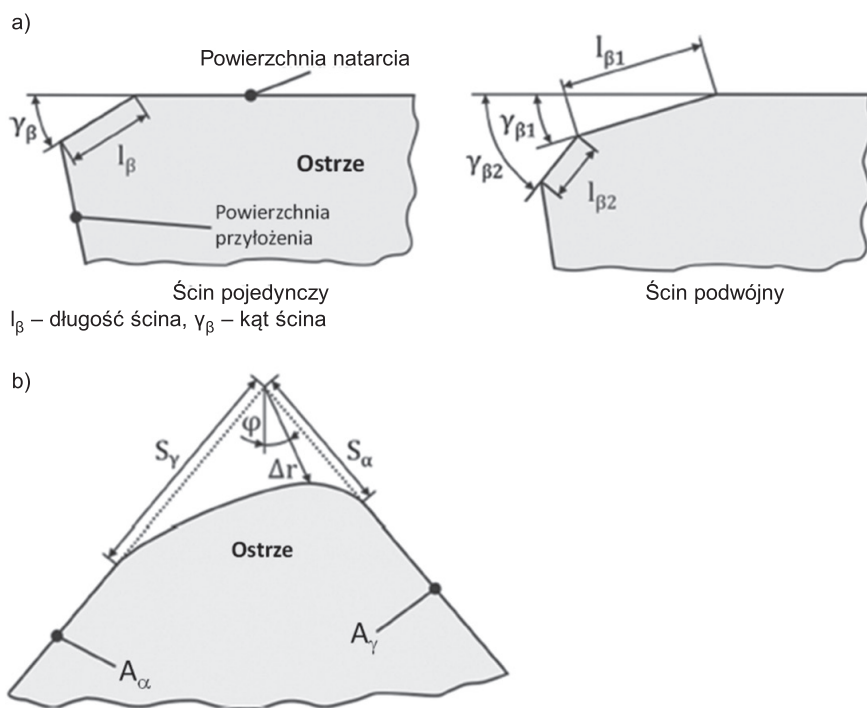
Rys. 1.10. Ukształtowanie naroża w płytkach wygładzających: (a) typu Wiper, (b) typu Xcel [33]

- Zaokrąglenie krawędzi skrawającej promieniem r_m , sfazowanie jedno- i wielokrotne od strony powierzchni natarcia i przyłożenia lub połączenie zaokrąglenia ze sfazowaniem (rys. 1.11 i 1.12). Szczególną rolę odgrywa sfazowanie (ścin) w pracy uderzeniowej i w przypadku ostrzy ceramicznych lub z CBN. W płytkach z ceramiki i CBN stosuje się często standaryzowane sfazowanie o szerokości $b_{\gamma 1} = 0,1 \div 0,3$ mm i $\gamma_{o1} = -20^\circ(-30^\circ)$. Należy dodać, że kształt krawędzi wyróżniony jest oddzielnym symbolem wg kodu ISO 1832/1991. Symbole stosowanych w narzędziach odmian kształtu wierzchołka ostrza podano na rys. 1.11b.

Sposób wymiarowania sfazowań na powierzchni natarcia oraz zarysu krawędzi skrawającej, gdy jej kształt nie jest opisany pojedynczym łukiem okręgu o promieniu r_m , jak w przypadku zarysu E na rys. 1.11b, przedstawiono na rys. 1.12a i b. Często krzywizna krawędzi skrawającej jest zmienna, np. typu waterfall lub po jej przygotowaniu przed nałożeniem powłoki (np. szczotkowaniu lub mikropiaskowaniu), i z tego względu wskazane jest



Rys. 1.11. Modyfikacja zarysu ostrza: (a) sfazowania na powierzchniach roboczych; (b) kształty zarysu krawędzi skrawającej wg ISO 1832



Rys. 1.12. Sposób wymiarowania: (a) sfazowania pojedynczego i podwójnego na powierzchni natarcia; (b) zarysu krawędzi skrawającej wg Denkeny [5]

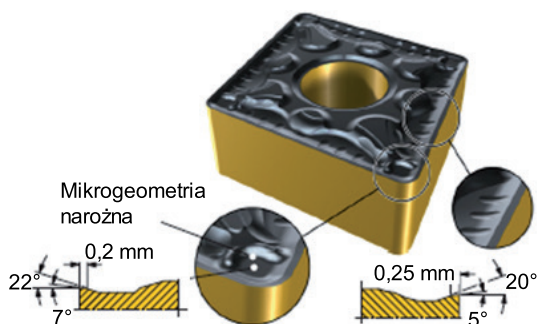
wyznaczenie średniego zaokrąglenia krawędzi skrawającej $\bar{S}$ lub wskaźnika kształtu K ze wzorów:

$$\bar{S} = (S_\alpha + S_\gamma)/2 \quad (1.4a)$$

$$K = S_\alpha/S_\gamma \quad (1.4b)$$

Gdzie: S_α i S_γ są odcinkami wyznaczanymi przez krzywiznę krawędzi skrawającej odpowiednio na powierzchni przyłożenia i natarcia (rys. 1.12b).

- Połączenie sfazowania z rowkiem spełniającym funkcję zwijacza lub łamacza wióra stosuje się w niektórych odmianach płytek wieloostrowych, tzw. *rowkowanych*, np. odmiany CNMG. Charakterystyczne wymiary zarysu ostrza z rys. 1.13 są podawane w katalogach producentów jako jeden z elementów doboru warunków skrawania, szczególnie gdy wymagana jest kontrola wióra.



Rys. 1.13. Zarys i wymiary zwijacza wióra w płytce CNMG firmy Sandvik Coromant [33]

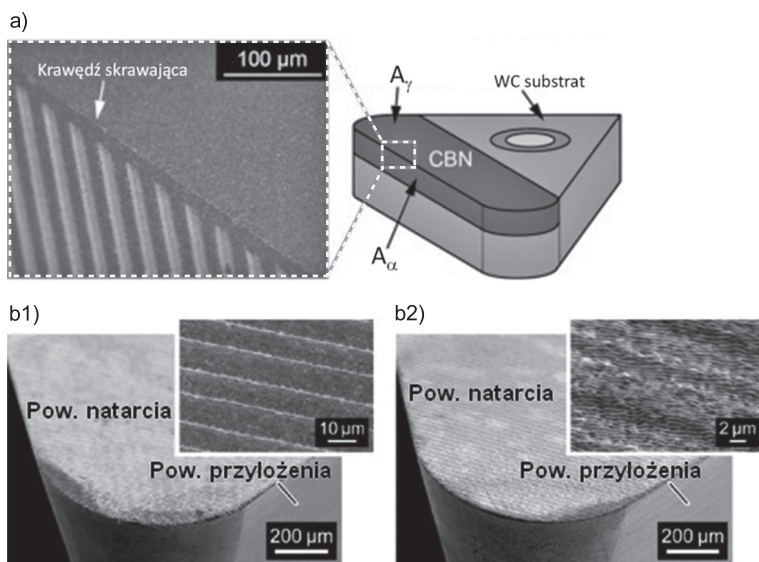
Stosowane obecnie zwijacze wiórów mają bardzo skomplikowaną geometrię (patrz rys. 1.14). Zarys złożonej, trójwymiarowej powierzchni natarcia tworzony jest przy pomocy modelu CAD, a następnie przeprowadza się symulację zwijania i łamania wióra w programach MES. Oprócz funkcji kierunkowego zwijania wióra pofalowana powierzchnia natarcia umożliwia



Rys. 1.14. Przestrzennie rozwinięte powierzchnie natarcia płytek wieloostrowych ze zwijaczami wióra do obróbki różnych materiałów [33]

doprowadzenie chłodziwa pod wiór, nawet w pobliże naroża ostrza. Szczegółowo problem zwijania i łamania wióra zostanie omówiony w rozdz. 5.10.

W przemyśle testuje się płytki skrawające z teksturyzowaną powierzchnią natarcia/przyłożenia umożliwiającą ograniczenie lub nawet wyeliminowanie narostu oraz redukcję tarcia w obróbce stopów aluminium, tytanu i stali kwasoodpornych [9]. Specjalne mikro-/nanotekstury złożone z rowków lub występów (rys. 1.15) wykonuje się techniką laserową. Zwykle wspomagają efekt nałożenia powłok niskotarciowych, np. MoS_2 czy DLC.

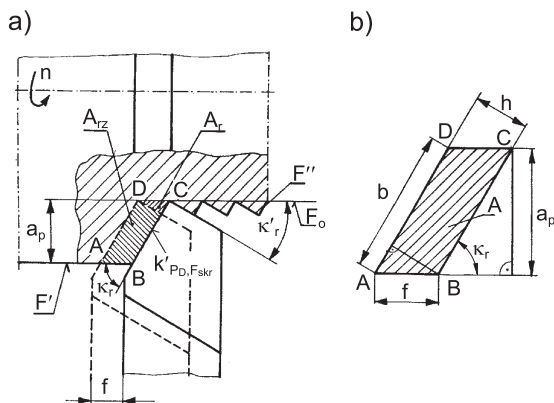


Rys. 1.15. Obrazy SEM strukturyzowanych powierzchni roboczych ostrzy skrawających: (a) powierzchnię przyłożenia ostrza z CBN, (b) struktury mikro- (b1) i nano- (b2) na powierzchni natarcia [9, 33]

1.5. Geometria warstwy skrawanej

Warstwa skrawana jest częścią nieodkształconego plastycznie materiału obrabianego zawartą między dwoma kolejnymi położeniami powierzchni przejściowej F_{skr} i F_{skr}^{+1} (rys. 1.6) w granicach naddatku obróbkowego, która następnie jest przekształcana w wiór.

Geometrię warstwy skrawanej rozpatruje się w płaszczyźnie wymiarowania przekroju poprzecznego, która spełnia warunek ortogonalności w stosunku do wektora prędkości ruchu głównego $\bar{v}_c$. W ruchu głównym obrotowym geometrię warstwy skrawanej rozpatruje się w płaszczyźnie osiowej P_D , a jej obrys tworzą ślady powierzchni F' i F'' oraz powierzchni przejściowej F_{skr} przy przemieszczaniu się ostrza o wartość posuwu (rys. 1.16).



Rys. 1.16. Elementy geometryczne warstwy skrawanej dla naroża ostrego

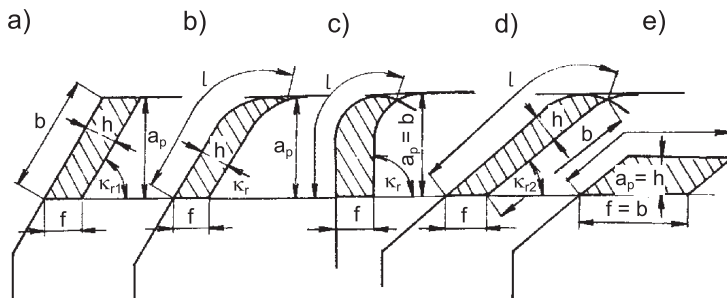
Konfiguracja przekroju poprzecznego warstwy skrawanej zależy od wartości kąta przystawienia i kształtu naroża, co przedstawiono na rys. 1.16a. W przypadku przyjęcia „ostrego” naroża, czyli $r_\epsilon \approx 0$, wystąpi odwzorowanie wierne, dla którego przekrój poprzeczny warstwy skrawanej przybiera kształt równoległoboku ABCD (rys. 1.16b). Wymiary równoległoboku b i h określa się mianem *geometrycznych parametrów skrawania*.

Szerokość warstwy skrawanej (b , b_D) przyjmuje się jako długość odcinka wyznaczonego przez ślad powierzchni przejściowej w płaszczyźnie P_D .

Grubość warstwy skrawanej (h , h_D) wyznacza odległość dwóch kolejnych śladów powierzchni przejściowej w płaszczyźnie P_D . W przypadku prostoliniowego zarysu przekroju warstwy skrawanej istnieją proste zależności geometryczne między geometrycznymi i technologicznymi parametrami skrawania:

$$h = f \sin \kappa_r \quad (1.5)$$

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (1.6)$$



Rys. 1.17. Konfiguracja przekroju poprzecznego warstwy skrawanej: (a) $\kappa_r \neq 0$, $r_\epsilon = 0$; (b) $\kappa_r \neq 0$, $r_\epsilon \neq 0$; (c) $\kappa_r = 90^\circ$, $\kappa'_r \neq 0$, $r_\epsilon \neq 0$; (d) $\kappa_{r2} < \kappa_{r1}$, $r_\epsilon \neq 0$; (e) $a_p < f$

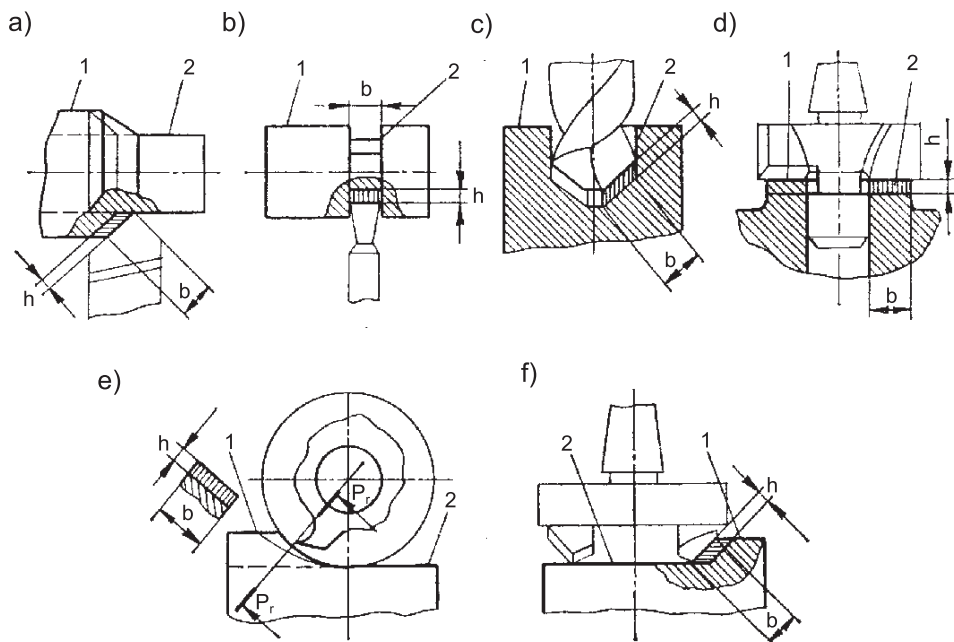
Pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej, zwane nominalnym, wynosi:

$$A = f \times a_p \quad (1.7)$$

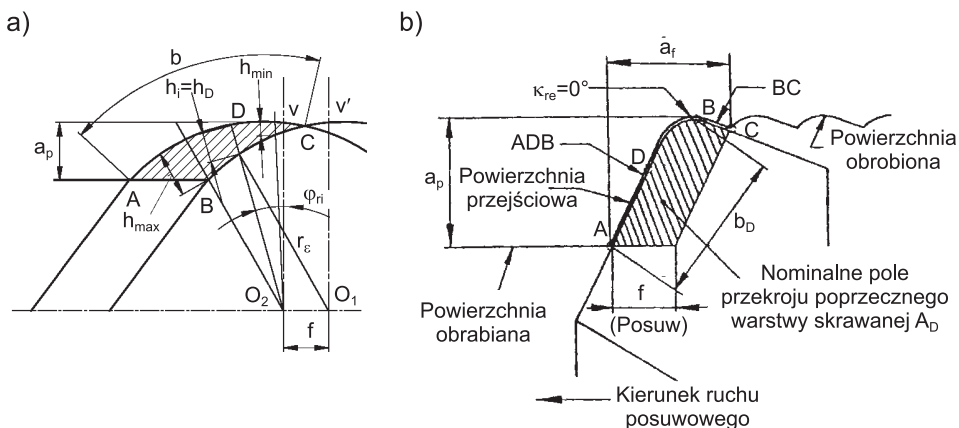
Nominalne pole przekroju warstwy skrawanej jest większe o ok. 1% od pola rzeczywistego A_{rz} ze względu na pozostawianie przez ostrze śladów obróbkowych (nierówności powierzchni). Charakterystyczne wymiary warstwy skrawanej dla różnych sposobów skrawania przedstawiono na rys. 1.18. W takich przypadkach, jak toczenie nożem z $r_\epsilon \neq 0$ i frezowanie walcowe (rys. 1.18e), grubość warstwy skrawanej zmienia się wzdłuż śladu powierzchni przejściowej aż do h_{min} w obrębie powierzchni obrobionej. Kawalec [16] zaleca, aby wtedy grubość warstwy skrawanej określać jako odległość między kolejnymi śladami powierzchni przejściowej w kierunku prostopadłym do tej powierzchni, która styka się aktualnie z krawędzią skrawającą. W konsekwencji (rys. 1.19a) chwilowe wartości grubości warstwy skrawanej h_i będą również funkcją kąta φ_{ri} :

$$h_i = r_\epsilon + f \sin \varphi_{ri} - \sqrt{r_\epsilon^2 - f^2 \cos^2 \varphi_{ri}} \quad (1.8)$$

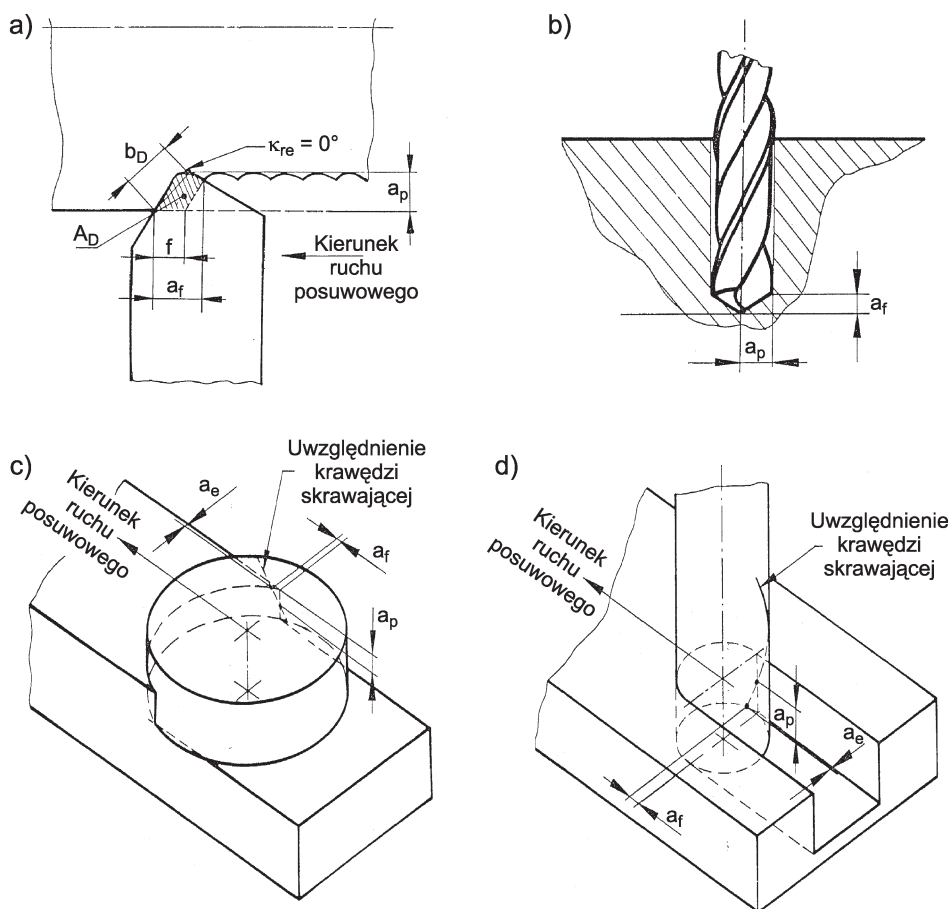
Gdzie: r_ϵ – promień naroża, f – posuw, φ_{ri} – kąt określający położenia przekroju mierzonej grubości warstwy skrawanej.



Rys. 1.18. Wymiary przekroju warstwy skrawanej dla różnych sposobów skrawania: (a) toczenie wzdłużne; (b) przecinanie; (c) wiercenie; (d) pogłębianie; (e) frezowanie walcowe; (f) frezowanie czołowe; 1 – powierzchnia obrabiwana; 2 – powierzchnia obrobiona



Rys. 1.19. Wymiary warstwy skrawanej dla $r_\epsilon \neq 0$: (a) zmiana grubości w obrębie naroża; (b) ustalenie nominalnej szerokości



Rys. 1.20. Wymiary warstwy skrawanej w: (a) toczeniu wzdłużnym; (b) wierceniu, (c) frezowaniu czołowym, (d) frezowaniu walcowo-czołowym wg ISO-3002/3-1984(E)

W normie PN-M-01002-03:1992 zaleca się, żeby nominalną grubość warstwy skrawanej odnosić do rozpatrywanego punktu krawędzi skrawającej D usytuowanego w pozycji dzielącej długość krawędzi skrawającej głównej, czynnej ADB na dwie równe części. Wówczas:

$$h_D = \frac{A_D}{b_D} \quad (1.9)$$

Nominalna szerokość warstwy skrawanej b_D jest odległością między dwoma skrajnymi punktami czynnej krawędzi skrawającej A i B w płaszczyźnie P_D (rys. 1.19b).

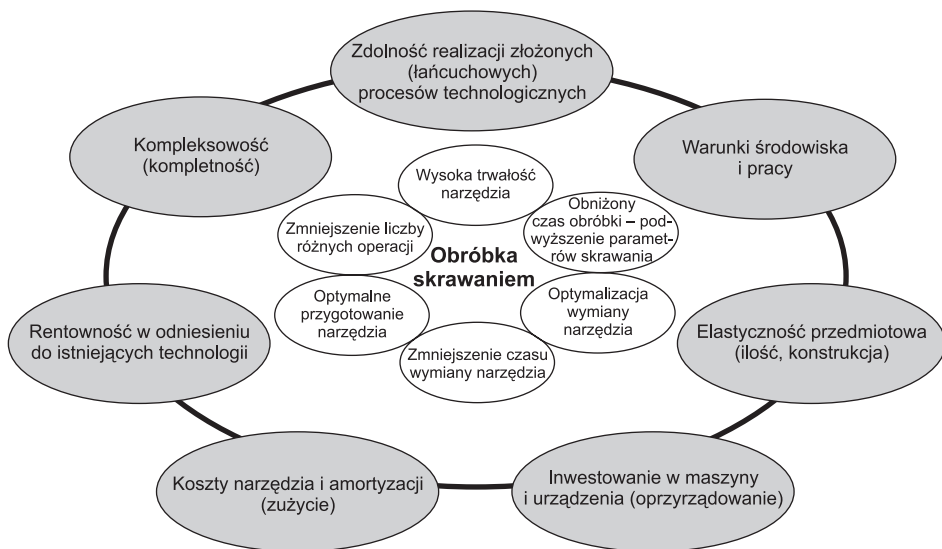
W normie ISO-3002/3-1984(E) definiuje się poprawnie trzy rodzaje wcięć ostrza w materiał (rys. 1.20). Wcięcie boczne a_p jest zwykle nazywane *głębokością skrawania* ze względu na charakterystyczny kierunek pomiaru. Wcięcie posuwu a_f jest definiowane jako *wielkość chwilowego zagłębienia się krawędzi skrawającej w materiał* mierzonego w kierunku ruchu posuwowego. Należy zauważyć, że a_p i a_f definiuje się dla wszystkich trzech sposobów skrawania (rys. 1.20a–d). Natomiast dla frezowania (rys. 1.20c i d) definiuje się *dotatkowo wcięcie robocze krawędzi skrawającej* a_e mierzone w kierunku równoległym do płaszczyzny roboczej P_{fe} prostopadłe do kierunku ruchu posuwowego.

1.6. Przyszłościowa wizja obróbki skrawaniem

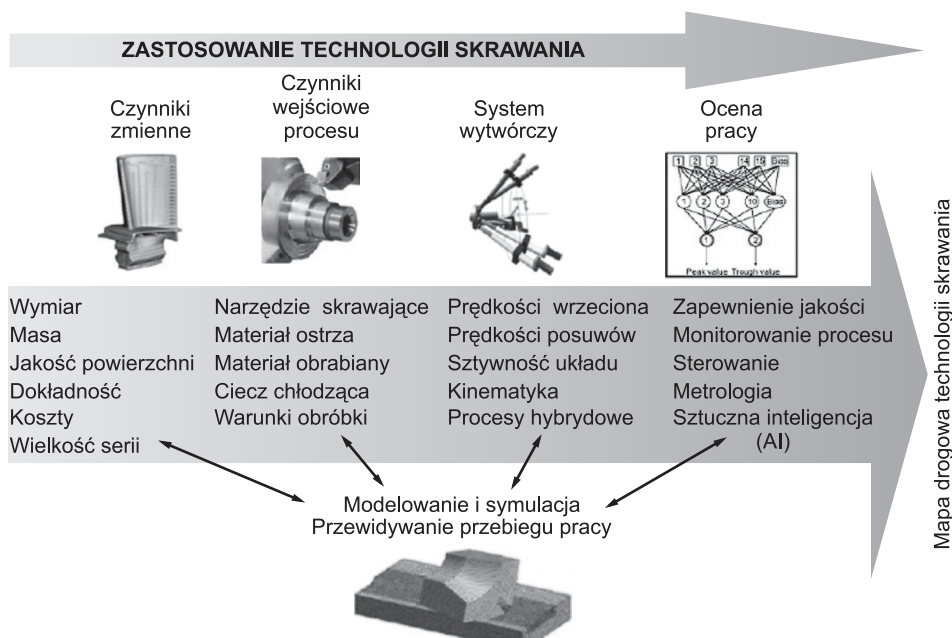
Obróbka skrawaniem jest podstawowym procesem wytwórczym, który obecnie odgrywa kluczową rolę w kreowaniu bardziej konkurencyjnej produkcji. W szczególności jej dynamiczny rozwój i innowacyjność pozwalają na nowe specyficzne zastosowania, takie jak: obróbka bardzo dokładna, mikroobróbka i nanoobróbka. Rozwój technologii obróbki skrawaniem jest wynikiem ewolucyjnego i interaktywnego doskonalenia obrabiarek, materiałów ostrzy narzędzi skrawających, konstrukcji narzędzi skrawających i oprzyrządowania technologicznego. Proces udoskonalania przebiegu i zdolności technologicznych skrawania, który prowadzi do wysokiej wydajności produkcji, wąskich tolerancji wymiarowych, wysokiej jakości przedmiotu obrobionego i zdolności kształtowania niekonwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych zależy od wielu czynników (rys. 1.21).

Możliwe oddziaływania obróbki skrawaniem na proces wytwarzania można zilustrować w formie zewnętrznego pierścienia na rys. 1.21. Z kolei pierścień wewnętrzny przedstawia dalsze możliwości osiągnięcia większej wydajności i efektywności tej technologii przez optymalizację materiału narzędziowego, parametrów skrawania (trwałości ostrza), czynności manipulacyjnych i struktury operacji technologicznych.

Podstawowe aspekty związane z osiągnięciem zaawansowanej technologii skrawania przedstawia rys. 1.22. Zgodnie z nim do grupy czynników inicjujących zmiany należą: wymiary i masa przedmiotu, dokładność i jakość



Rys. 1.21. Oddziaływania na proces wytwarzania i problemy stawiane przed obróbką skrawaniem [10]



Rys. 1.22. Podstawowe aspekty zaawansowanej technologii obróbki [4, 10]

powierzchni, koszty i wielkości serii. W doskonaleniu pracy systemu wytwórczego ważną rolę odgrywają: prędkości ruchów zespołów roboczych obrabiarki, jej kinematyka i właściwości dynamiczne oraz możliwość realizacji *pro-*

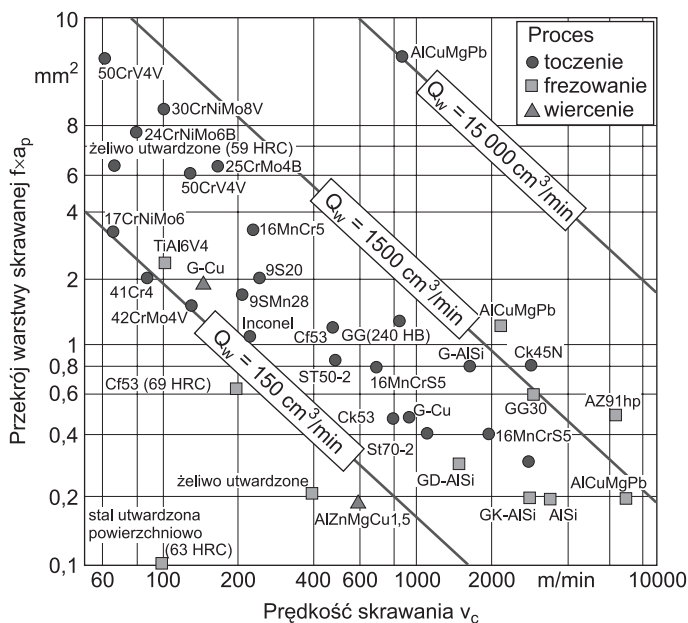
cesów *hybrydowych*, np. kształtowania wymiarowego i nadawania wymaganych właściwości warstwy wierzchniej przez stosowanie lasera. Duże znaczenie w osiągnięciu tego celu przypisuje się modelowaniu i symulacji, które prowadzą do najtańszego sposobu prognozowania i oceny przebiegu pracy zautomatyzowanych obrabiarek CNC i systemów obróbkowych. Nowe podejście do modelowania i optymalizacji oparte jest na koncepcji *wirtualnego modelu procesu skrawania*, która obejmuje [1]: model CAD obrabianej części, generowanie programu sterującego NC w środowisku CAM, strategię wyboru trajektorii ruchu narzędzia, prognozowanie działających sił, momentu i mocy oraz stabilności procesu (powstawania drgań samowzbudnych, ang. *chatter*) i błędów kształtu, symulację procesu i topografię powierzchni.

Obserwowany w ostatnich latach i kontynuowany obecnie rozwój technologii obróbki skrawaniem obejmuje następujące ważne kierunki:

- Wzrost dokładności wymiarowo-kształtowej i jakości technologicznej WW. Obróbka narzędziami o określonej geometrii ostrza może, dzięki opanowaniu technologii chemicznej obróbki atomowej do nadawania prawie idealnej ostrości krawędziom ostrzy diamentowych, z powodzeniem zastępować superdokładne obróbki powierzchniowe, takie jak docieranie i polerowanie. Ten kierunek rozwoju przyjął nazwę *obróbki ultradokładnej* od angielskiego określenia *ultraprecision metal cutting* (UMC) [12]. W rezultacie obszar zastosowań obróbki wiórowej przenosi się do nanotechnologii.
- Zwiększenie prędkości skrawania aż do maksymalnej, gwarantującej bezpieczną pracę układu obróbkowego. Zintegrowanie oddziaływań pochodzących od obrabiarki, układu sterowania, narzędzia i cieczy obróbkowej daje jeden istotny efekt, a mianowicie wzrost prędkości skrawania. Według norm europejskich obróbka z prędkościami powyżej 1000 m/min nazywana jest *obróbką z dużą prędkością* (obróbką szybkościową) od angielskiego terminu *high speed cutting* (HSC) [10, 28]. Należy jednak zachować pewną ostrożność w definiowaniu tej granicy, ponieważ skrawanie stali zahartowanej czy superstopów lotniczych z prędkością 200 m/min uważane jest również za przypadek obróbki szybkościowej.

Jak wspomniano, podstawowym trendem w zaawansowanych technologicznie branżach przemysłu jest wprowadzanie nowych materiałów o małej gęstości i wysokiej wytrzymałości, a przy tym łatwo obrabialnych. Osiągalną obecnie objętościową wydajność obróbki Q_w , która jest podstawowym wskaźnikiem w obróbce wysokowydajnej dla różnych sposobów obróbki i materiałów obrabianych, przedstawiono na rys. 1.23. Należy zauważyć, że wydajność Q_w jest determinowana przez prędkość skrawania v_c i przekrój warstwy skrawanej (iloczyn posuwu i głębokości skrawania – $f \times a_p$). Możliwości kojarzenia tych parametrów zależą od stosowanej technologii obróbki i realizowanej operacji technologicznej. Stąd obecnie wydajność obróbki mieści się dla większości

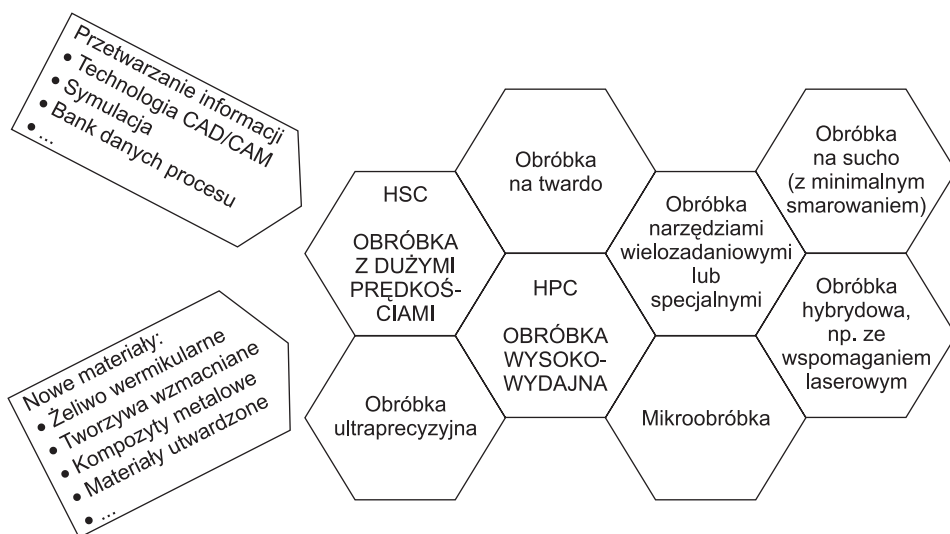
materiałów w zakresie $150 \div 1500 \text{ cm}^3/\text{min}$. Zastosowanie obróbki HSC, np. szybkościowego frezowania magnezu, umożliwia wzrost prędkości skrawania do 4000 m/min i posuwu do 60 m/min [4, 10]. Dla porównania typowy zakres wydajności w szlifowaniu to $200 \div 2500 \text{ cm}^3/\text{min}$.



Rys. 1.23. Wydajność objętościowa skrawania dla różnych materiałów obrabianych i trzech podstawowych sposobów obróbki [4]

Z przeglądu literatury można wywnioskować, że na skalę przemysłową opartą na obróbkę szybkościową stopów aluminium i miedzi oraz najbliższego stopu magnezu. Ograniczeniami w rozwoju HSM są przede wszystkim łożyskowania i napędy wrzecion (np. łożyskowania magnetyczne i napędy bezpośrednie), połączenia wrzeciono–narzędzie, układy sterowania CNC, znaczna redukcja mas elementów ruchomych (nawet do 40%). Przykładowo, obrabiarki metali lekkich i tworzyw wyposażone są we wrzeciona wirujące z prędkością do 50 000, a nawet 100 000 obr/min [4].

Skrawanie z dużymi prędkościami HSM oraz skrawanie wysokowydajne (ang. *high performance machining*, HPM) (rys. 1.24) wysuwają się na pierwszy plan w ramach trendów rozwojowych obróbki skrawaniem dotyczących poprawy produktywności i jakości procesu [4, 24]. Ogólnie przyjmuje się, że HSC obejmuje procesy o 5÷10 razy zwiększonej prędkości skrawania, zależnie od materiału obrabianego, w stosunku do wartości stosowanych w obróbce konwencjonalnej. Efektem tego jest skrócenie czasów głównych, redukcja siły skrawania, wzrost wydajności ubytkowej i lepsza jakość powierzchni.



Rys. 1.24. Najważniejsze trendy rozwojowe w obróbce skrawaniem [4, 24]

HPC jest procesem, w którym dąży się do optymalnego wykorzystania dysponowanej przez wrzeciono głównej mocy w celu przetworzenia maksymalnej objętości materiału usuwanego w jednostce czasu. Uzyskuje się wzrost wydajności objętościowej dzięki wyższym prędkościom skrawania (tak jak dla HSC), ale przy jednocześnie większych posuwach. Proces HPC przebiega przy większych dosuwach osiowych i promieniowych, co równocześnie zmniejsza liczbę operacji i koniecznych zmian narzędzi. Różnica między HSC i HPC co do stosowanych parametrów technologicznych jest więc dość płynna. Przyjmuje się jednak, że obróbka HPC dotyczy operacji zgrubnych lub półwykańczających, a HSC jest bardziej kojarzone z obróbką wykańczającą [24].

- Ograniczenie zużycia cieczy obróbkowej. Szacuje się, że łączne koszty dostawy, użycia i zbycia tych substancji stanowią ok. 16% kosztów produkcji, podczas gdy koszty narzędziowe to tylko 4% [10]. Ponadto udowodniono, że ciecze obróbkowe wykazują zdecydowanie negatywne oddziaływanie na zdrowie pracowników i stanowią poważne zagrożenie dla środowiska. W programie upowszechniania ekologicznego skrawania, czyli na sucho lub z minimalnym wydatkiem środka smarnego (MQL), pierwszoplanową rolę przypisuje się cienkowarstwowym powłokom o dużej odporności termicznej (np. TiAlN) i supertwardym materiałom narzędziowym. Działania mające na celu przezwyciężenie barier technologicznych w skrawaniu na sucho omówiono w [10].
- Dokładna obróbka materiałów w stanie utwardzonym (popularna nazwa *na twardo*), która jest zespoleniem obróbki na sucho i HSM. W tym przypadku takie sposoby obróbki, jak toczenie, wytaczanie, rozwiercanie, frezowanie, przeciąganie i obróbka uzębień zahartowanych stali i żeliw