



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY

mgr inż. Mariusz Kasprzyk

**PROBABILISTYCZNE MODELE TRWAŁOŚCI
I ZUŻYCIA ŚCIERNIC Z ZIARNAMI
Z ELEKTROKORUNDU SZLACHETNEGO**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:
prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak

KOSZALIN 2005

SPIS TREŚCI

	WYKAZ OZNACZEŃ	4
1.	WPROWADZENIE	6
1.1.	Uzasadnienie wyboru tematu	6
1.1.1.	Znaczenie pracy	7
1.1.2.	Naukowe możliwości wykorzystania pracy	7
1.1.3.	Technologiczne możliwości wykorzystania pracy	7
1.2.	Pojęcia podstawowe i definicje	8
2.	ANALIZA LITERATURY	9
2.1.	Budowa ściernic	9
2.1.1.	Budowa i właściwości ziaren ściernych	10
2.1.2.	Struktura wewnętrzna ściernicy	13
2.1.3.	Topografia czynnej powierzchni ściernicy	14
2.1.4.	Właściwości eksploatacyjne ściernic	19
2.2.	Mechaniczne obciążenie narzędzi ściernych	20
2.2.1.	Cechy procesów szlifowania	20
2.2.2.	Wpływ wybranych czynników na obciążenie ziaren ściernych	24
2.2.3.	Siły w strefie szlifowania	30
2.3.	Zużycie narzędzi ściernych	33
2.3.1.	Elementarne zjawiska zużycia ziaren	34
2.3.1.1.	Zużycie ściernic ziaren	35
2.3.1.2.	Zużycie doraźne i zmęczeniowe	36
2.3.2.	Zużycie kształtowe narzędzi ściernych	37
2.3.3.	Wybrane metody badania zużycia ściernic	39
2.3.4.	Modelowanie trwałości narzędzi ściernych	43
2.4.	Analiza procesu skrawania pojedynczym ostrzem	44
2.4.1.	Modelowanie procesu skrawania ostrzem ziarna ściernego	44
2.4.2.	Opory przemieszczeń materiału	46
2.5.	Symulacja procesu szlifowania	50
2.5.1.	Zasadność modeli	50
2.5.2.	Procedury upraszczania modelu	51
2.5.3.	Ocena wiarygodności modelu	51
2.5.4.	Symulacyjne modele probabilistyczne	51
2.5.5.	Symulacje procesu szlifowania	52
2.6.	Wnioski z analizy literatury	55
3.	TEZY I ZAKRES PRACY	57
3.1.	Cel pracy	57
3.2.	Tezy pracy	57
3.3.	Zakres pracy	58
4.	MODELOWANIE TRWAŁOŚCI I ZUŻYCIA ŚCIERNICY	59
4.1.	Założenia do probabilistycznego modelu zużycia ściernicy	59
4.2.	Probabilistyczny opis obciążenia ziaren ściernych	61
4.3.	Rozkład czasu pracy ziaren aktywnych	63
4.4.	Sumaryczna powierzchnia starcia i zużycie objętościowe	67
4.5.	Model zużycia ściernicy	68
4.5.1.	Zużycie narzędzia w warunkach małej intensywności wykruszeń ziaren ściernych	68
4.5.2.	Zużycie narzędzia w warunkach intensywnego wykruszania ziaren ściernych	70
4.5.3.	Zużycie narzędzia dla zmiennej intensywności wykruszeń w czasie szlifowania	73

4.6.	Analiza zużycia kształtowego ściernicy	76
4.6.1.	Obciążenie ziaren ściernych	76
4.6.2.	Promieniowe i objętościowe zużycie ściernicy	79
5.	STANOWISKO BADAWCZE	86
5.1.	Stanowisko obróbkowe	87
5.1.1.	Komputerowa rejestracja obciążenia ziaren	88
5.1.2.	Kontrola dosuwu ostrza skrawającego	93
5.2.	Pomiary mikroskopowe	94
5.3.	Profile śladów mikroskrawania	95
5.4.	Konstrukcja próbek i uchwytów	96
6.	BADANIA PROCESU MIKROSKRAWANIA I ZUŻYCIA ZIAREN ŚCIERNYCH	98
6.1.	Cel i zakres badań eksperymentalnych	98
6.2.	Metodyka badań	99
6.2.1.	Metoda obróbki pojedynczym ziarnem ściernym	99
6.2.2.	Przygotowanie próbek	102
6.2.3.	Metodyka badań obróbki ziarnem ściernym	102
6.3.	Wyniki badań	103
6.3.1.	Badania obciążenia ziaren w procesie mikroskrawania	103
6.3.2.	Badania procesu tworzenia wiórów i wpływów	122
6.3.3.	Strefa mikroskrawania po wykruszeniu ziarna	134
6.3.4.	Rejestracja procesu zużycia ziaren ściernych	139
6.4.	Wyniki weryfikacji założeń do modeli obciążenia i zużycia ziaren ściernych	141
6.5.	Założenia do budowy modelu i symulacji dotyczące obciążenia ziaren ściernych	150
6.6.	Założenia do budowy modelu i symulacji dotyczące zużycia ziaren ściernych	154
7.	BADANIA SYMULACYJNE PROCESU ZUŻYCIA ŚCIERNICY	155
7.1.	Wprowadzenie	155
7.2.	Symulacja obciążenia i wykruszania ziaren	157
7.3.	Algorytm modelowania i symulacji procesu zużycia ściernicy	160
7.4.	Wyniki badań symulacyjnych	163
7.4.1.	Rozkład czasu pracy ziaren ściernych	163
7.4.2.	Intensywność wykruszeń ziaren podczas procesu szlifowania	164
7.4.3.	Zużycie promieniowe ściernicy	166
7.5.	Porównanie wyników symulacji i badań eksperymentalnych	168
7.6.	Wnioski z analizy wyników symulacyjnych	170
8.	MODELOWANIE I OCENA TRWAŁOŚCI ŚCIERNIC	171
8.1.	Problematyka wyznaczenia okresu trwałości	171
8.2.	Ocena właściwości eksploatacyjnych ściernicy	173
8.3.	Model matematyczny trwałości ściernicy – postać ogólna	174
8.4.	Wpływ warunków obróbki na ocenę okresu trwałości ściernicy	179
8.5.	Modelowanie trwałości w określonych warunkach dla obróbki zgrubnej, dokładnej oraz dla przypadku adaptacyjnego sterowania procesem szlifowania	183
8.6.	Modelowanie kosztów eksploatacji narzędzi ściernych	184
8.7.	Wnioski z modelowania trwałości ściernicy	186
9.	WNIOSKI	188
9.1.	Wnioski poznawcze	188
9.1.1.	Wnioski dotyczące obciążenia i zużycia ziaren ściernych	188
9.1.2.	Wnioski dotyczące symulacji zużycia ściernicy	189
9.1.3.	Wnioski dotyczące oceny trwałości ściernicy	190
9.2.	Wnioski dotyczące wykorzystania wyników pracy	191
9.3.	Kierunki dalszych badań	191
	LITERATURA	192

WYKAZ OZNACZEŃ

a_z	grubość warstwy skrawanej
\bar{a}_z	średnia grubość warstwy skrawanej
b	szerokość strefy szlifowania
b_z	szerokość warstwy skrawanej
c_K	wskaznik względnego pogorszenia właściwości skrawanych ściernicy
g	głębokość szlifowania
g_z	głębokość skrawania ostrza ziarna
$f_z(k)$	funkcja mian powierzchni starcia ziarna w czasie jego pracy k
h	liczba umownych stref zużycia promieniowego ściernicy
k	czas pracy ziarna
\bar{k}_{st}	średni właściwy opór skrawania
k_u	czas oczekiwania na wykruszenie ziarna
l', a', h'	wymiary ziarna
n_s	numer umownej strefy zużycia promieniowego ściernicy
p_d	poziom wytrzymałości doraźnej ziarna
p_g	poziomu obciążenia granicznego ziarna ściernego
p_k	poziom odporności na kumulację obciążenia ziarna
\underline{p}_p	posuw poprzeczny obrabianego przedmiotu
\bar{p}_z	średnia wartość obciążenia ziarna ściernego
r_z	wymiar charakterystyczny ziarna
s_p	przeszczenie materiału po pełnym obrocie ostrza
s_z	przeszczenie osi narzędzia w czasie jednego skrawania ziarna
t	czas procesu szlifowania
t_k	czas pojedynczego skrawania ziarna
t_p	czas wystąpienia przewyższenia poziomu p_g
t_{sz}	czas szlifowania przedmiotu
u_t	oczekiwana liczba wykruszeń ziaren w chwili t
u_n	sumaryczna liczba wykruszeń ziaren ściernych
w, w_d, w_k	wytrzymałość ziarna: całkowita, doraźna, skumulowana
v_s	prędkość szlifowania
v_p	prędkość posuwu przedmiotu obrabianego
z_c	liczba ostrzy skrawających równocześnie
z_F	liczba ostrzy skrawających przypadających na jednostkę powierzchni
z_t	liczba ostrzy skrawających w jednostce czasu
A_z	pole przekroju warstwy skrawanej
A_z'	pole przekroju warstwy skrawanej, zależne warunków skrawania ziarna
\bar{A}_z	średnia wartość powierzchni przekroju warstwy skrawanej
C_a	stała określająca kształt ziarna ściernego
C_d	stała określająca wytrzymałość doraźną ziarna
C_k	stała określająca odporność ziarna na kumulację obciążeń
C_m	stała określająca jednostkowy opór skrawania
C_s	stała określająca utwardzenie ziarna w spoiwie ściernicy
C_z	stała określająca powierzchnię starcia na ziarnie ściernym
D	średnica zewnętrzna ściernicy
H	wysokość ściernicy
\bar{z}_s	sumaryczna powierzchnia starcia ściernicy
\bar{z}_n	składowa normalna siły szlifowania
\bar{z}_{nz}	składowa normalna siły przypadającej na jedno ostrze skrawające
\bar{z}_t	składowa styczna siły szlifowania
\bar{z}_{tz}	składowa styczna siły przypadającej na jedno ostrze skrawające
\bar{F}_0	średnia wartość początkowej powierzchni starcia za ziarnach ściernych
z	współczynnik izometrii ziarna

$K(\varepsilon, \rho)$	stała uwzględniająca wpływ kształtu ostrza skrawającego
K_{bj}	koszty pogorszenia jakości obróbki w procesie szlifowania
K_{obc}	koszty odnowienia powierzchni czynnej ściernicy
K_{obr}	koszty obróbki w procesie szlifowania
K_s	wskaźnik właściwości skrawnych ściernicy
K_H	kryterium oceny ściernicy dotyczące szerokości strefy szlifowania
$K_{\Delta R}$	kryterium oceny ściernicy dotyczące zużycia promieniowego
$L(t)$	długość czynnego zarysu ściernicy, zmienna w czasie szlifowania
L_p	przemieszczenie przedmiotu w czasie pojedynczego skrawania ziarna
L_w	długość drogi ostrza
N_a	liczba ziaren aktywnych na powierzchni czynnej ściernicy
N_s	moc szlifowania
P_z	obciążenie ziarna ściernego
P_k	skumulowane obciążenie ziarna w czasie jego pracy
$P_s(t)$	obciążenie zmienne systematycznie w czasie szlifowania
R_a	współczynnik chropowatości
Q_v	objętościowa wydajność szlifowania
Q_s	zużycie objętościowe ściernicy
T_e	elementarny okres czasu procesu szlifowania dla kroku symulacji
T_j, T_s	trwałość ściernicy
\bar{V}_A	średnia objętość warstwy skrawanej jednym ostrzem
$V_z^{(1)}$	ziarnistości ściernicy
\bar{V}_z	średnia objętość wykruszonego ziarna
V_{zw}	oczekiwana objętość wykruszonych ziaren
α	kąt pochylenia próbki
α_K, α_T	poziom istotności
2ε	kąt wierzchołkowy ziarna ściernego
λ	oczekiwana liczba wykruszonych ziaren
λ_0	oczekiwana liczba ziaren wykruszonych w okresie trwałości ściernicy
λ_t	oczekiwana liczba wykruszeń zmienna w czasie procesu szlifowania
λ_{t0}	graniczna oczekiwana liczba wykruszeń dla $t \rightarrow \infty$
λ_w	całkowita intensywność wykruszeń w czasie szlifowania
λ_{wd}	intensywność wykruszeń, spowodowana przekroczeniem wytrzymałości doraźnej ziarna
λ_{wk}	intensywność wykruszeń, spowodowana przekroczeniem odporności na obciążenie sumaryczne ziarna
μ_s	współczynnik proporcji składowych siły skrawania jednym ostrzem
μ_w	średni czas oczekiwania na wykruszenie ziarna ściernego
$v_k(t)$	liczba ziaren w grupie o ustalonym czasie pracy k w chwili t
\underline{v}_p	liczba przewyższeń poziomu obciążenia granicznego ziarna \underline{p}_g
\bar{v}_p	liczba przewyższeń poziomu obciążenia średniego ziarna \bar{p}_z
ρ	promień zaokrąglenia wierzchołka ziarna
$\Delta H_{0,5}$	parametr zmiany czynnej szerokości strefy szlifowania w efekcie zużycia kształtowego
ΔR	zużycie promieniowe
$\Delta R/r_z$	znormalizowany współczynnik zużycia promieniowego
Δw_{obr}	wskaźnik dokładności obróbki przedmiotu
CPS	czynna powierzchnia ściernicy
$X(t)$	proces stochastyczny
$P\{\dots\}$	prawdopodobieństwo
$E(\dots)$	wartość oczekiwana
$S(\dots)$	odchylenie standardowe
$V(\dots)$	wariancja
μ	współczynnik skali funkcji rozkładu prawdopodobieństwa
σ	współczynnik kształtu funkcji rozkładu prawdopodobieństwa

ROZDZIAŁ 1

WPROWADZENIE

1.1. Uzasadnienie wyboru tematu

Badania trwałości i żywotności narzędzi ściernych są kosztowne i czasochłonne, odnoszą się zwykle do uśrednianej oceny stanu i kształtu powierzchni czynnej oraz zmian wymiarów narzędzia. Stan każdego ziarna na powierzchni narzędzia nie jest wyznaczany eksperymentalnie ze względu na wielką liczbę ziaren na powierzchni. Czas kontaktu ziarna z materiałem obrabianym jest niezwykle krótki i wynosi $t_k = 52,7 \cdot 10^{-6}$ s dla parametrów: długości drogi ostrza $L_w = 1,58 \cdot 10^{-3}$ m i prędkości skrawania $v_s = 30$ m/s. W tym krótkim czasie obciążenie ziarna ulega znacznym zmianom, a strefa kontaktu jest trudnodostępna dla obserwacji. Dążenie do poznania stanów obciążenia i warunków pracy ziarna jest powodem do poszukiwania nowych, lepszych modeli i symulacji procesów obróbki oraz zużycia ziaren i narzędzi ściernych.

Badania eksperymentalne pozwalają wyznaczyć jedynie zmianę globalną cech czynnej powierzchni ściernicy z upływem czasu lub zmianę chwilową cechy globalnej. Podczas modelowania, dla dobrych, zweryfikowanych założeń, można odnieść się do poziomu jednego ziarna, a następnie sumarycznie wnioskować o całości cech narzędzia. Analiza stanów obciążenia i wykonanej pracy przez poszczególne ziarna w okresie od rozpoczęcia pracy daje wiele nowych informacji i pozwala na określenie stanu całego narzędzia.

Na przebieg procesu szlifowania znaczący wpływ ma probabilistyczny charakter zmian podstawowych czynników, takich jak:

- właściwości ziaren ściernych,
- rozmieszczenie ziaren w objętości ściernicy,
- obciążenie poszczególnych ziaren.

Ponadto parametry powierzchni przedmiotu po obróbce także mają cechy losowe. Można zatem stwierdzić, że opis procesu zużycia narzędzi ściernych, z wykorzystaniem modeli probabilistycznych będzie wiarygodnym narzędziem prognozującym trwałość i żywotność ściernic.

1.1.1. Znaczenie pracy

Wykruszanie ziaren, ich intensywność, zmiany intensywności wykruszeń w czasie, rozkłady intensywności wykruszeń dla ziaren nowych i grup ziaren o różnym czasie pracy, mają duże znaczenie dla oceny trwałości narzędzi ściernych i wyników obróbki w procesie szlifowania. Dotychczasowe opracowania teoretyczne nie uwzględniają w pełni stochastycznego charakteru procesu zużywania się ściernic.

Opracowanie modeli matematycznych obciążenia i wytrzymałości ziaren ściernych oraz symulacji procesu zużycia ściernicy pozwoli na pełniejsze poznanie złożonych procesów zachodzących podczas szlifowania.

1.1.2. Naukowe możliwości wykorzystania pracy

Dokonując wyboru tematu i zakresu pracy założono, że analiza zużycia narzędzi ściernych, z zastosowaniem opisu wykorzystującego probabilistyczny charakter zjawisk zachodzących w strefie szlifowania pozwoli na wyjaśnienie zależności pomiędzy tymi zjawiskami i umożliwi minimalizację czynników wpływających niekorzystnie na efekty obróbki ściernic.

Opracowane zagadnienia uzupełniają prace prowadzone w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej nad kompleksowym opisem matematycznym i symulacją szlifowania, a wyniki badań eksperymentalnych przyczynią się do szczegółowej weryfikacji modelowanych procesów.

1.1.3. Technologiczne możliwości wykorzystania pracy

Testowanie nowych rozwiązań narzędzi ściernych jest bardzo kosztowne i pracochłonne, a końcowe możliwości ich wykorzystania zależą od wielu czynników, na które producenci ściernic mają ograniczony wpływ. Wykorzystanie potencjału obróbkowego ściernicy oraz uzyskane wyniki procesu szlifowania zależą bowiem od doboru parametrów procesu obróbki, oceny realizacji i wyników procesu oraz modyfikacji warunków i parametrów szlifowania. Komputerowe wspomaganie projektowania narzędzi ściernych, z wykorzystaniem modelowania ich właściwości oraz zastosowanie technik symulacji w celu określenia zużycia ściernicy dla zadanych warunków obróbki może zapewnić nowe możliwości rozwoju technologicznego, przyczyniając się do znacznych oszczędności wprowadzania nowych technologii w przemyśle. Założono, że opracowane modele można będzie zastosować do analizy pracy, zużycia i trwałości narzędzi, o nietypowej budowie lub właściwościach, których wykonanie byłoby obecnie trudne lub zbyt kosztowne, celem określenia ich walorów i celowości wytwarzania.

1.2. Pojęcia podstawowe i definicje

Analizy podjęte w pracy wymagają przyjęcia definicji zastosowanych określeń, których znaczenie w dalszej części jest znaczące.

Trwałość ściernicy rozumiana jest jako okres czasu pomiędzy dwoma kolejnymi procesami odnawiania powierzchni czynnej, czyli okres, w którym narzędzie zachowuje swoje właściwości skrawne, oceniane na podstawie przyjętych kryteriów, do których mogą należeć wyniki obróbki.

Żywotność ściernicy definiowana jest jako suma wszystkich okresów trwałości ściernicy, od chwili pierwszego użycia narzędzia do czasu, w którym kolejny proces odnowienia powierzchni czynnej nie jest możliwy ze względu na przyjęte kryteria.

Potencjał obróbkowy (skrawny) to wskaźnik opisujący sumę zdarzeń lub skutków obróbki możliwych do uzyskania z wykorzystaniem danego narzędzia.

Samostrzenie ściernicy – proces mikrowykruszeń, wykruszeń częściowych oraz całkowitych wykruszeń ziaren spowodowany oporem skrawania lub kumulacją obciążeń ziarna do poziomu przekroczenia siły zamocowania ziarna w spoiwie.

Postępujące tępienie narzędzia – proces zachodzący wskutek ściernego zużywania się ziarna do utraty właściwości skrawnych, podczas którego, pomimo zwiększania oporu skrawania nie zachodzą procesy częściowego lub całkowitego wykruszania ziaren.

Intensywność wykruszeń rozumiana jest jako liczba wykruszeń ziaren w jednostce czasu danego procesu szlifowania. W pracy wyodrębniono składowe intensywności wykruszeń, spowodowanej przekroczeniem wytrzymałości doraźnej oraz odporności na obciążenie sumaryczne ziarna.

Rozkład – określenie rozkład używane jest w pracy w dwóch znaczeniach:

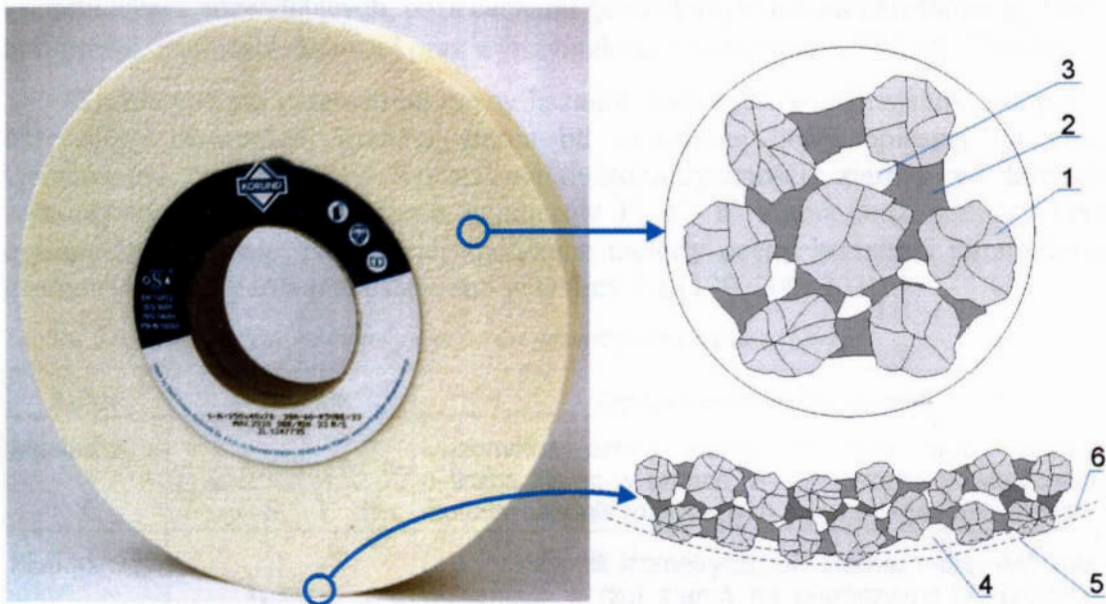
- rozkład czasu pracy ziaren definiowany jest jako liczba ziaren w grupach o określonym czasie pracy, mniejszym lub równym od okresu czasu szlifowania,
- pojęcie rozkładu prawdopodobieństwa, w odniesieniu do opisu funkcji losowych, określa zależność prawdopodobieństwa od określonej wartości zmiennej losowej.

ROZDZIAŁ 2

ANALIZA LITERATURY

2.1. Budowa ściernic

Ściernice konwencjonalne, z ziarnami z elektrokorundu szlachetnego, zbudowane są z dużej liczby nieregularnych ziaren umieszczonych w spoiwie. Proces wytwarzania, polegający na formowaniu, prasowaniu, a następnie wypalaniu ściernic powoduje, że pomiędzy ziarnami i spoiwem powstaje wolna przestrzeń, zwana porami (rys. 2.1) [130]. Podstawową rolą spoiwa w ściernicy jest takie związanie ziaren ściernych w objętości narzędzia ściernego, aby zapewnić odpowiednią skuteczność obróbki. W warunkach pracy ściernicy, z postępującym tępieniem spoiwo powinno zapewnić dostateczne utwierdzenie ziaren, natomiast w przypadku pożądanego samoostrzenia ściernicy zadaniem spoiwa jest zapewnienie możliwości wykruszeń zużytych ziaren, w celu odsłonięcia ziaren nowych [44].



Rys. 2.1. Budowa ściernicy z konwencjonalnych materiałów ściernych [130]:

1 - ziarno ściernie, 2 - spoiwo, 3 - pory, 4 - przestrzeń robocza,
5 - umowna zewnętrzna powierzchnia ściernicy, 6 - umowna powierzchnia spoiwa

Specyficzna budowa narzędzi ściernych jest główną przyczyną losowego rozmieszczenia ziaren w objętości ściernicy. Probabilistyczny charakter cech i właściwości narzędzi ściernych jest skutkiem [73]:

- **procesem produkcji ziaren ściernych i ściernicy**, w którym typowa jest losowość wielkości, kształtu, mikrogeometrii, promieni zaokrąglenia wierzchołków i kątów wierzchołkowych ziaren, losowość orientacji i położenia ziaren na czynnej powierzchni ściernicy, oraz makro–niejednorodność ściernicy,
- **procesem obciążania**, charakteryzującym się losowością wykruszania i wrywania ziaren, co jest skutkiem losowej wytrzymałości ziaren i spoiwa,
- **charakterem zużycia ściernicy**, na który wpływa losowość wytrzymałości ziaren ściernicy i sił wiązania ziaren ze spoiwem, a także losowość obciążenia ziaren.

2.1.1. Budowa i właściwości ziaren ściernych

Stosowane w obróbce ziarna ściernie z elektrokorundu szlachetnego najczęściej nie są monokryształami lecz mają budowę polikrystaliczną, składając się z bloków monokrystalicznych o różnej orientacji [44]. Tradycyjnie topione ziarna, otrzymywane metodą Bayera, najczęściej złożone są z jednostek o wielkości $0,1 \div 1 \text{ mm}$ [93]. Na właściwości mechaniczne ziaren z elektrokorundu (kruchość) zasadniczy wpływ ma porowatość (nie powinna przekraczać 5%) i obecność beta-tlenku glinu (jedenasto – glinianu sodu – $\text{Na}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3$), którego twardość (HV1 16,28 GPa) jest mniejsza od korundu (ponad 99% Al_2O_3 – twardość HV1 19,62 GPa) [174]. Ze względu na przeważającą budowę polikrystaliczną ziaren z elektrokorundu szlachetnego wytrzymałość mechaniczna zależy od wytrzymałości styku na granicy monokryształów korundu i połączeń wysokoglinowym szkłem. Wytrzymałość statyczna korundu monokrystalicznego na ściskanie wynosi około 3,7 MPa, natomiast polikrystalicznego około 0,9 MPa [175].

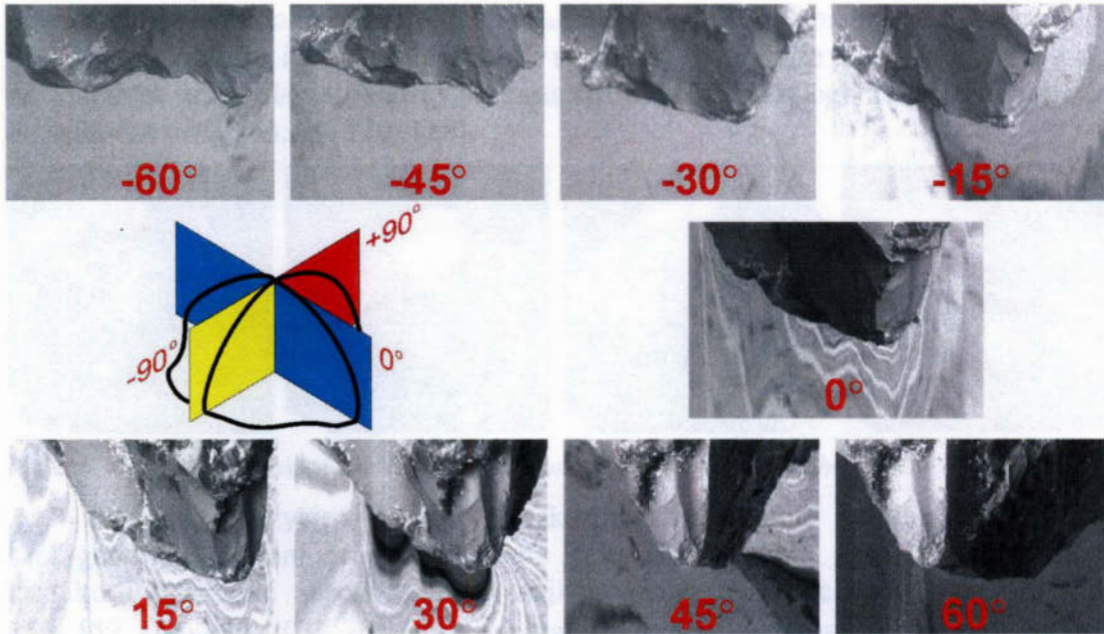
Geometryczne parametry ziaren ściernych mają zasadniczy wpływ na proces szlifowania, ponieważ od makro- i mikrogeometrii ziaren zależą procesy zachodzące podczas mikroskrawania. Ze względu na różnorodność form geometrycznych ziarna, precyzyjne zdefiniowanie kształtu jest bardzo trudne. Istnieje wiele metod oceny kształtu ziarna pozwalających, poza cechami geometrycznymi, na określanie gęstości nasypowej, zdolności skrawnej oraz wytrzymałości mechanicznej [38, 69, 200–202].

Podstawowym parametrem oceny kształtu ziarna jest współczynnik izometrii, określający odstępstwo kształtu ziarna od określonej bryły opisanej na nim. Opracowano wiele metod wyznaczania izometryczności ziarna, w których wykorzystuje się pomiary trzech wymiarów l' , a' , h' ziarna oraz pomiary brył opisanych na ziarnie. Najczęściej spotykane metody oceny kształtu i parametrów geometrycznych ziarna przedstawiono w tabelicy 2.1 [129, 200, 202].

Tablica 2.1. Metody oceny kształtu i parametrów geometrycznych ziarna [202]

Autor	Wskaźnik	Opisu parametrów ziarna
Mgeladze	$I_z = \frac{1,208}{S} \sqrt[3]{\frac{M^2 n}{d^2}}$	I_z –izometria zbioru ziaren, M–masa próby ziarna, n–liczba ziaren w próbce, S–sumaryczna powierzchnia rzutu swobodnie rozsypanych ziaren, d–gęstość ziarna
Mudrasow	$I_z = \frac{r}{R}$	I_z –współczynnik izometryczności ziarna, r–promień koła wpisanego w rzut ziarna na płaszczyznę, R–promień koła opisanego na rzucie ziarna na płaszczyznę
Li-Czan-Cze	$F_p = \frac{\sqrt{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}}{l' \cdot a' \cdot h'}$	F_p –współczynnik „pełności kształtu ziarna”, S_1 , S_2 , S_3 – pola powierzchni rzutu ziarna na trzy boki prostopadłościanu o wymiarach l' , a' , h' , opisanego na ziarnie
Rybakow i Drozdow	$K = \frac{3 \cdot W_{rz}}{4 \cdot \pi \cdot l' \cdot a' \cdot h' \cdot d}$	K–współczynnik miary odstępstwa masy rzeczywistego ziarna W_{rz} od masy materiału mającego kształt elipsoidy o osiach l' , a' , h' , gdzie d–gęstość materiału ściernego
Woźniak	$K = \frac{l' \cdot a' \cdot h'}{l'^3}$	K–współczynnik miary odstępstwa kształtu ziarna od sześcianu o boku równym długości l' ziarna

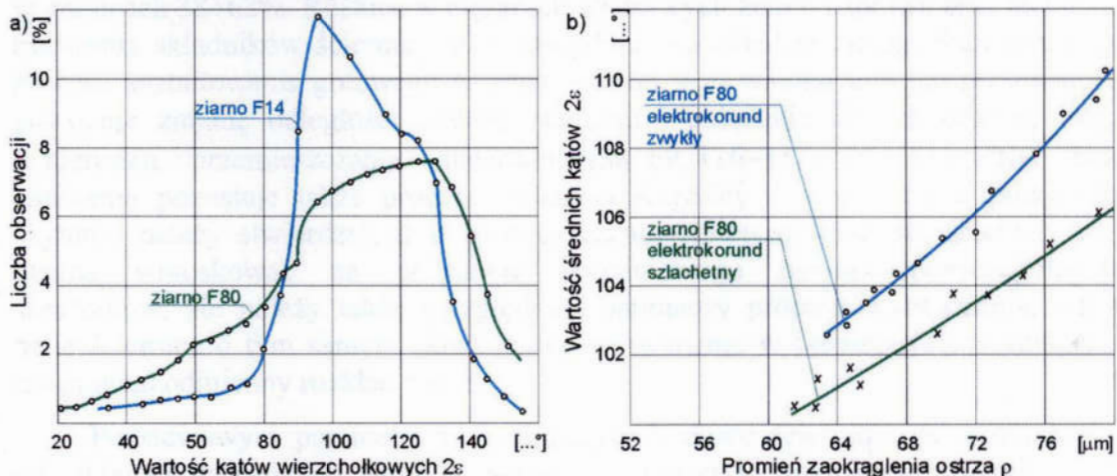
Wyznaczenie wymiarów charakterystycznych ziaren jest bardzo pracochłonne i nie pozwala na dostatecznie dokładny opis kształtu ziarna, szczególnie zmiennej mikrogeometrii powierzchni ziarna. W prostszej metodzie opartej na pomiarze tylko dwóch wymiarów rzutu ziarna na płaszczyznę (rys. 2.2) jako kryterium przyjmuje się



Rys. 2.4. Kształt wierzchołka pojedynczego ziarna elektrokorundu szlachetnego po zmianie kąta orientacji ziarna (badania własne)

Wyniki badań [16, 69, 201, 203] wskazują na nieznaczny wpływ wielkości ziarna na zmianę zakresu kątów, natomiast zmienia się postać rozkładu średniej wartości kąta 2ε (rys. 2.5). Dla ziaren większych maleje liczba ostrych krawędzi skrawających powodując pogorszenie zdolności skrawanej ziarna.

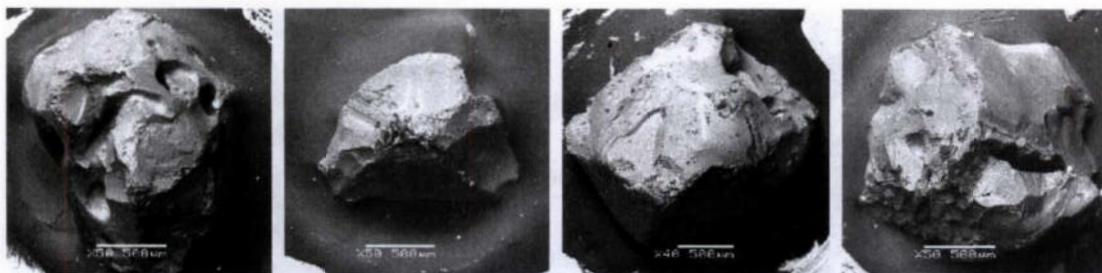
Na proces szlifowania znaczący wpływ ma promień zaokrąglenia wierzchołka ziarna ρ . Wzrost promienia powoduje zwiększenie wytrzymałości dynamicznej ziarna [201]. Jego wielkość jest ściśle związana w kątem wierzchołkowym ostrza, ale wartości promienia dla tych samych kątów wierzchołkowych różnią się w zależności od wielkości ziaren materiału ściernego (rys. 2.5). Zmiana promienia ρ następuje także w wyniku zużywania się ziaren: wzrasta w następstwie starcia wierzchołka ziarna, natomiast maleje w przypadku pęknięcia fragmentów ziarna ściernego.



Rys. 2.5. a) Wartości kątów wierzchołkowych ziarna F80 i F14 elektrokorundu szlachetnego
b) zależność kątów wierzchołkowych od promienia ich zaokrąglenia [201, 203]

Oceniając właściwości użytkowe ziaren należy rozpatrywać ich strukturę powierzchni (morfologię powierzchni). Ze względu na to, iż zagłębienie pojedynczego ziarna ściernego w materiale obrabianym stanowi nie więcej niż 5% jego największego wymiaru [165], istotnego znaczenia nabierają cechy morfologii

powierzchni ziarna takie jak: mikro- i makropęknięcia, zagłębienia na powierzchni, liczba wierzchołków i ich rozmieszczenie (rys. 2.6). Wszystkie te czynniki wpływają na charakter pracy ziarna podczas procesu szlifowania, oraz jego zużycie i zdolność do samoostrzenia [43, 79, 120, 128].



Rys. 2.6. Zdjęcia z mikroskopu skaningowego ziaren z elektrokorundu szlachetnego (badania własne)

Dostępne pozycje literatury wskazują, że ziarna ściernic poddawano szczegółowym badaniom, mającym na celu wyznaczenie zakresu parametrów kształtu i położenia zapewniających najkorzystniejsze właściwości skrawne [55, 150–152, 165, 199, 203]. Badania wpływu geometrii ziarna na proces mikroskrawania prowadzono między innymi z zastosowaniem metody Overcut Fly Milling [122, 133], w której zamocowane sztywno ziarno ściernic na obwodzie dysku wykonywało serię nacięć na powierzchni obrabianego materiału, dzięki czemu możliwa była analiza pojedynczych śladów skrawania oraz pomiary sił skrawania. Wyniki tych badań wykazały, że wzrost ujemnego kąta natarcia γ powoduje wzrost sił skrawania, i wywiera większy wpływ na składową normalną siły.

2.1.2. Struktura wewnętrzna ściernicy

Rozmieszczenie ziaren w objętości ściernicy zależy od wielu czynników i jest w znacznym stopniu losowe. Podstawowym czynnikiem wpływającym na rozmieszczenie są cechy samego ziarna ściernic, jego wielkość i kształt, wpływające na maksymalny stopień upakowania ziaren w objętości ściernicy. Zakres możliwych gęstości upakowania ziaren o określonym kształcie zawiera się w granicach 38÷62%. Różnice w ciężarach właściwych ziaren i spoiwa oraz technika mieszania składników ściernicy także decydują o rozkładzie ziaren. Sam przebieg procesu kształtowania gotowego wyrobu, sposób jego walcowania lub prasowania, powoduje zmianę odległości między ziarnami i układanie się ich dłuższą osią, w kierunku przemieszczania materiału [38, 69, 116–117, 130, 194]. Nie bez znaczenia pozostaje także proces wypalania ściernicy. Uwzględniając powyższe czynniki należy stwierdzić, iż o rozmieszczeniu ziaren w objętości ściernicy nie można wnioskować na podstawie procentowego udziału poszczególnych składników, ale należy także uwzględniać parametry procesu wytwarzania, gdyż dwie ściernice o tym samym składzie, ale wytwarzane w odmiennych warunkach, mogą mieć odmienny rozkład ziaren.

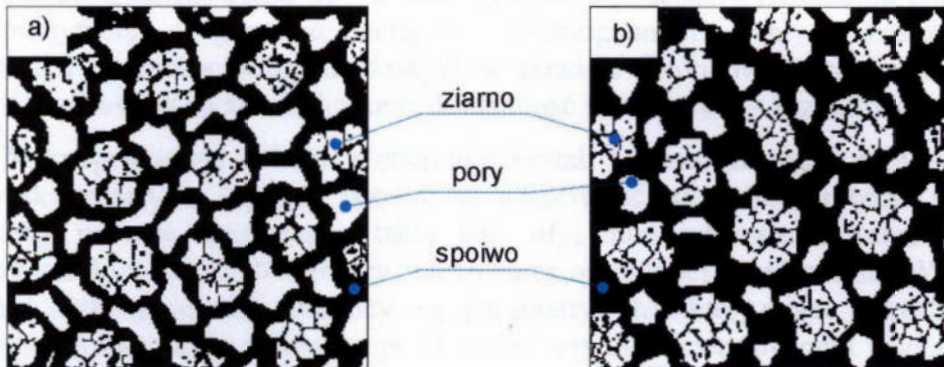
Podstawowym parametrem określającym budowę ściernicy jest procentowy udział trzech składników: ziaren V_z , spoiwa V_s i porów V_p , w objętości ściernicy.

$$V_z + V_s + V_p = 100\%, \quad (2.1)$$

Struktura ściernicy oznaczana liczbowo przez numery $N=1, 2, \dots, 12$ wskazuje na objętościową zawartość ziaren ściernic w objętości ściernicy V_z .

$$V_z = 64 - 2N(\%), \quad (2.2)$$

Zmiana objętościowych udziałów składników ściernicy wpływa się na jej właściwości skrawne i charakter pracy. Zwiększenie ilości spoiwa zwiększa wytrzymałość mostków spoiwa i jednocześnie zmniejsza objętość porów, powodując wzrost twardości ściernicy (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Struktura ściernicy a) otwarta, o małej twardości ściernicy - miękkiej
b) zwarta, o dużej twardości ściernicy

Z zachowaniem takich samych przekrojów mostków spoiwa możliwe jest jednak takie sterowanie procesem produkcji ściernic, aby uzyskać strukturę otwartą lub zwartą narzędzia, znacząco wpływającą na twardość ściernicy, od której zależy czas wykorzystania potencjału obróbkowego ziaren. Twardość ściernicy definiowana jest jako opór stawiany przez spoiwo podczas odrywania ziaren ze ściernicy, zależny od przyczepności spoiwa do ziarna i wytrzymałości mostków spoiwa łączących ziarna [38, 69, 116, 118, 130, 165]. Im twardsza jest ściernica, tym mniej intensywny jest proces wykruszeń całych ziaren, przez co, w przypadku przewagi zużycia ściernego ziaren, na powierzchni ściernicy dłużej znajdują się stępione ziarna ścierne.

2.1.3. Topografia czynnej powierzchni ściernicy

Określenie udziału procentowego poszczególnych składników nie daje wprost informacji o lokalnym rozmieszczeniu ziaren w objętości ściernicy, które zależy głównie rodzaju i wielkości ziaren ściernych, struktury ściernicy i rodzaju spoiwa. Ponadto na rozmieszczenie ostrzy skrawających wpływa proces obciążania czynnej powierzchni ściernicy i zmiany podczas szlifowania, w wyniku następujących procesów zużywania się ziaren: starcia wierzchołków aktywnych ziaren, mikropeknięć, czy też wykruszania się całych ziaren. Losowy charakter rozmieszczenia ostrzy skrawających na powierzchni ściernicy uzależniony jest głównie od: procesu produkcji materiału ściernego i ściernicy, procesu obciążania narzędzia i procesu postępującego zużycia [73].

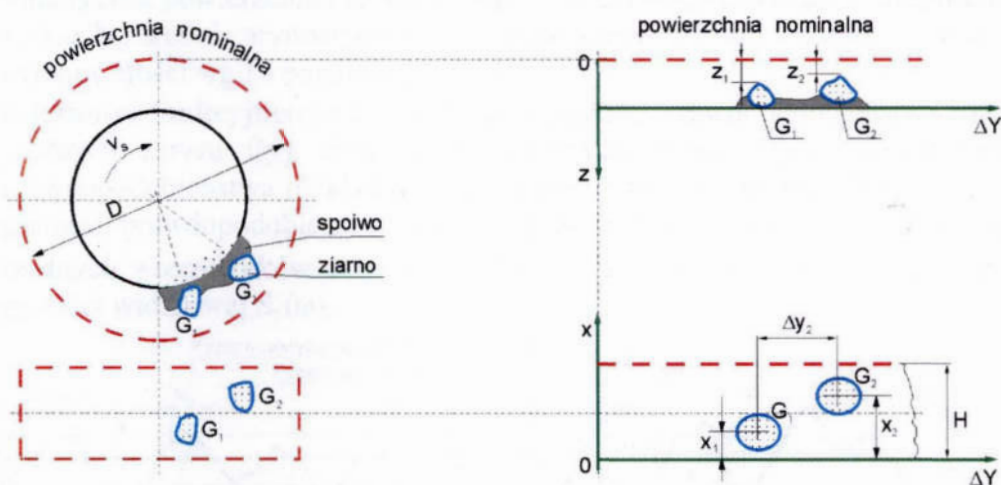
Zmiany rozmieszczenia ostrzy skrawających ziaren mają ogromny wpływ na realizację i wyniki procesu szlifowania. Przeprowadzono wiele badań w celu wyznaczenia parametrów charakteryzujących topografię ściernicy i wpływ zmian jej parametrów na efekty procesu szlifowania oraz możliwości jej prognozowania na podstawie wyników szlifowania. [4, 8, 15, 36, 46, 70–71, 90–92, 94–95, 101, 103, 118, 126, 139, 142, 144, 149, 153, 172, 176, 184, 187]. Podstawową barierą ograniczającą postęp w tej dziedzinie jest trudność identyfikacji i oceny topografii ściernicy, jak również trudności z dostępem do strefy szlifowania podczas obróbki i rejestracji zmian zachodzących podczas szlifowania. Dotychczasowe badania

dowodzą, że należy wyróżnić dwa obszary badań: makrogeometrii oraz mikrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy [4, 15, 90–92, 94–95, 103, 142].

Makrogeometria powierzchni ściernicy może być rozumiana jako zbiór cech dotyczących ukształtowania powierzchni ściernicy podczas wytwarzania narzędzia oraz modyfikacji w procesie obciągania. Makrogeometria wpływa znacząco na amplitudę i częstotliwość drgań własnych w układzie obróbkowym, od czego zależy falistość szlifowanej powierzchni oraz dokładność wymiarowo – kształtowa.

Mikrogeometria ściernicy obejmuje kształt i rozmieszczenie pojedynczych ostrzy skrawających. Wpływa istotnie na właściwości skrawne narzędzia oraz na parametry procesu szlifowania, takie jak: siły, moc szlifowania, intensywność zjawisk cieplnych, jakość warstwy wierzchniej obrobionej powierzchni. Ważnymi cechami mikrogeometrii ściernicy są parametry charakteryzujące przestrzenne, losowe rozmieszczenie ziaren na powierzchni czynnej ściernicy oraz usytuowanie ostrzy skrawających. Typowe ziarno ściernicze może mieć kilka ostrzy skrawających (rys. 2.3, 2.4, 2.6), o różnych promieniach zaokrąglenia naroży i różnych kątach wierzchołkowych. W badaniach procesu szlifowania, zwłaszcza w aspekcie opisu charakterystyki pracy i obciążenia poszczególnych ziaren oraz mikrogeometrii powierzchni ściernicy, istotne jest poprawne wyznaczenie parametrów opisujących rozmieszczenie ziaren na powierzchni czynnej narzędzia.

Przestrzenne rozmieszczenie ostrzy skrawających charakteryzują współrzędne w układzie odniesienia (rys. 2.8) pozwala na wyznaczenie odległości pomiędzy poszczególnymi ostrzami oraz odległości ostrzy od powierzchni zewnętrznej [15].



Rys. 2.8. Schemat do analizy rozmieszczenia ziaren na powierzchni ściernicy [15]

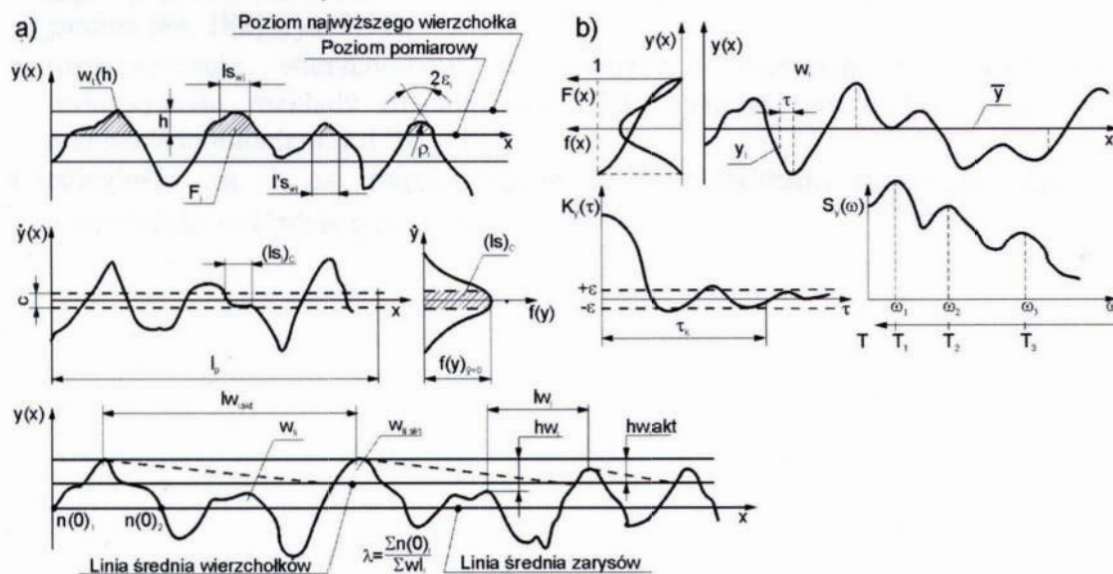
Liczne badania wskazują na losowy charakter rozmieszczenia ostrzy skrawających, jednak ich liczba i rozmieszczenie uzależnione są od zasad klasyfikacji ostrzy do zbioru potencjalnie aktywnych. Na ich ilość, poza właściwościami ziaren i ściernicy, wpływa sposób i parametry obciągania, parametry procesu obróbki oraz zużywanie się narzędzi ściernych w procesie szlifowania. Do oceny czynnej powierzchni ściernicy najczęściej wykorzystuje się parametry określające liczbę ostrzy statycznych przypadającą na jednostkę długości zarysu lub jednostkę powierzchni.

W badaniach dotyczących pomiaru parametrów czynnej powierzchni ściernicy wykorzystano odmienną metodykę. Stosowane metody badań można podzielić na:

- **statyczne** – odcisk powierzchni ściernicy na wybranym materiale [187], profilowanie 2D [166] i 3D [8, 84], stosowanie technik laserowych [70, 71] i mikroskopowych oraz metod elektro – pneumatycznych [153],
- **dynamiczne** – stosując rysowanie próbki [187], wyznaczenie sił szlifowania [165], temperatury w strefie szlifowania [41], wyznaczenie parametrów odbicia światła od wirującej ściernicy [19].

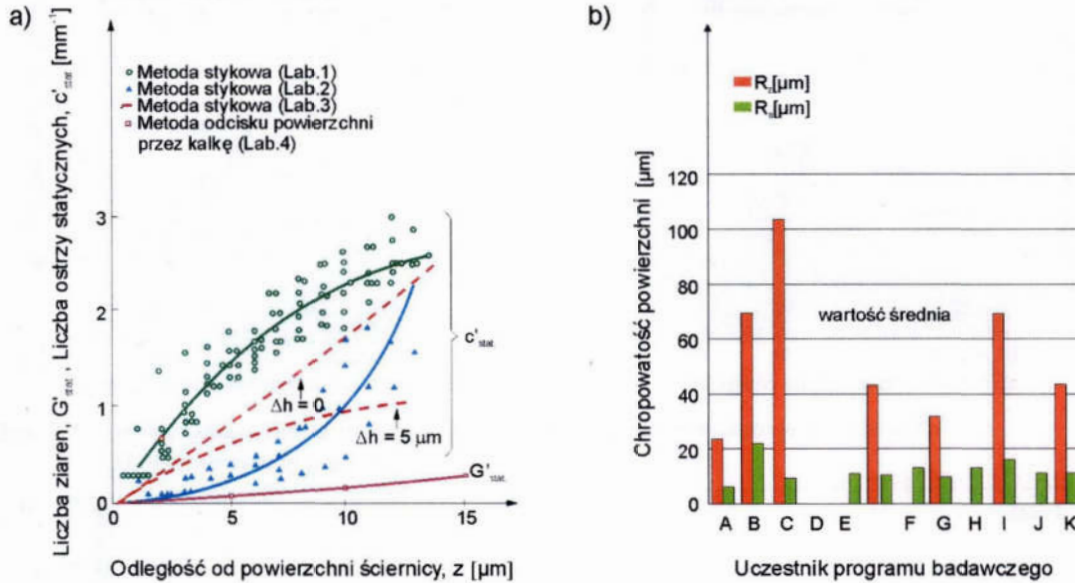
Pomimo opracowania wielu metod oraz wyznaczenia znacznej liczby parametrów, określających powierzchnię ściernicy, wciąż nie ma zgodności jaki powinien być wystarczający zbiór parametrów, które w jednoznaczny sposób identyfikowałyby mikrogeometrię powierzchni ściernicy ze względu na jej właściwości obróbkowe. Z analizy opracowań poświęconych metodom pomiaru i identyfikacji powierzchni ściernicy [34, 36, 57, 70–71, 73, 88–89, 92, 126, 132, 139–149, 176, 191] wynika, że najpełniejszą informację o przestrzennym rozmieszczeniu ostrzy skrawających zawierają opisy, najczęściej wywodzące się z analiz statystycznych, które można podzielić na:

- **parametry liczbowe** (rys. 2.9a): liczba wierzchołków przypadających na jednostkę długości w_L , liczba wierzchołków powyżej określonego poziomu $(w_L)_h$, liczba wierzchołków potencjalnie aktywnych w_{Lakt} , średnia odległość wierzchołków l_w , średnia wysokość wierzchołków h_w , wariancja wierzchołków $V(w)$, wariancja rzędnych zarysu $V(y)$, liczba przecięć zarysu linią średnią $n(0)$ przypadających na jednostkę długości, długość odcinka starcia wierzchołka l_{sw} , sumaryczna powierzchnia zarysu powyżej określonego poziomu F , długość nośna zarysu N_l , średnie arytmetyczne odchylenie zarysu od linii średniej R_a , wysokość chropowatości wg 10 punktów zarysu R_z ,
- **zależności funkcyjne** (rys. 2.9b): funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu rzędnych zarysu $f(y)$, dystrybuanta rzędnych zarysu $F(y)$, funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu rzędnych wierzchołków aktywnych $f(w_{akt})$, funkcja gęstości prawdopodobieństwa pierwszej pochodnej zarysu $f(\dot{y})$, dystrybuanta rzędnych wierzchołków aktywnych $F(w_{akt})$, funkcja autokorelacji $K_y(\tau)$, funkcja gęstości widmowej $S_y(\omega)$.



Rys. 2.9. Graficzna interpretacja parametrów opisujących rozmieszczenie ostrzy skrawających

Przeprowadzone badania [187, 179] CIRP dotyczące oceny topografii ściernic potwierdziły, że wyniki pomiarów tych samych obszarów ściernic ale dokonane różnymi metodami lub przez różne zespoły badawcze cechuje duża rozbieżność.

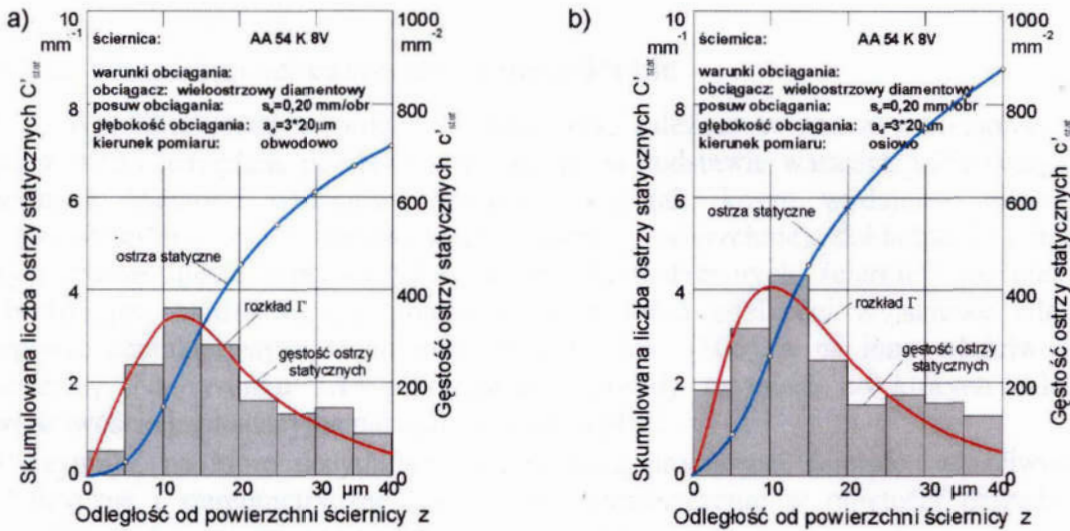


Rys. 2.10. Wpływ metod pomiaru na: a) ocenę liczby ziaren ściernych oraz statycznych ostrzy skrawających w funkcji odległości od powierzchni ściernicy [112, 187], b) różnice w ocenie parametrów chropowatości powierzchni ściernicy [179]

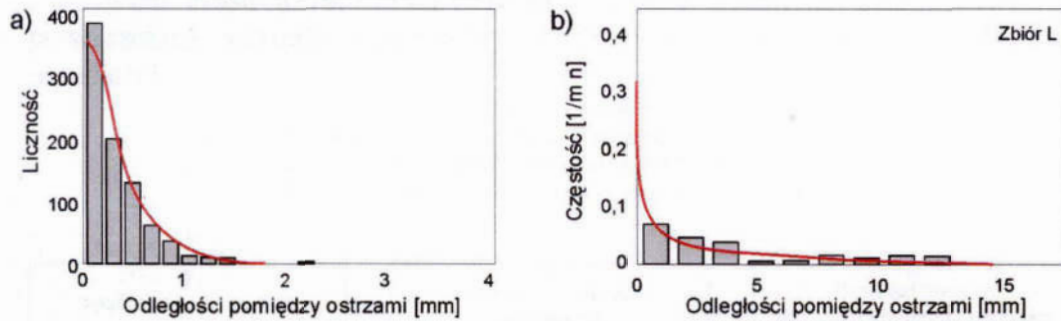
Z zestawienia pomiarów (rys. 2.10) wynika, że zarówno w ocenie ilości ostrzy skrawających jak i pomiarze chropowatości powierzchni ściernicy, różnice wynikające z zastosowania odmiennych metod mogą być znaczne.

Ze względu na losowy charakter rozmieszczenia ostrzy na powierzchni ściernicy bardzo ważnym elementem oceny czynnej powierzchni ściernicy jest określenie postaci i parametrów rozkładów rozmieszczenia poszczególnych ziaren. Przeprowadzone badania [84, 173, 182, 183] wyznaczyły charakter rozkładów ostrzy skrawających. Pomiedzy wynikami, zawartymi w poszczególnych opracowaniach wystąpiły różnice w doborze funkcji opisującej rozkład położenia ostrzy. Do opisu:

- rozmieszczenia wierzchołków ziaren ściernych w kierunku promieniowym czynnej powierzchni ściernicy stosowano rozkład Weibulla [173] lub rozkład gamma [84, 182] (rys. 2.11),
- rozmieszczenia wierzchołków w kierunkach osiowym i obwodowym wykorzystano rozkłady równomierne [173], gamma (rys. 2.12a) [183] oraz rozkład Weibulla (rys. 2.12b) [113],
- odległości Δx i Δy między kolejnymi wierzchołkami stosowano funkcje o rozkładzie wykładniczym [173].

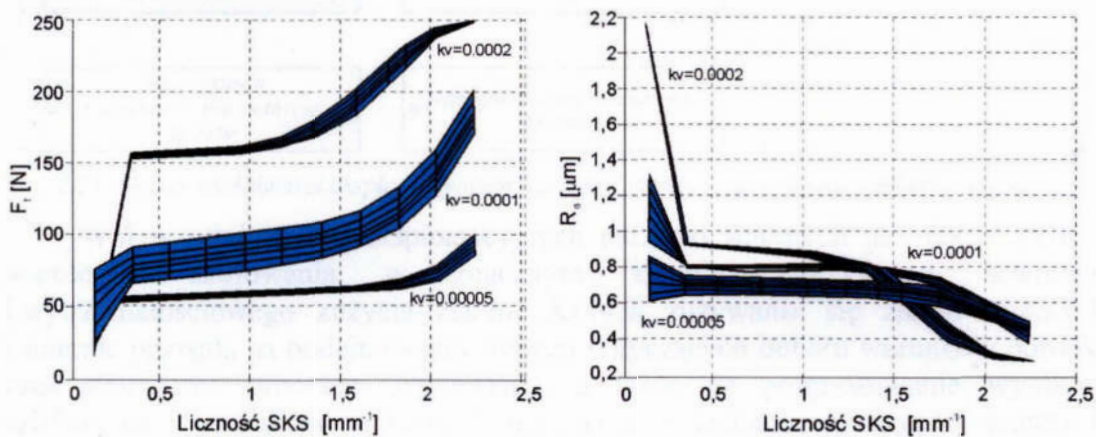


Rys. 2.11. Skumulowana liczba statycznych ostrzy skrawających mierzonych w kierunku: a) obwodowym b) poprzecznym [84]



Rys. 2.12. Wykres dopasowania funkcji dla zbiorów odległości między statycznymi krawędziami skrawającymi: a) rozkład gamma [183] b) rozkład Weibulla [173]

Próbę wyznaczenia zależności parametrów procesu szlifowania i jego wyników od liczby ostrzy aktywnych podjęto stosując metody symulacji komputerowej, z użyciem sieci neuronowych [114, 184, 185]. Zbudowany w oparciu o nią kaskadowy system modeli pozwolił na uzyskanie szybkiej i spójnej odpowiedzi o stanie czynnej powierzchni ściernicy dotyczącej jej topografii, potencjalnych oraz realnych właściwości użytkowych. Jako ważne wnioski wpływające z tych badań należy wymienić: iż wzrost licznosci statycznych krawędzi skrawających (SKS) powoduje wzrost wartości siły stycznej szlifowania F_t oraz spadek wskaźnika chropowatości R_a powierzchni obrobionej (rys. 2.13).

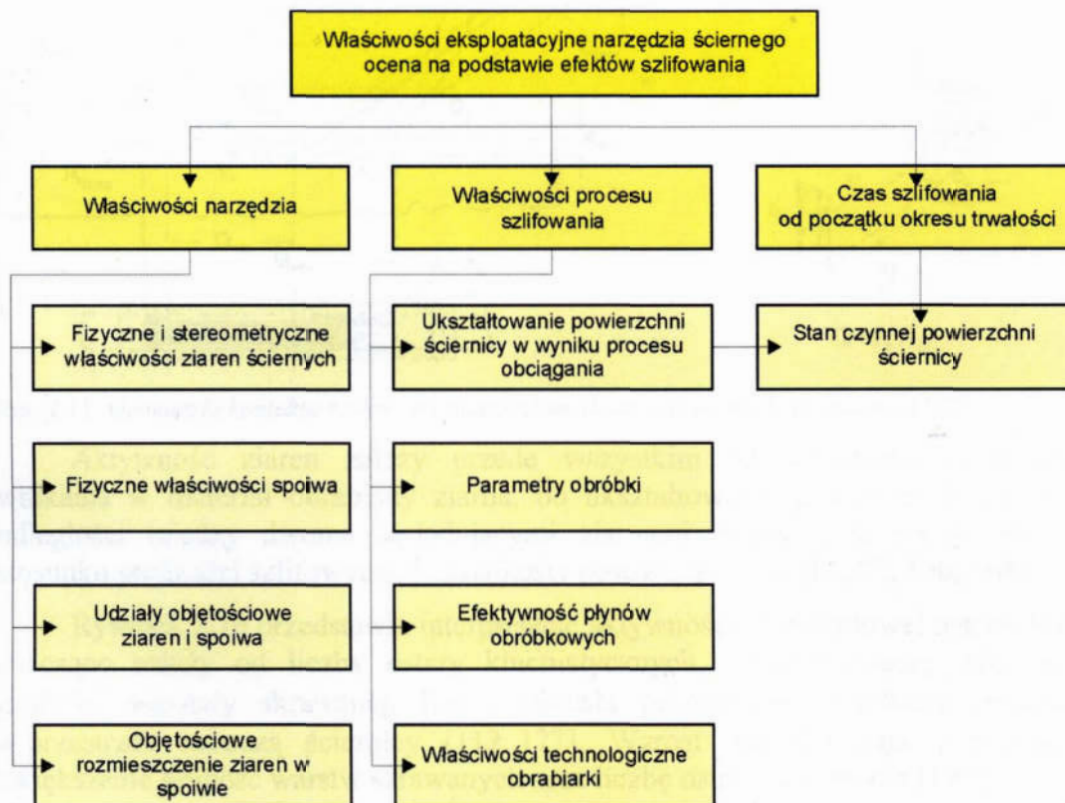


Rys. 2.13. Zależność stycznej siły szlifowania F_t oraz chropowatości R_a od licznosci statycznych krawędzi skrawających dla różnych intensywności szlifowania k_v [184]

2.1.4. Właściwości eksploatacyjne ściernic

Wyniki obróbki w procesie szlifowania, zależące w znacznym stopniu od właściwości narzędzia, poddawane są ocenie na podstawie wartości, jakie osiągają wybrane wielkości wyjściowe procesu, takie jak: koszt, wydajność obróbki, właściwości fizyczne i stereometryczne warstwy wierzchniej, dokładność, i inne. Syntetyczne ujęcie wpływu właściwości eksploatacyjnych ściernicy na efekty obróbki jest bardzo trudne, ponieważ na niektóre wielkości wyjściowe silniej wpływa charakterystyka technologiczna obrabiarki [106], a na inne właściwości ściernicy. Na rysunku 2.14 przedstawione zostały czynniki, od których zależą właściwości eksploatacyjne narzędzi ściernych [48]:

- czynniki, na które decydujący wpływ mają producenci ściernic: właściwości fizyczne i stereometryczne ziaren, ich rozmieszczenie w objętości narzędzia, właściwości spoiwa oraz struktura i twardość ściernicy,
- czynniki zależne od użytkownika: stan powierzchni czynnej ściernicy (zmienny z upływem czasu użytkowania narzędzia między kolejnymi odnowieniami jej powierzchni), warunki i parametry obróbki oraz właściwości technologiczne obrabiarki,



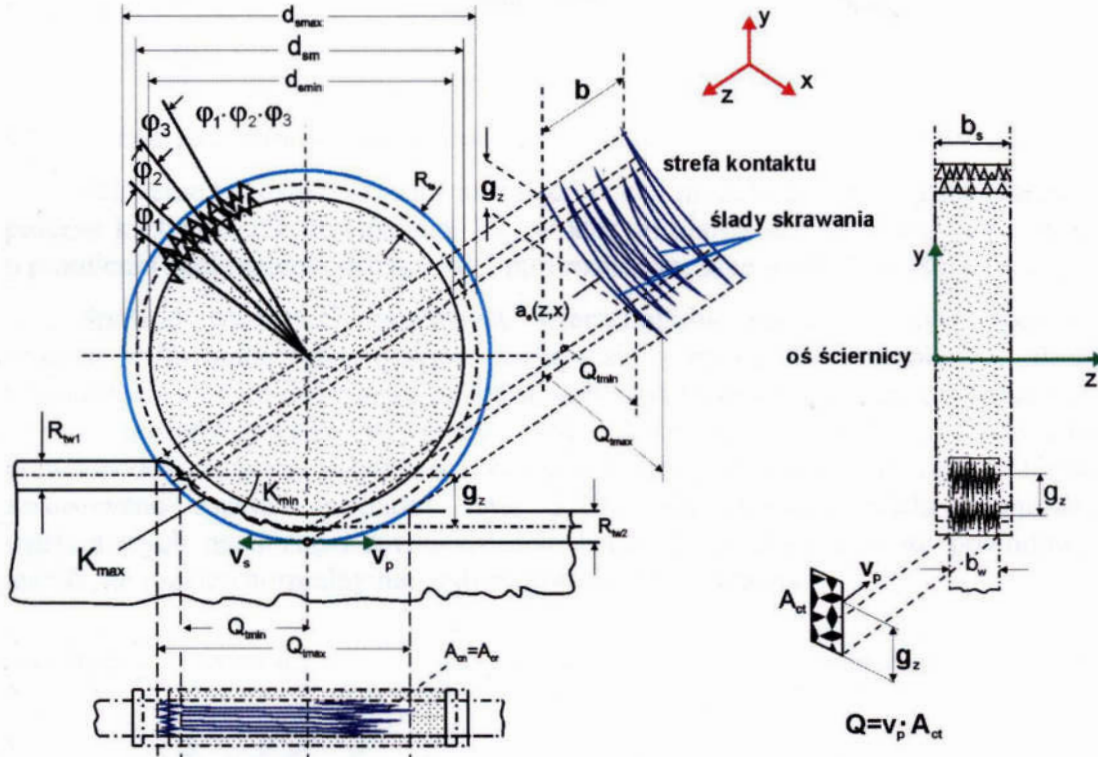
Rys. 2.14. Ocena właściwości eksploatacyjnych narzędzi ściernych na podstawie efektów szlifowania[48]

Wpływ właściwości eksploatacyjnych narzędzi ściernych na efekty obróbki w procesie szlifowania w znacznym stopniu zależy od ściernego i wytrzymałościowego zużycia ziaren. Analiza zużycia się ziaren ściernych i ściernic pozwala na podejmowanie decyzji dotyczących doboru warunków obróbki oraz sterowania procesem szlifowania, a także na prognozowanie wyników szlifowania i poszukiwanie nowych rozwiązań w technologii narzędzi ściernych [10, 15, 52, 59, 60, 69, 130].

2.2. Mechaniczne obciążenie narzędzi ściernych

2.2.1. Cechy procesów szlifowania

Najważniejszym celem procesu szlifowania, w wyniku oddziaływania wielu, losowo rozłożonych ziaren na materiał obrabiany, jest odpowiednie ukształtowanie powierzchni produktu. Końcowa geometria obrobionej powierzchni jest efektem kumulowania się śladów skrawania poszczególnych ziaren ściernych (rys. 2.15).

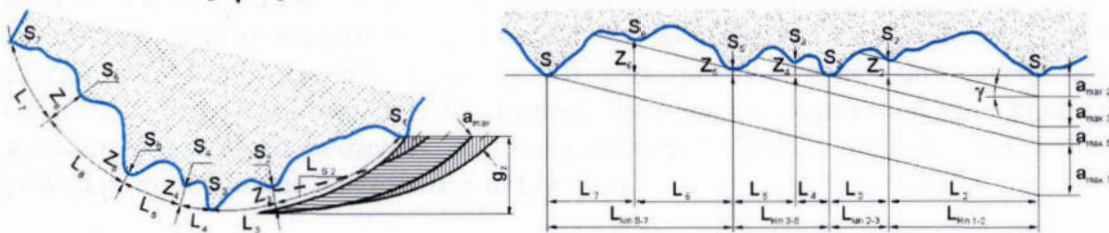


Rys. 2.15. Geometria kontaktu ściernicy z materiałem obrobionym i ślady skrawania [162]

Aktywność ziaren zależy przede wszystkim od nominalnej głębokości wnikania w materiał obrabiany ziarna, od ukształtowania powierzchni ściernicy, odległości między dwoma sąsiadującymi ziarnami, średnicy ściernicy oraz od stosunku prędkości szlifowania do prędkości posuwu $q = v_s / v_p$ [16, 82, 130, 168].

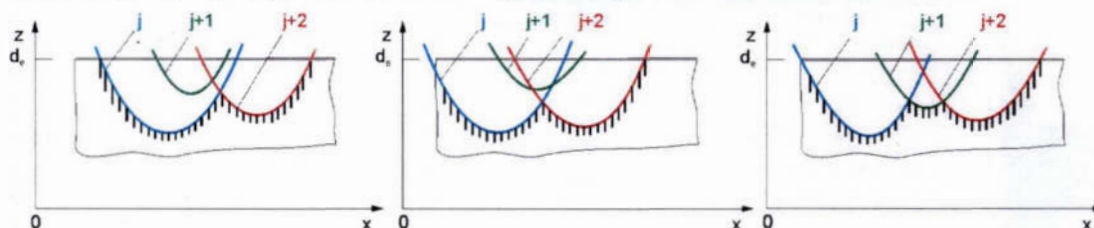
Rysunek 2.16 przedstawia interpretację aktywności promieniowej ostrzy, która znacząco zależy od liczby ostrzy kinematycznych, odstępu między nimi oraz grubości warstwy skrawanej. Kąt γ określa promieniowe wnikanie materiału w przestrzeń roboczą ściernicy [112, 177]. Wzrost wartości kąta γ powoduje zwiększenie grubości warstw skrawanych oraz liczbę ostrzy aktywnych [177].

$$\tan \gamma = \frac{v_p}{v_s} \sqrt{\frac{a}{D_s}} \quad (2.3)$$



Rys. 2.16. Wyznaczenie promieniowej aktywności ziaren [168]

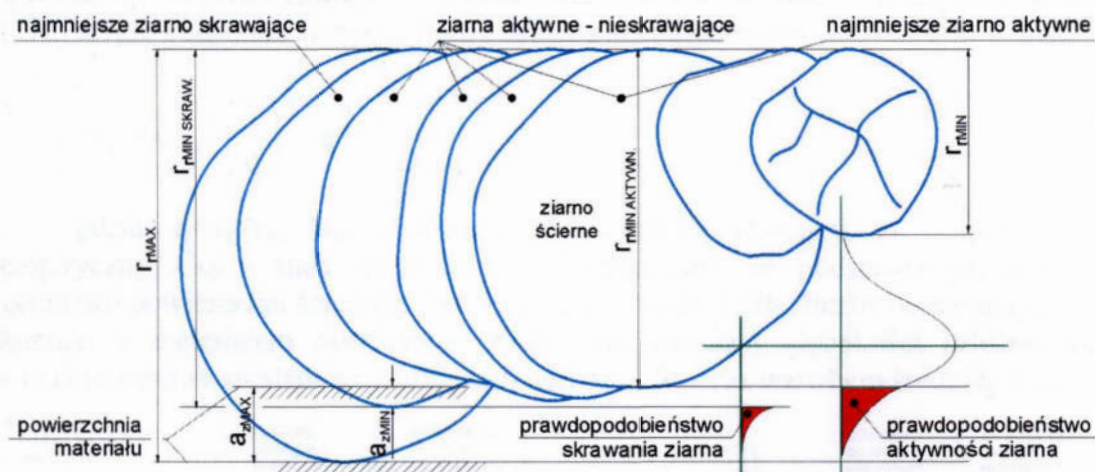
W pracy [18] uznano założenie, że wszystkie ostrza aktywne skrawają całą swoją szerokością za niewystarczające i wykazano, że liczba ziaren aktywnych biorących udział w szlifowaniu jest większa od ilości ziaren mających wpływ na kształtowanie obrobionej powierzchni. Wynika to z efektu częściowego kontaktu wielu ziaren aktywnych z materiałem (rys. 2.17).



Rys. 2.17. Efekt pokrywania się śladów skrawania: a) całkowicie, b) częściowo, c) bez pokrycia [18]

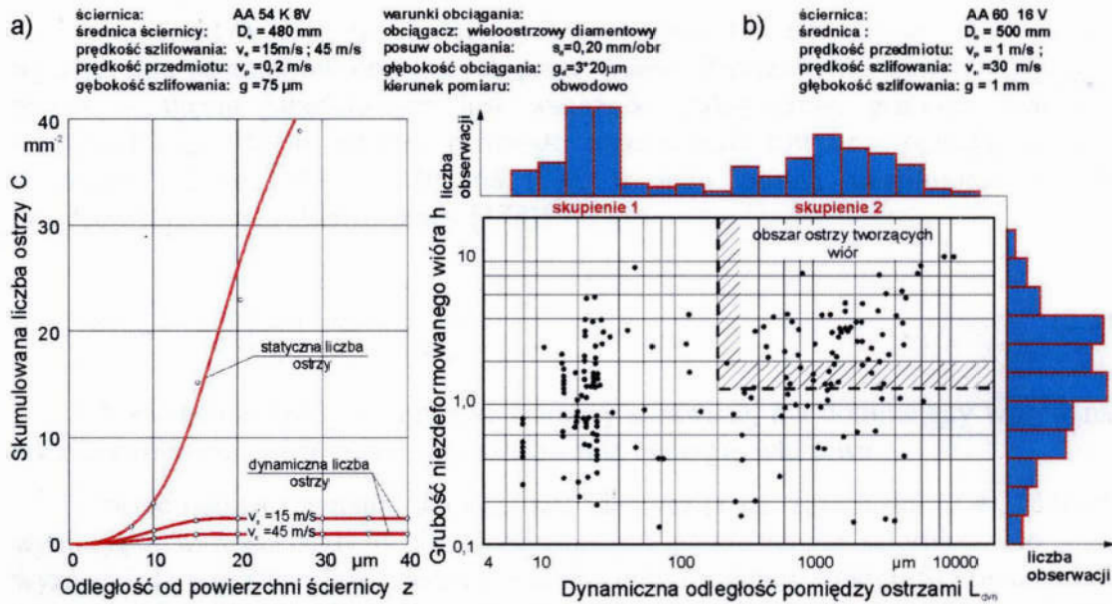
Założenie to zostało również uwzględnione w modelu geometrycznej symulacji procesu kształtowania powierzchni [6], w którym ziarna zamodelowano jako sfery o promieniu zaokrąglenia ostrza $\rho=0,2$ mm rozmieszczone wzdłuż zarysu ściernicy.

Spośród wszystkich aktywnych wierzchołków ziaren ściernych, podczas procesu szlifowania, tylko niektóre stykają się z materiałem obrabianym. Próbe wyznaczenia aktywności ziaren, na którą wpływają probabilistyczne cechy rozmiaru ziarna, przeanalizowano w pracy [45]. Wyznaczono zależności pomiędzy prawdopodobieństwem aktywności ziarna i rozmiarem ziarna, do opisu którego zastosowano rozkład normalny (rys. 2.18). Kumulowanie wielu czynników wpływających na liczbę i rozmieszczenie ostrzy skrawających może powodować jednak, że rozkład normalny nie będzie dostatecznie dokładny.



Rys. 2.18. Schemat zależności prawdopodobieństwa aktywności ziaren od rozmiaru ziarna [45]

Wyznaczenia aktywności ostrzy dokonano również w pracach [82, 84], w których wykazano, że liczba ostrzy biorących udział w kształtowaniu powierzchni stanowi około 5–12% liczby ostrzy potencjalnie aktywnych. Rysunek 2.19a przedstawia wzrost skumulowanej ilości ostrzy skrawających wraz ze wzrostem odległości od powierzchni ściernicy. Wzrost liczby ostrzy aktywnych jest ograniczony ich położeniem do pewnej głębokości, ograniczającej kontakt z materiałem oraz jest zależny od prędkości skrawania. Wzrost prędkości skrawania powoduje zmniejszenie liczby ostrzy aktywnych.



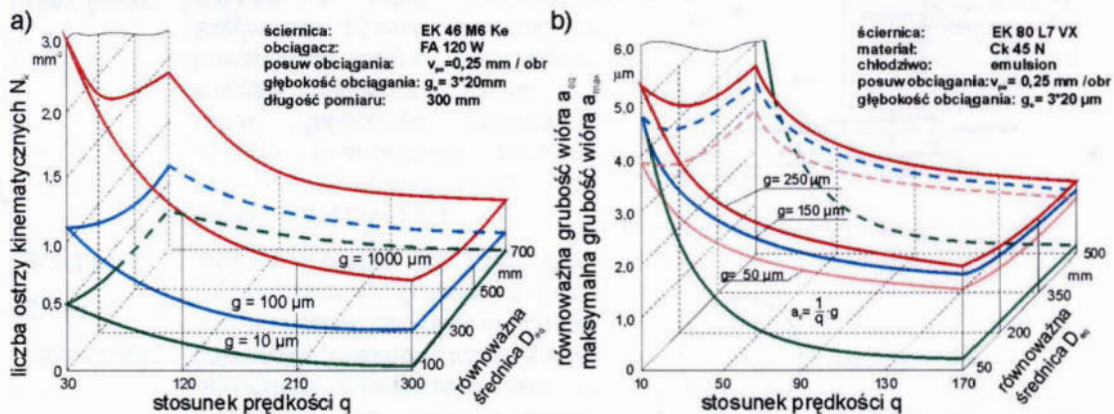
Rys. 2.19. a) Wyznaczenie promieniowej aktywności ziaren [84], b) graniczne warunki, dla powstawania wiórów [82]

W pracy [82] dokonano też oszacowania grubości warstwy skrawanej (rys. 2.19b). W czasie badań wyznaczono dwa obszary skupienia wstępowania wartości a_{zmax} . Wnioskowano, że tylko ostrza, dla których wartość L_{dyn} jest większa od średniej średnicy ziarna, oraz wartość a_{zmax} jest większa od 1–1,5 μ m uczestniczą w procesie tworzenia wióra (zakreślony obszar) i stanowią 25% wszystkich ziaren.

Na podstawie zależności opisujących liczbę ostrzy kinematycznych N_k , wyznaczonych przez Königa i Kassena, Wenera, Lortza oraz Yegenoglu w pracy [178] wyprowadzono zależność liczby ostrzy kinematycznych:

$$N_k = C_{Nk} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e_1} \cdot g^{\frac{e_1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{D_{eq}}\right)^{\frac{e_1}{2}}, \quad (2.4)$$

gdzie: $q = v_s / v_p$, D_{eq} – równoważna średnica ściernicy, e_1 – wykładnik empiryczny, C_{Nk} – stała wyznaczana doświadczalnie, na podstawie parametrów geometrii powierzchni ściernicy. Jak wynika z rysunku 2.20a, liczba ostrzy mających kontakt z materiałem obrabianym rośnie dla większej głębokości szlifowania, a maleje wraz ze wzrostem stosunku prędkości $q = v_s / v_p$ oraz wzrostem średnicy D_{eq} .



Rys. 2.20. a) Liczba ostrzy kinematycznych na powierzchni ściernicy N_k , b) zmiany maksymalnej grubości warstwy skrawanej a_{zmax} [178]

Ocena aktywności ziaren ściernych i wyznaczenie ich obciążenia, wymaga wyznaczenia parametrów opisujących pracę ziarna. Parametrem charakteryzującym proces w ujęciu jakościowym jest wskaźnik maksymalnej grubości warstwy skrawanej a_{zmax} . Wielu autorów dokonało wyznaczenia równania opisującego ten wskaźnik [15, 16, 108, 112, 130, 168, 178], a jego postać uogólniona została przedstawiona (rys. 2.20b) w pracy [178]:

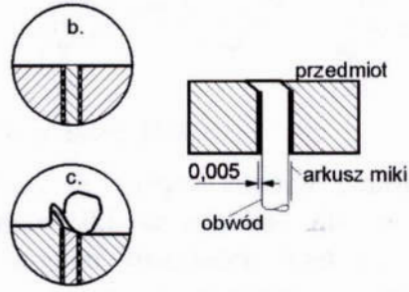
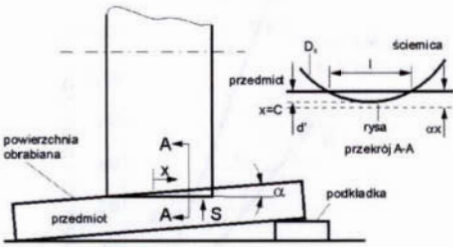
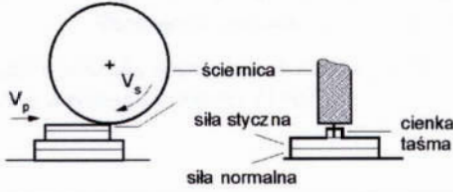
$$a_{zmax} = C_a \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e_1} \cdot g^{\frac{e_2}{2}} \cdot \left(\frac{1}{D_{eq}}\right)^{\frac{e_3}{2}}, \quad (2.5)$$

Dowodzono [168], że grubość warstwy skrawanej ma dominujący wpływ na jakość obrobionej powierzchni, siły szlifowania i energię właściwą.

Postać ogólna równania dla a_{zmax} jest identyczna jak zależności (2.4), różnice wynikają z wartości stałych charakteryzujących powierzchnię ściernicy. Do jego wyznaczenia potrzebna jest czasochłonna procedura pomiaru topografii powierzchni ściernicy. Przebieg zmian a_{zmax} dla przykładowego procesu (rys. 2.20b) [178] potwierdza spadek grubości warstwy skrawanej przez ziarna aktywne wraz ze wzrostem stosunku prędkości $q=v_s/v_p$.

W tabelicy 2.2 zestawiono wybrane metody pomiaru aktywności ziaren.

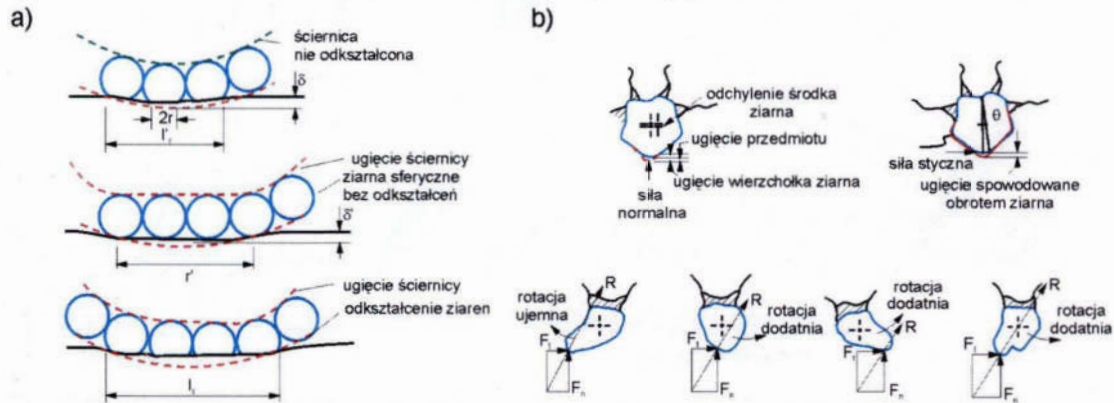
Tablica 2.2. Wybrane, eksperymentalne metody pomiaru aktywności ziaren w strefie szlifowania

Autor	Opis metody	Schemat metody
Peklenik 1957 [209]	Metoda termopar, polega na umieszczeniu w przedmiocie szlifowanym izolowanego drutu platynowego, tworzącego złącze termoelektryczne. Każde ziarno mające kontakt w strefie złącza generuje sygnał rejestrowany na oscyloskopie. Nie można jednak odróżnić kontaktów ziaren następujących jednocześnie lub w niewielkich odstępach czasu.	
Nakayama Shaw 1967 [165]	Metoda polega na szlifowaniu wypolerowanej, pochylonej próbki, z dużą prędkością posuwu 0,6 m/s i małą prędkością szlifowania 12 m/s. Powstałe na powierzchni próbki rysy odpowiadają kontaktom ziaren dla różnej głębokości skrawania. Metoda umożliwia zliczenie kolejnych, następujących po sobie kontaktów ziaren.	
Brecker Shaw 1974 [165]	Metoda polega na szlifowaniu cienkiej taśmy o grubości 0,1 mm zamocowanej na dynamometrze piezoelektrycznym. Liczba ziaren aktywnych wyznaczana jest na podstawie wskazań dynamometru. Metoda umożliwia pomiar bardzo wąskiej strefy szlifowania.	

2.2.2. Wpływ wybranych czynników na obciążenie ziaren ściernych

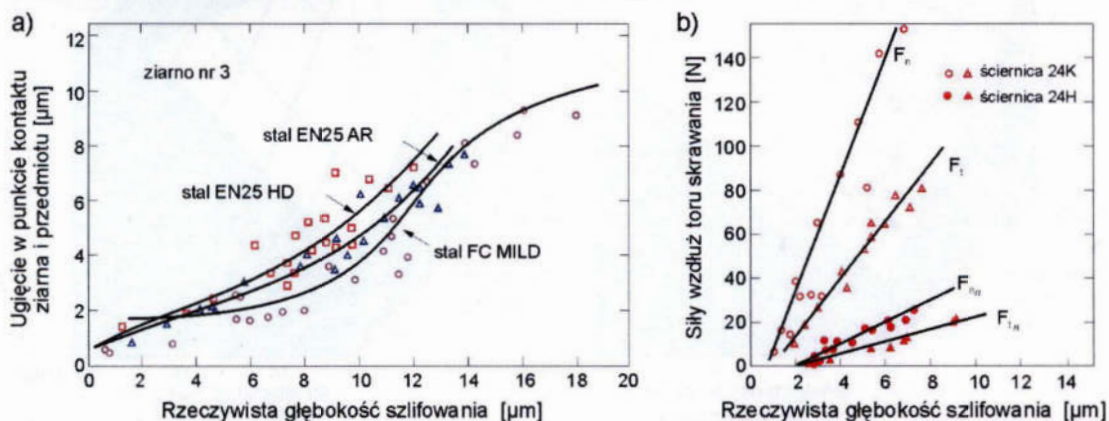
Istotnym czynnikiem wpływającym na proces skrawania pojedynczym ziarnem jest sposób jego utwierdzenia, uwzględniający lokalne przemieszczenia ziarna na drodze skrawania. Analizy wpływu podatności utwierdzenia ziarna na proces skrawania dokonano w badaniach [50,150–152, 171].

W pracy [20], wykazano, że całkowite ugięcie sprężyste ściernicy jest sumą odkształcenia ściernicy oraz odkształceń pojedynczych ziaren (rys. 2.21a). Odkształcenia zależą głównie od składowej normalnej siły skrawania. W pracach [157–160, 191] rozwinięto analizę, dowodząc, że należy także uwzględnić siłę styczną, która powoduje odchylenia ziaren podczas skrawania. Określono dwa kierunki obrotu ziarna: dodatni i ujemny. Rotacja dodatnia powoduje zmniejszenie głębokości skrawania ziarna wpływając na zwiększenie liczby kontaktów, w których następuje jedynie odkształcenie sprężyste lub plastyczne materiału (rys. 2.21b). Prawdopodobieństwo występowania rotacji ujemnej jest niewielkie.



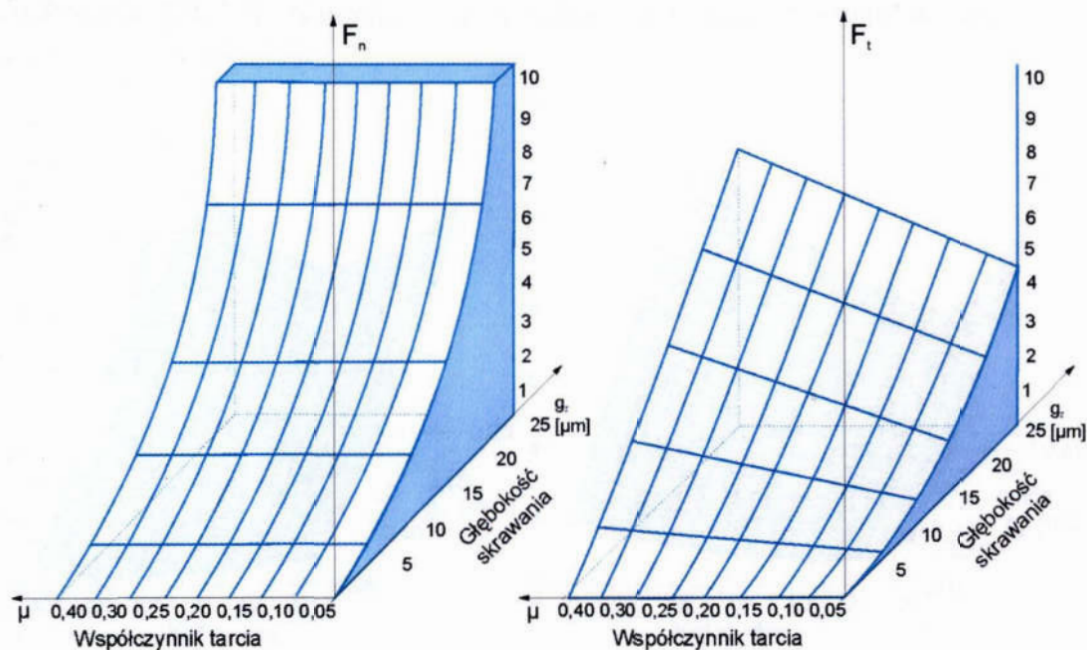
Rys. 2.21. Schemat odkształceń sprężystych: a) ściernicy [20], b) ziaren [158]

W opracowaniach [159, 160] wnioskowano, że wpływ zmiany twardości obrabianego materiału na ugięcie ziaren jest niewielki, szczególnie dla małych głębokości skrawania (rys. 2.22a), natomiast stopień twardości ściernicy jest znaczący. Dla ściernicy twardszej wartości zarówno wartości składowej normalnej i stycznej siły szlifowania są większe (rys. 2.22b).

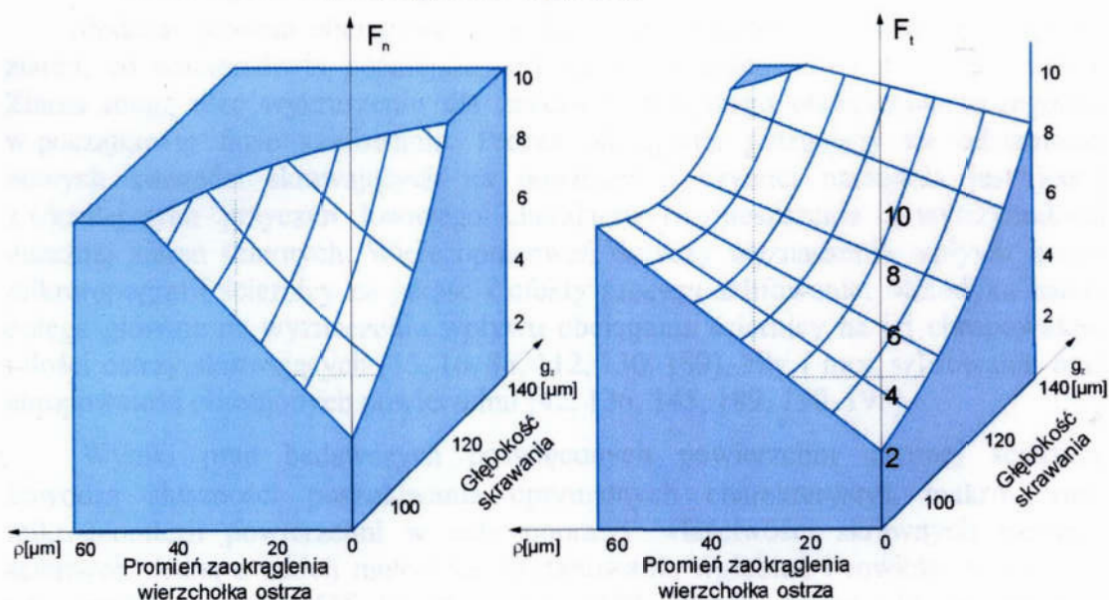


Rys. 2.22. a) Odkształcenie ziaren w funkcji głębokości szlifowania dla różnych materiałów [159], b) siły skrawania w funkcji głębokości dla ściernic o różnej twardości [160]

Kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na obciążenie ziaren ściernych jest promień zaokrąglenia wierzchołka ostrza skrawającego ρ . Właściwości ziaren oraz proces ich ściernego i wytrzymałościowego zużycia powodują, że promień zaokrąglenia wierzchołka ostrza jest zmienny w czasie procesu szlifowania. W pracy [12] przedstawiono analizę oporów skrawania ziarna ściernego podczas szlifowania, wykorzystując model kształtu ziarna w postaci stożka z kulistym zakończeniem wierzchołka. Wyznaczono wpływ promienia zaokrąglenia wierzchołka ziarna na zmiany składowych siły szlifowania (rys 2.23 i 2.24).

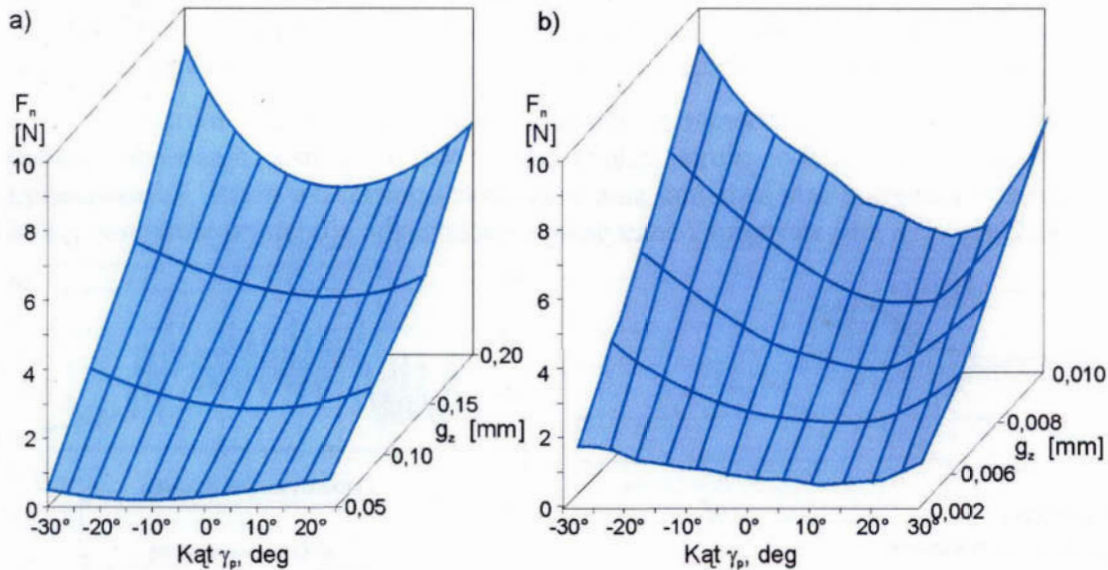


Rys. 2.23. Zmiany wartości składowej normalnej i stycznej składowej siły szlifowania w funkcji współczynnika tarcia i głębokości skrawania ziarnem o kącie wierzchołkowym $2\varepsilon=120^\circ$ i promieniu zaokrąglenia $\rho=20\mu\text{m}$ [12]



Rys. 2.24. Zmiany wartości składowych normalnej i stycznej siły skrawania w funkcji promienia zaokrąglenia wierzchołka ziarna ściernego ρ i głębokości g_z [12]

Poza doświadczalnymi metodami wyznaczenia wpływu geometrii ostrza na obciążenie ziaren ściernych, analizowano również wyniki prac polegających na modelowaniu i eksperymentalnej weryfikacji modeli. Duży poziom zgodności modelowania i eksperymentów świadczy o przydatności metod symulacji [119]. Jako przykład zgodności wyników metod symulacji procesu szlifowania i badań doświadczalnych można przedstawić wyniki prac autorów publikacji [23–26, 77] Rysunek 2.25a przedstawia wpływ zmiany kąta natarcia ziarna i dosuwu na wartość składowej normalnej siły szlifowania uzyskane z symulacji komputerowej procesu szlifowania [24, 25]. Natomiast na rysunku 2.25b przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych [77].



Rys. 2.25. Wpływ zmiany kąta natarcia ziarna i dosuwu na wartość składowej normalnej siły szlifowania: a) z symulacji komputerowej procesu szlifowania [24, 25]; b) wyniki eksperymentalne [77]

Podczas procesu obciążania ściernicy często dochodzi do naruszenia wiązań ziaren, co uniemożliwia późniejsze wykorzystanie potencjału obróbczego ziarna. Ziarna mogą ulec wykruszeniu dla znacznie mniejszego obciążenia, szczególnie w początkowej fazie szlifowania. Proces obciążania polegający na odślanianiu nowych krawędzi skrawających na powierzchni czynnej narzędzia jest jedną z ważniejszych przyczyn losowego charakteru rozmieszczenia i wytrzymałości doraźnej ziaren ściernych. Wiele opracowań dotyczy wyznaczenia wpływu zmian mikrotopografii ściernicy na jakość i efekty procesu szlifowania. Metodyka badań polega głównie na wyznaczeniu wpływu obciążania ściernicy na jej chropowatość i ilości ostrzy skrawających [15, 16, 88, 112, 130, 189], siły i moc szlifowania oraz chropowatość obrobionych powierzchni [42, 136, 145, 189, 190, 195].

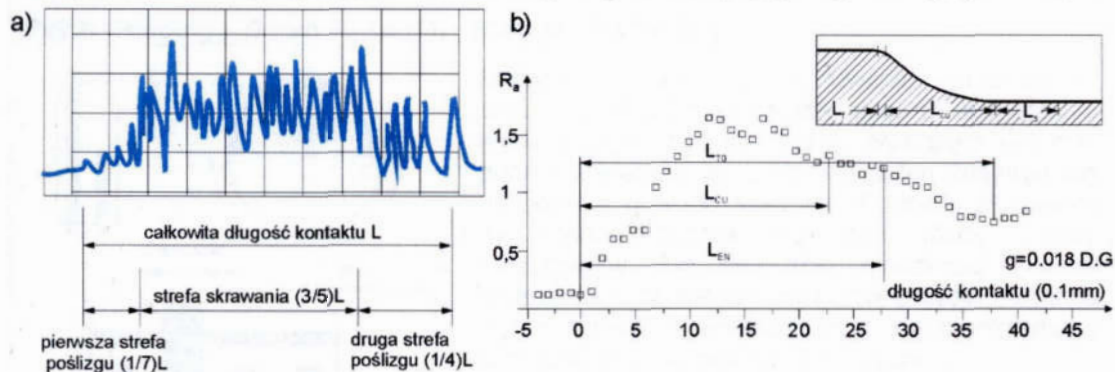
Wyniki prac badawczych poświęconych powierzchni czynnej ściernicy dowodzą słuszności poszukiwania optymalnych charakterystyk makro– oraz mikrogeometrii powierzchni w celu poprawy właściwości skrawnych narzędzi ściernych. Jedną z takich metod jest kształtowanie wgłębień i rowków na czynnej powierzchni ściernicy [15, 16, 39, 56, 146, 147]. Wyniki badań [39, 58, 145, 146, 147] dowodzą, że wprowadzenie nieciągłości na czynnej powierzchni ściernicy wpływa na zmniejszenie intensywności zużycia ściernicy, przyczynia się do poprawy właściwości skrawnych narzędzia oraz polepszenia właściwości fizycznych warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu.

W analizie zmian obciążenia ziaren ściernych niezwykle ważnym zagadnieniem jest określenie długości drogi kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym w strefie obróbki. Dla szlifowania płaszczyzn z dużą poprawnością przyjmowano [112, 165]:

$$L=(g \cdot D)^{0,5}, \quad (2.6)$$

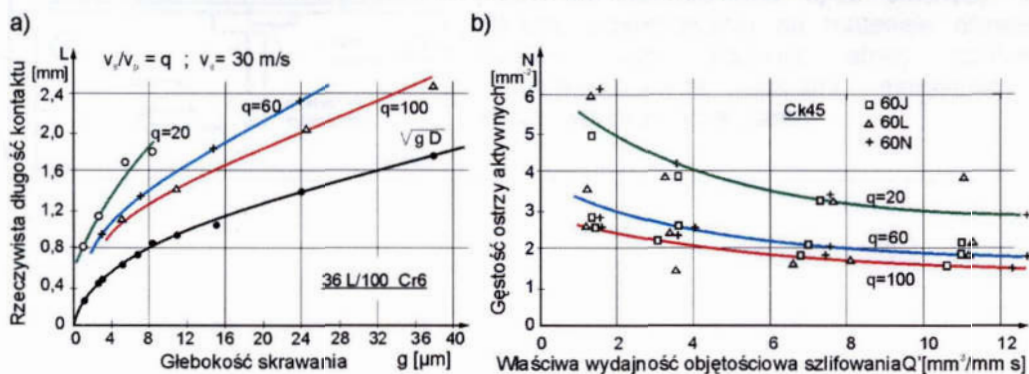
z pominięciem odkształceń ściernicy i przedmiotu obrabianego w strefie obróbki. Rzeczywista długość styku jest większa niż wyznaczona wartość L i jest odmienna dla poszczególnych ziaren skrawających, zmienne jest także zagłębienie ostrza na drodze skrawania. Odkształcenie ściernicy powoduje zwiększenie powierzchni kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym a tym samym ilości ziaren aktywnych. W efekcie wzrastają siły skrawania, energia procesu oraz temperatura w strefie skrawania, powodując zwiększone naprężenia w przedmiocie obrabianym [156].

W wyniku badań strefy kontaktu ziaren z materiałem stwierdzono, że na drodze skrawania ostrza można wyodrębnić: strefę odkształceń sprężystych i plastycznych, strefę właściwego skrawania oraz końcową strefę kontaktu ostrza, w której ponownie występują odkształcenia plastyczne i sprężyste [40, 41] (rys. 2.26).



Rys. 2.26. Strefa skrawania: a) kontakty ziaren [40] b) chropowatości obrabianej powierzchni [41]

Wzrost posuwu powoduje wzrost składowej normalnej siły szlifowania, która jest głównym powodem odkształceń sprężystych ściernicy, co uwidacznia się przyrostem długości strefy kontaktu dla niewielkiego wzrostu głębokości skrawania (rys. 2.27a). Deformacja ściernicy ma wpływ na wzrost aktywności ostrzy w strefie szlifowania, zwłaszcza w precyzyjnej obróbce w warunkach małej wydajności objętościowej szlifowania Q' (rys. 2.27b). Wy tłumaczyć to można tym, że ostrze, które znajduje się w niewielkiej odległości od ostrza poprzedzającego, dzięki odkształceniom ściernicy, może również uzyskać kontakt z materiałem obrabianym.

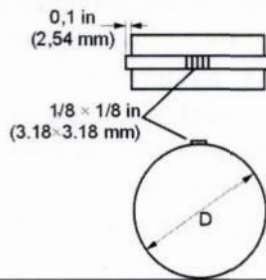


Rys. 2.27. a) Zmiany rzeczywistej długości kontaktu w zależności od głębokości skrawania; b) zmiany gęstości ostrzy aktywnych w funkcji właściwej wydajności objętościowej szlifowania Q' dla różnych wartości stosunku prędkości $q = v_s / v_p$ [186]

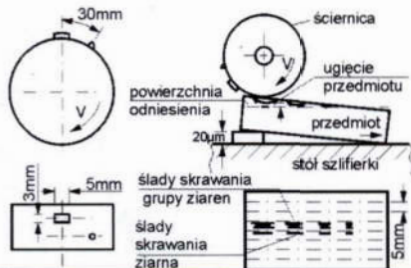
Badania doświadczalne strefy skrawania, jej długości, oraz toru skrawania poszczególnych ziaren ściernych prowadzono z wykorzystaniem różnych technik. W tabelicy 2.3 zestawiono eksperymentalne metody badania strefy skrawania. Podczas badań często analizowano także zużycie ziaren ściernych i całego narzędzia.

Tablica 2.3 Wybrane metody eksperymentalne badania strefy skrawania

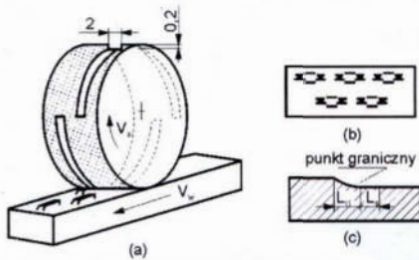
<p>Thermocouple – Peklenik J., Verkerk J., (1975) [186] Critical Contact State – Gu D., Wager J., (1988) [40] Applied Power Source – Zhou Z., Luttwertwelt C., (1992) [209]</p>	
	<p>Metoda termopar, polega na umieszczeniu w przedmiocie szlifowanym izolowanego drutu platynowego, tworzącego złącze termoelektryczne. Początek i koniec sygnału, generowanego przez kontakt ziarna z materiałem, służy do wyznaczenia długości kontaktu ziarna z materiałem obrabianym.</p>
<p>Patch Grinding – Brown R., Saito K., Shaw M., (1971) [20]</p>	
	<p>Metoda polega na szlifowaniu płaszczyzny specjalnie ukształtowaną ściernicą, na powierzchni której nacięto dwa pierścienie wystające 0,1 mm ponad powierzchnię, z których jeden znajduje się na połowie obwodu ściernicy. Podczas skrawania na próbce tworzą się dwa ślady: ciągły i przerywany. Do pomiarów głębokości śladów skrawania oraz analizy obszarów wejścia i wyjścia ziaren ściernych umieszczonych na pierścieniach zastosowano pomiary profilometryczne.</p>
<p>Quick Stop Device – Sauer W., Shaw M., (1974) [165] Quick Stop Grinding – Brown R., Wager J. (1977) [21]</p>	
	<p>Zastosowano metodę szlifowania z gwałtownym odsunięciem materiału obrabianego od ściernicy. W metodzie Sauer'a przedmiot gwałtownie odsuwano w dół, natomiast w metodzie Browna przedmiot odstrzelivano spod ściernicy. Dzięki takiemu postępowaniu na materiale obrabianym możliwe było badanie strefy szlifowania, z niedokończonymi śladami skrawania oraz analizowanie zużycia ziaren.</p>

Cluster Overcut Fly Grinding – Kumar K., Shaw M., (1979) [104, 105]

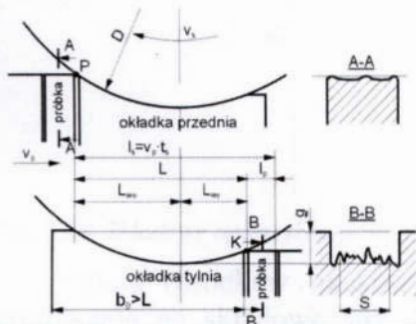
Na powierzchni ściernicy podczas obciągania pozostawiono obszar w kształcie kwadratu o boku 3,18 mm wystający 2,54 mm ponad powierzchnią ściernicy. Podczas szlifowania z dużą prędkością skrawania i niewielkim posuwem każde z ziaren ściernicy pozostawiało wyraźny ślad skrawania, co umożliwiało dokładny pomiar długości kontaktu ziarna z materiałem obrabianym

Cluster Overcut Fly Grinding – Saini D., Wager J., (1980–1990) [157–160]

Zmodyfikowana metoda Cluster Overcut Fly Grinding. Polega na szlifowaniu próbki wysuniętym fragmentem ściernicy na którym znajduje się kilka ziaren, oraz skrawanie pojedynczymi ziarnami położonymi w różnych odległościach od tego fragmentu ściernicy. Dzięki nachyleniu próbki pod niewielkim kątem uzyskiwano ślady obróbki o różnych zagłębieniach ostrzy skrawających.

Two – Half Slots – Gu D., Wager J., (1988) [41, 192]

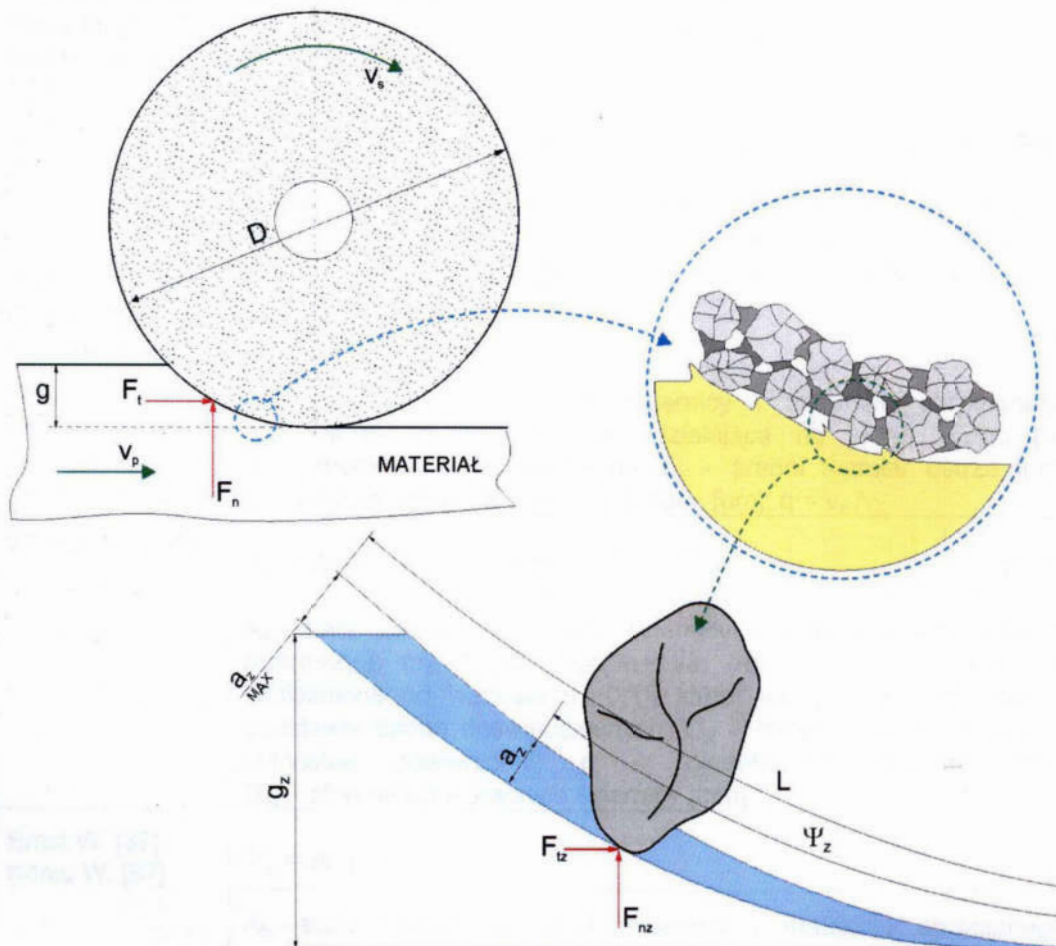
Zmodyfikowana metoda Cluster Overcut Fly Grinding. Polega na nacięciu w połowie obwodu ściernicy rowków o głębokości 0.2 mm i szerokości 2 mm, przesuniętych na obwodzie o 180°. W wyniku szlifowania tak ukształtowaną ściernicą na powierzchni próbki pozostają ślady, które umożliwiają badanie początkowej i końcowej strefy szlifowania i obserwację pojedynczych rys.

Metoda analizy sygnału emisji akustycznej – Stępień P., (1984) [172]

Metoda polegała na pomiarze czasu trwania szlifowania próbki umieszczonej w specjalnym uchwycie izolującym akustycznie próbkę od otoczenia. Początek i koniec szlifowania rejestrowano na podstawie pojawienia się i zaniku sygnału emisji akustycznej wywołanego oddziaływaniem ściernicy z badaną próbką. Na podstawie zmierzonego czasu szacowano długość strefy kontaktu.

2.2.3. Siły w strefie szlifowania

Zmienność sił w czasie procesu szlifowania, jest przyczyną poszukiwania metod badawczych, które pozwolą uzyskać informację o poziomie i charakterze zmian obciążenia ziaren w strefie szlifowania oraz ich skutków. Znajomość wartości siły szlifowania, będącej sumą składowych przypadających na ziarna aktywne w strefie obróbki, jest ważnym wskaźnikiem charakteryzującym proces oraz rezultaty obróbki i może być podstawą do wyprowadzenia wniosków dotyczących procesu zużycia i trwałości narzędzi.



Rys. 2.28. Składowe oporu skrawania ziarnem ściernicy

Wiele ośrodków naukowych dokonuje oceny wpływu zmian parametrów szlifowania na składowe siły, będące obciążeniem ziaren w strefie szlifowania. W opracowaniach tych ukazuje się, że największy wpływ na zmianę obciążenia ziaren w strefie szlifowania ma głębokość szlifowania (tzn. dosuw) oraz prędkości szlifowania i posuwu przedmiotu. Zmiany obciążenia ziaren mają w znacznym stopniu charakter losowy. Zastosowanie deterministycznych modeli obciążenia ziaren jest poprawne jedynie w odniesieniu do średnich wartości sił szlifowania. Chwilowe wartości sił mogą jednak znacznie odbiegać od wartości średniej. Przyczyną tego jest między innymi zmienna grubość warstwy skrawanej jednym ostrzem, zmienna geometria ostrza, czy też nieciągłości w procesie tworzenia wpływów i wiórów w strefie mikroskrawania ziarnem ściernym [51].

W tablicy 2.4 przedstawiono wyniki prac dotyczące modelowania oporów w strefie skrawania, oparte głównie na analizie zależności deterministycznych.

Tablica 2.4 Wybrane modele składowych siły skrawania w procesie szlifowania

Autor	Zależności opisujące opory w strefie skrawania
Salje E, [161]	$F_t = A_1 g k_t (q^{-1} p_p)^{m_q}, \quad (2.7)$ <p>$A_1, m_q = 1 + (\varepsilon/2)$ – stałe wyznaczone doświadczalnie, zależne od cech ściernicy i ziaren ściernych g – głębokość szlifowania [μm]; k_t – wytrzymałość graniczna materiału podczas ścinania; $q = v_s / v_p$; v_p – prędkość posuwu przedmiotu obrabianego [m/s]; v_s prędkość szlifowania [m/s]; p_p – posuw poprzeczny przedmiotu [mm/s]</p>
Shaw M. C., Reichenbach G. [154, 164]	$F_t = A_2 g^{m_a} N_k^{-m_n} D_{eq}^{m_D} q^{-m_q}, \quad (2.8)$ <p>A_2 – współczynnik zależny od kształtu ziarna ściernego; $m_a = (2-n)/4$; $m_n = (1-n)/2$; $m_q = (1-n)/2$; $m_D = (n-2)/4$; – współczynniki empiryczne zależne od rodzaju materiału obrabianego i cech ściernicy dla $n \in (0,1)$; N_k – liczba czynnych krawędzi skrawających; D_{eq} – równoważna średnica ściernicy [mm]; g – głębokość szlifowania [μm]</p>
Ono K. [134] Brückner K. [22]	$F_n = A_3 g F_{nz} \bar{b}_s / \bar{L}_z q^{-1}, \quad (2.9)$ <p>A_3 – stała zależna od cech ściernicy i materiału obrabianego; F_{nz} – składowa normalna siły działająca na jedno ziarno [N]; g – głębokość szlifowania [μm]; b_s – średni rozmiar ostrza [μm]; L_z – średnia odległość między ziarnami [μm]; $q = v_s / v_p$</p>
Werner G. [196]	$F_n = A_4 g^{m_a} (C_{st}^2 / \text{tg}(\varepsilon/2))^{m_\varepsilon} D_{eq}^{m_D} q^{-m_q}, \quad (2.10)$ <p>A_4 – stała zależna od cech ściernicy i materiału obrabianego; $m_a = (n+2)/3$; $m_\varepsilon = (1-n)/3$; $m_q = (2n+1)/3$; $m_D = (1-n)/3$ – współczynniki uzależnione od wartości $n \in (0,1)$, której wartość jest ustalana na podstawie badań doświadczalnych; C_{st} – statyczna liczba ostrzy na jednostkę powierzchni; g – głębokość szlifowania [μm]; D_{eq} – równoważna średnica ściernicy [mm]</p>
Ernst W. [37] König W. [87]	$F_n = A_5 g q^{-m_q}, \quad (2.11)$ <p>A_5 – stała zależna od cech ściernicy i materiału obrabianego; g – głębokość szlifowania [μm]; $q = v_s / v_p$; m_q – współczynnik empiryczny zależny od cech ściernicy, $m_q = (9,2:13,6)$</p>
Lindsay R.P. [107, 108]	$F_n = A_6 g^{m_a} D_{eq}^{m_D} q^{-m_q}, \quad (2.12)$ <p>A_6 – stałe zależne od cech ściernicy i materiału obrabianego; m_a, m_D, m_q – współczynniki uzależnione od cech materiału; g – głębokość szlifowania [μm]; D_{eq} – średnica równoważna ściernicy [mm]. Dla materiałów łatwo obrabialnych: $m_a = 1,23$; $m_D = 0,266$; $m_q = 0,59$ oraz dla materiałów trudno obrabialnych: $m_a = 0,5$; $m_D = 0,324$; $m_q = 0,42$</p>
Maslow E. N. [121].	$F_t = A_7 g^{m_a} p_p^{m_p} v_p^{m_q}, \quad (2.13)$ <p>A_7 – stała zależna od warunków obróbki; $m_a = 0,6$; $m_p = 0,7$; $m_q = 0,7$ – współczynniki zależne od cech ściernicy i materiału obrabianego; g – głębokość szlifowania [mm]; v_p – prędkość przedmiotu [mm/s]; p_p – posuw poprzeczny stołu [mm/s]</p>

Bock R. [9] Decneut A. [33] Peters J. [168] Spur G. [169]	$F_t = A_8 g^{m_a} D_{eq}^{m_D} q^{-m_q}, \quad (2.14)$
	<p>A_8 – stała zależna od cech ściernicy i materiału obrabianego, m_a, m_D i m_q współczynniki empiryczne zależne od średniej grubości warstwy skrawanej: $m_a=(1-m_q)/2$; $m_D=(2-m_q)/2$; g – głębokość szlifowania [μm]; D_{eq} – równoważna średnica ściernicy [mm]</p>
Borkowski J. Kalisz M. [11]	$F_n = A_9 g^{m_a} v_s, \quad (2.15)$
	<p>$A_9 \in (0,038, 0,066)$; $m_a \in (1,481, 1,768)$; – stała i wykładnik potęgowy zależny cech ściernicy i materiału obrabianego; g – głębokość skrawania jednym ziarnem [μm]; v_s – prędkość szlifowania [m/s]</p>
Averkamp [1], Netterscheid[127] Kim N., Guo C., Malkon S. [80]	$F_n = F_{ns} g^{m_a} v_s^{m_{qs}} q^{-m_q}, \quad (2.16)$ $F_n = A_{10} g^{m_a} v_s^{m_{qs}} v_p^{m_{qp}} q^{-m_q},$
	<p>A_{10} – stała zależna od cech ściernicy i materiału obrabianego oraz warunków obróbki; g – głębokość szlifowania [μm]; F_{ns} – siła progowa [N]; q – stosunek prędkości ściernicy do przedmiotu; v_s – prędkość szlifowania [m/s]; v_p – prędkość przedmiotu [m/s]</p>
Kacalak W. [54].	$F_n = A_{10} \left(\frac{(v_s^2 \pm v_p^2)^{\frac{n+1}{2}} v_p^n}{v_s} D^{\frac{1-n}{2}} (z_F(t))^{1-n} \int_0^b \frac{(g_x(x,t))^{\frac{n+1}{2}}}{\cos \varphi_x(x,t)} dx \right), \quad (2.17)$
	<p>A_{10} – stała zależna od kształtu ostrzy, ich zużycia i właściwości materiału obrabianego g_x – zmienna w strefie skrawania głębokość [μm]; D – średnica ściernicy [m]; z_F – zmienna w czasie procesu szlifowania liczba ostrzy skrawających przypadających na jednostkę powierzchni zależna głównie od głębokości szlifowania, φ_x – zmienny w czasie szlifowania kąt zużycia krawędziowego ściernicy, b – szerokość strefy szlifowania; x – odległość od powierzchni czołowej ściernicy; t – czas szlifowania; v_p – prędkość posuwu przedmiotu obrabianego [m/s]; v_s prędkość szlifowania [m/s]</p>
Plichta J. [143]	$F_n = b_D l_g / l_{wakt}^2$ $\left[A_{11} / (l_w)_g \left(\sqrt{q^{-1} g} l_{wakt} K_\varepsilon^{-1} \text{tg} \varepsilon \sqrt{D} \right)^n \right] \pm A_{12} l_{sw}^m, \quad (2.18)$
	<p>b_D – długość krawędzi skrawającej ściernicy [mm]; l_g - średnia długość strefy styku ściernicy z przedmiotem obrabianym [mm]; l_{wakt} – odległość średnia między ostrzami aktywnymi [μm]; $(l_w)_g$ - względna długość czynnego obwodu ściernicy [mm]; l_{sw} - średnia długość starcia wierzchołka ziarna [μm]; K_ε – współczynnik kształtu ziarna; A_{11}, A_{12} – stałe zależne od cech ściernicy i materiału</p>

Opracowania [2, 78, 99, 100, 131, 148] także potwierdzają, że na zmianę obciążenia ziaren w strefie szlifowania znacząco wpływa głębokość i prędkość szlifowania oraz prędkość posuwu przedmiotu. W pracy [148], dowiedziono ponadto, że w przypadku małych głębokości szlifowania jedynie najniżej położony wierzchołek ziarna będzie wykonywał pracę skrawania, natomiast inne, położone wyżej mogą jedynie odkształcać powierzchnię obrabianą.

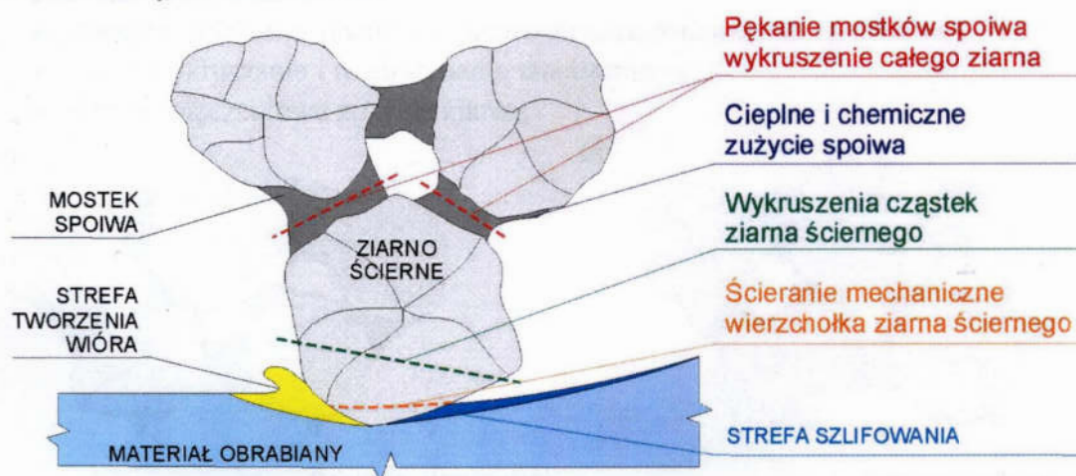
2.3. Zużycie narzędzi ściernych

Wyniki obróbki w procesie szlifowania w dużym stopniu zależą od ściernego i wytrzymałościowego zużywania się ziaren ściernicy. Identyfikacja i analiza zużycia wierzchołków ziaren ściernych i ściernic ma istotny wpływ na sterowanie procesem i prognozowanie jego wyników.

W pracach [14, 15, 17, 69, 129, 165] określono główne mechanizmy wpływające na zużycie narzędzi ściernych (rys. 2.29):

- pękanie mostków spoiwa, powodujące wykruszenia całych ziaren ściernych, co uniemożliwia wykorzystanie ich potencjału obróbczego,
- zużycie spoiwa, spowodowane zjawiskami cieplnymi i chemicznymi,
- mikrowykruszenia i wykruszenia częściowe ziaren, wpływające na proces samoostrzenia ściernicy,
- ściernie zużycie ziaren, powodujące pogorszenie właściwości skrawnych ściernicy.

Zużywanie się ściernicy jest więc procesem złożonym, w którym może występować wiele zależnych od siebie zjawisk, mogących wpływać odmiennie na możliwości skrawne całego narzędzia. W zależności bowiem od spodziewanych wyników obróbki jedne zjawiska są niepożądane (lub pożądane w ograniczonym zakresie), a inne są niezbędne. Przykładowo w precyzyjnym procesie szlifowania kształtowego niepożądanym procesem są wykruszenia całych ziaren, a ściernica powinna pracować w warunkach mikrowykruszeń lub umiarkowanego tępienia ziaren ściernych.



Rys. 2.29. Podstawowe formy zużycia narzędzi ściernych

W pracach [14, 15] podano analizie i klasyfikacji proces zużycia ściernic, w którym można wyznaczyć trzy rodzaje warunków pracy narzędzia:

- postępujące tępienie ściernic,
- samoostrzenie się narzędzi ściernych,
- zużycie zespolone, w którym równocześnie zachodzą oba, powyższe procesy.

W odniesieniu do zużycia kształtowego narzędzi ściernych wyznaczono:

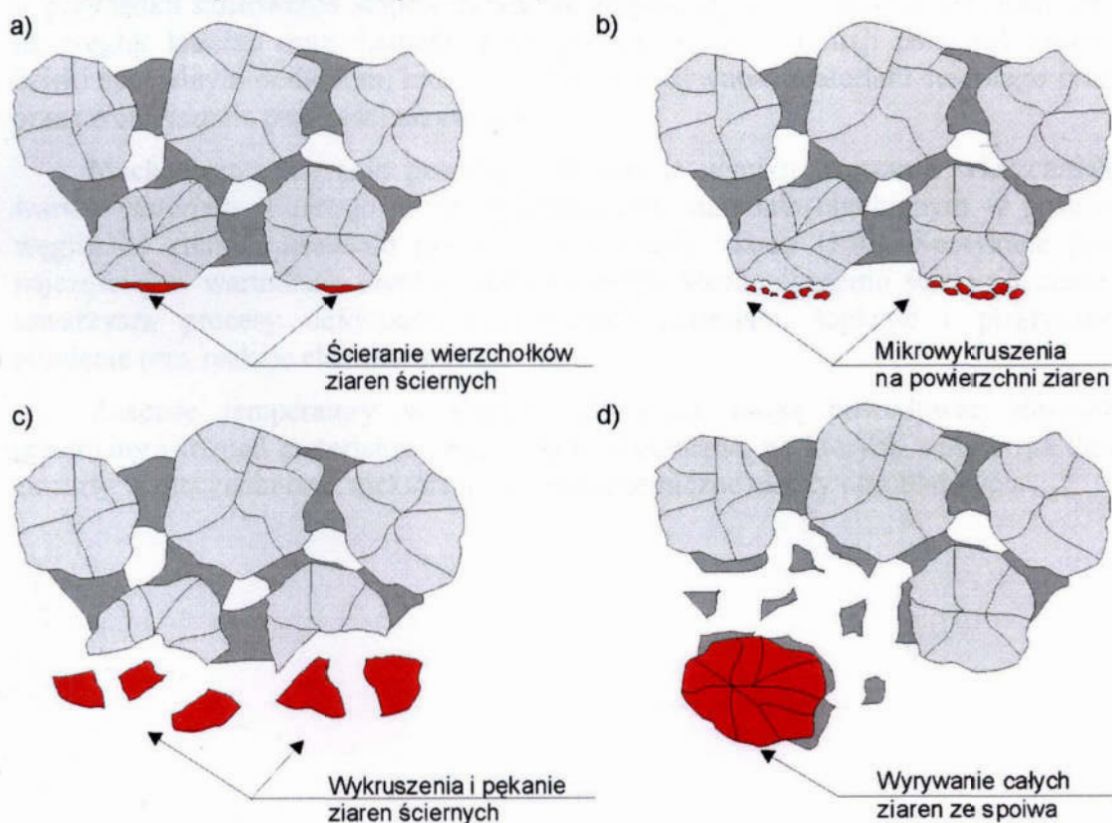
- skośno-krawędziowe zużycie ściernicy,
- charakter schodkowy zużycia narzędzi ściernych,
- występowanie falistości czynnej powierzchni ściernicy.

2.3.1. Elementarne zjawiska zużycia ziaren

Zużycie aktywnych ziaren ściernych, spowodowane obciążeniem, które jest zmienne podczas jednego kontaktu, i w kolejnych kontaktach z materiałem obrabianym, polega na zmianie ich początkowego kształtu i wymiarów [52]. Postaci zużycia ziarna, w aspekcie wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej zależą głównie od jego obciążenia oraz jego właściwości fizycznych i chemicznych. Z analizy pracy [129] wynika, że zużycie ściernie (rys. 2.30a) jest następstwem procesów ścierania, dyfuzji i adhezji oraz procesów chemicznych podczas cieplnych i mechanicznych obciążeń ziarna. Zużycie wytrzymałościowe występuje natomiast po przekroczeniu wytrzymałości doraźnej ziarna lub przekroczeniu ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej po niewielkiej liczbie cykli, i polega na wykruszeniu części lub całych ziaren (rys. 2.30b,c,d), które wcześniej mogły ulec procesowi zużycia ściernego.

W opracowaniu [14, 15], po wnikliwej analizie procesów zużycia ziaren i narzędzi ściernych, sklasyfikowano podstawowe postaci zużycia i wyznaczono kierunki poszukiwań zależności przebiegu zużycia narzędzi ściernych od ich wpływu. Zgodnie z powyższymi opracowaniami zużycie ziaren można podzielić na:

- **spowodowane procesami fizykochemicznymi:**
 - adhezyjne zużycie ziaren ściernych,
 - dyfuzyjne zużycie ziaren ściernych,
 - mechaniczne ścieranie ostrzy ziaren,
- **zużycie wytrzymałościowe:**
 - doraźne: ściskanie, obciążenie udarowe oraz dynamiczne zgniatanie,
 - przez wykruszanie i rozdrabnianie zmęczeniowe,
 - termo-zmęczeniowe zużycie ziaren,



Rys. 2.30. Zjawiska elementarne zużycia ziaren ściernych

2.3.1.1. Zużycie ściernych ziaren

Główną przyczyną zużycia ziaren ściernych w procesie szlifowania jest tarcie spowodowane oddziaływaniem cząsteczek materiału ściernego i obrabianego. Zużyciu ziaren towarzyszą zjawiska fizykochemiczne w postaci adhezji i dyfuzji. Na intensywność zjawiska adhezji zasadniczy wpływ mają naciski i temperatura w strefie styku ziarna z materiałem, w wyniku czego występują szczypania i przypawania cząstek materiału na powierzchniach styku, co sprzyja zjawiskom ścinania, złuszczenia i odrywania mikrocząstek ziarna [15]. Na intensywność zużycia adhezyjnego znacząco wpływa twardość materiału ściernego i obrabianego oraz prędkość szlifowania, a jego skutki można minimalizować za pomocą stosowania materiału ściernego o zasadniczo odmiennej budowie i stosowaniu cieczy chłodząco – smarujących [15, 130]. Najmniejszym zużyciem adhezyjnym charakteryzuje się regularny azotek boru (CBN). Elektrokorund oraz węgiel krzemu ulegają zużyciu adhezyjnemu w miarę wzrostu nacisków jednostkowych. Natomiast podczas szlifowania ściernicami diamentowymi dominujące jest zużycie adhezyjne [15].

Procesowi szlifowania towarzyszy zwykle wydzielanie znacznych ilości ciepła. W zakresie temperatur przewyższających 1000°C [130], istotny udział w zużyciu ziaren ściernych ma zjawisko dyfuzji. Główną przyczyną intensywności dyfuzji jest temperatura, sięgająca czasami poziomu topienia kontaktujących się materiałów. Zjawisko dyfuzyjnego zużycia ziaren ściernych jest procesem złożonym, w którym poza dyfuzyjnym ruchem cząstek materiału, zachodzą zjawiska: zmniejszenia twardości, przemian fazowych oraz zmniejszenia wytrzymałości na granicy połączeń kryształów materiałów polikrystalicznych (topienie spoiny międzykryształowej) [15, 44, 129]. W odniesieniu do ściernic z ziarnami z elektrokorundu zużycie dyfuzyjne zachodzi najczęściej podczas szlifowania tytanu i jego stopów. Natomiast w przypadku szlifowania stopów żelaza na zużycie dyfuzyjne najczęściej narażone są: węgiel krzemu oraz diament. Zmniejszenie wpływu dyfuzji osiągnąć można dzięki specjalnym dodatkom, które zmniejszają aktywność materiału ściernego oraz przez zmniejszenie prędkości skrawania.

Mechaniczne ścieranie powstaje głównie w wyniku usuwania wierzchnich warstw materiału ściernego przez wydzielania w materiale obrabianym w postaci węglików, których twardość przewyższa twardość ziaren [130]. Spotykane jest najczęściej w warunkach obróbki gładkościowej. Mechanicznemu ścieraniu ziaren towarzyszą procesy deformacji plastycznych materiału, topienie i plastyczne płynięcie oraz reakcje chemiczne [15].

Znaczne temperatury w strefie szlifowania mogą powodować również przemiany i rozpad materiałów oraz reakcje chemiczne, na których wpływ ma tlen zawarty w otoczeniu oraz niektóre substancje chemiczne cieczy obróbkowych.

2.3.1.2. Zużycie doraźne i zmęczeniowe

Wytrzymałościowe zużycie ziaren ściernych polega na wykruszaniu się cząstek materiału z warstw wierzchnich oraz pękaniu i wypadaniu z powierzchni ściernicy [14, 15, 17, 69, 129, 130, 165]. Zjawisko nasila się początkowej fazie szlifowania, czego przyczyn należy spodziewać się w naruszeniu struktury ziaren przez obciążanie ściernicy. W późniejszej fazie szlifowania przyczyną zużycia wytrzymałościowego ziaren jest przekroczenie wytrzymałości doraźnej lub przekroczenie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej ziarna [15]. W badaniach [15] stwierdzono, że dla przyjętych warunków przeciętne względne wykruszenie wynosiło około 2% objętości ziarna oraz wyznaczono zależność intensywności zużycia doraźnego (rys. 2.31a) wszystkich ziaren na czynnej powierzchni ściernicy:

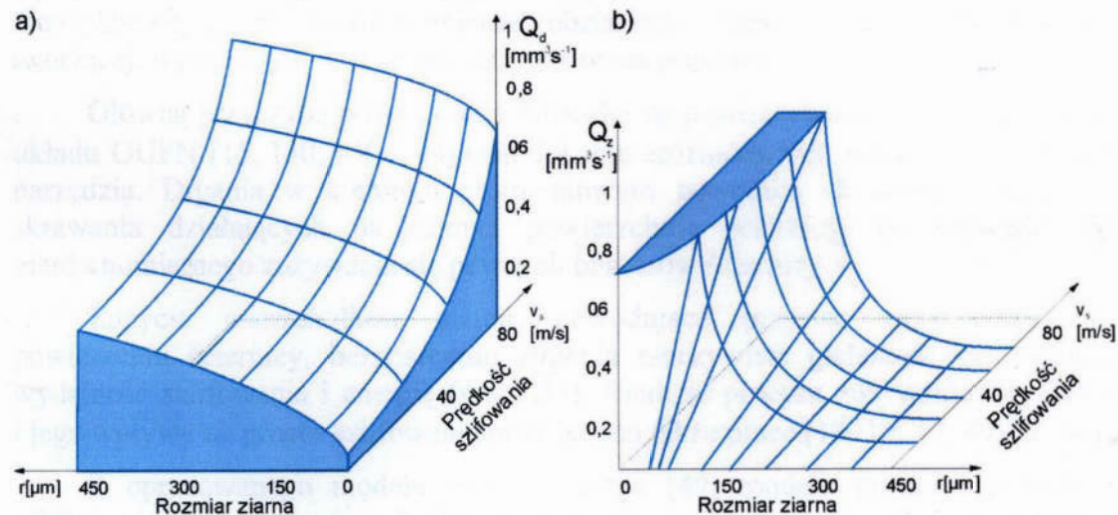
$$Q_d = 1000v_s \frac{H}{h_w^2} K_z \Delta V_z \sum_{i=1}^{h_w} (P_{ai} P_{di}), \quad (2.19)$$

gdzie: v_s – prędkość skrawania, H – szerokość powierzchni czynnej ściernicy, h_w – liczba elementarnych warstw na głębokości zarysu ściernicy, K_z – liczba ziaren na CPS, ΔV_z – jednostkowa objętość ziarna, P_{ai} – prawdopodobieństwo aktywności ziarna, P_{di} – prawdopodobieństwo zaistnienia doraźnego wykruszenia ziarna.

Zmęczeniowe zużycie ziaren polega na wykruszeniu cząstek materiału pod wpływem cyklicznego oddziaływania obciążeń mechanicznych. W opracowaniu [15] wyznaczono intensywność zużycia zmęczeniowego (rys. 2.31b) w postaci:

$$Q_z = 1000v_s \frac{H}{h^2} \frac{F_N^u}{C_r r^w} K_z \Delta V_z \sum_{i=1}^h P_{ai}, \quad (2.20)$$

gdzie: F_N – maksymalna wartość siły tętniącej, r – promień kulistego modelu ziarna, C_r , u , w – wielkości uzyskane empirycznie.

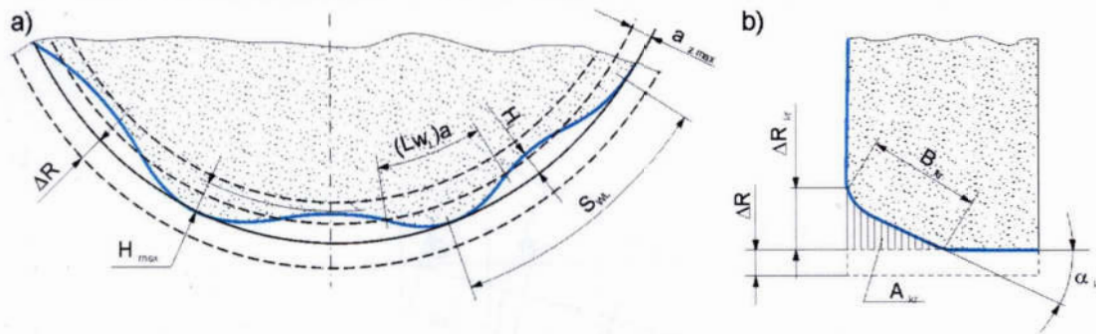


Rys. 2.31. Wpływ wielkości ziarna i prędkości szlifowania na intensywność zużycia ściernicy wskutek: a) doraźnego, b) zmęczeniowego, zużycia ziaren ($D=400\text{mm}$, $H=32\text{m}$, $g_z=0,04\text{mm}$) [17]

Z zależności (2.19 i 2.20) wynika, że wraz ze wzrostem prędkości szlifowania wzrasta wytrzymałościowe zużycie ziaren ściernych, natomiast wzrost ilości warstw i wzrost rozmiaru ziaren powoduje zmniejszenie intensywności zużycia.

2.3.2. Zużycie kształtowe narzędzi ściernych

Zużycie promieniowe ściernicy, zaliczane do makrozuzycia, wpływa znacząco na przebieg procesu szlifowania, zwłaszcza na amplitudę i częstość drgań własnych w układzie obróbkowym, co przedkłada się na dokładność wymiarów i kształtu przedmiotu obrabianego. Ocena zużycia promieniowego dokonywana jest z uwzględnieniem parametrów geometrycznych w przekrojach osiowym i prostopadłym do osi ściernicy. Proces zużycia w przekroju prostopadłym do osi ściernicy najlepiej opisują cztery parametry: średnie zużycie promieniowe ΔR , średnia wysokość falistości H_{sr} , liczba wierzchołków falistości na obwodzie ściernicy N_w oraz sumaryczna względna długość występow zarysu obwodowego w warstwie odpowiadającej maksymalnej grubości warstwy skrawanej jednym ziarnem $(L_w)_a$ (rys. 2.32a) [15, 130, 140–144].



Rys. 2.32. Zużycie: a) obwodowe i b) promieniowe ściernicy [142]

Ocenę zużycia krawędziowego dokonuje się poprzez wyznaczenie wartości parametrów: maksymalnej odchyłki krawędziowej ΔR_{kr} , szerokości krawędzi skrawającej B_{kr} , kąta pochylenia krawędzi skrawającej α_{kr} , oraz pola powierzchni zużycia pod krawędzią skrawającą A_{kr} (rys. 2.32b). Przyczyną zużycia krawędziowego jest nierównomierne obciążenie ziaren ściernicy wzdłuż jej tworzącej, występujące w szlifowaniu z posuwem poprzecznym.

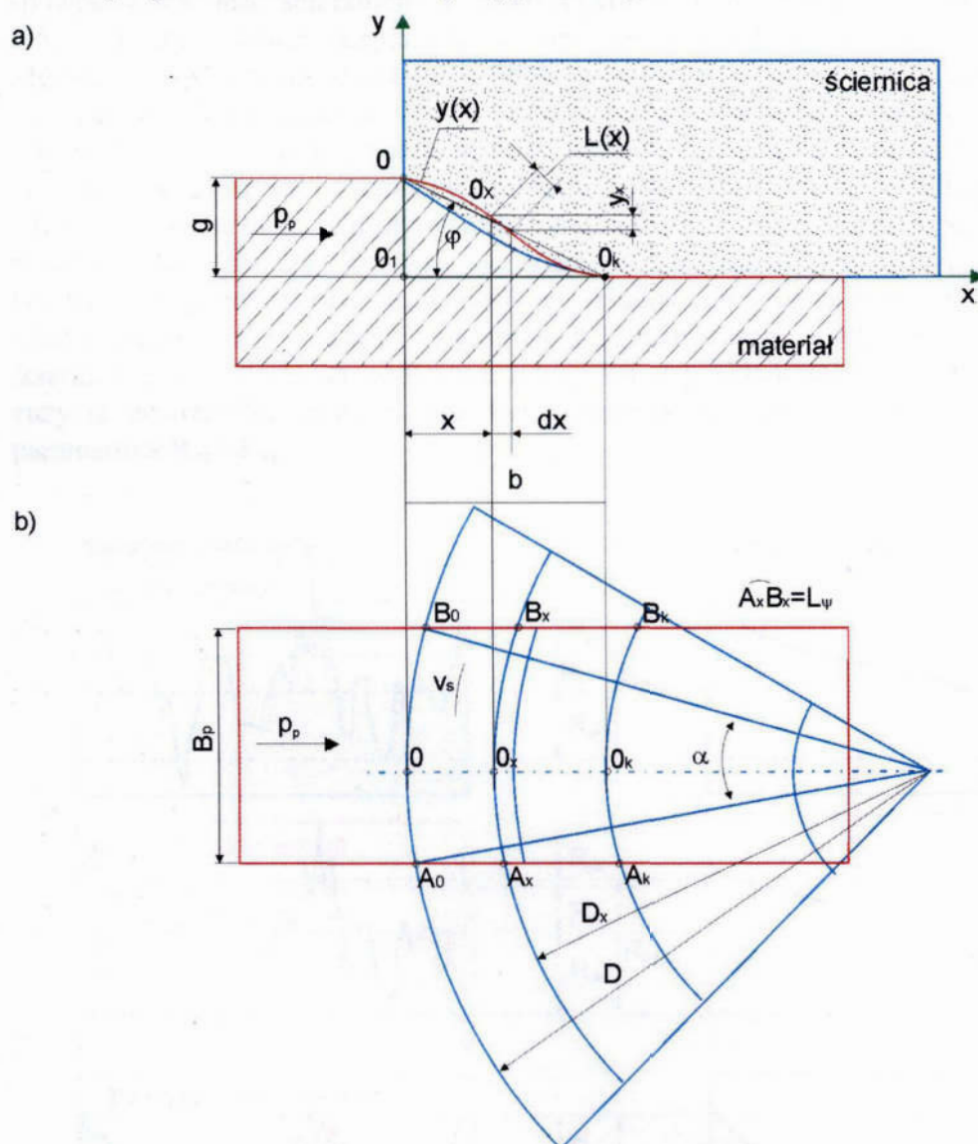
Główną przyczyną powstawania falistości na powierzchni ściernicy są drgania układu OUPN [15, 130, 140–144] oraz lokalne zróżnicowanie właściwości samego narzędzia. Drgania w kierunku promieniowym powodują chwilowe zmiany sił skrawania działających na czynną powierzchnię ściernicy, co prowadzi do nierównomiernego zużywania się pewnych obszarów ściernicy.

Zużycie wierzchołków ziaren, powodujące przyrost zużycia czynnej powierzchni ściernicy, bezpośrednio zmienia rzeczywistą głębokość szlifowania, wydajność szlifowania i energię (rys. 2.33). Analizie procesu zużywania się ziaren i jego wpływu na proces szlifowania poświęcono także prace [13–15, 17, 49, 52, 54].

Z opracowanego modelu energetycznego [49] modelu procesu czołowego szlifowania płaszczyzn (rys. 2.33b) wynika, że nawet w warunkach intensywnego samoostrzenia ściernicy należy spodziewać się z upływem czasu wzrostu siły i mocy obróbki. Przyczyną tego wzrostu jest kształtowe zużycie ściernicy powodujące zwiększenie pola strefy styku ściernicy z przedmiotem obrabianym (rys. 2.33a). Może również nastąpić zmniejszenie wariacji rzędnych wierzchołków zarysu, jeżeli przed szlifowaniem ściernica była obciążona zgrubnie.

Podczas szlifowania w warunkach ograniczonego samoostrzenia, na powierzchni ściernicy z reguły zachodzą procesy mikrozużycia narzędzia.

O wzroście siły i mocy z upływem czasu, decyduje głównie ścierne zużywanie się ziaren. Natomiast w warunkach intensywnego samoostrzenia ściernicy na wzrost obciążenia ziaren ściernych znacząco wpływa zwiększenie pola strefy styku ściernicy z przedmiotem obrabianym (rys. 2.33a).

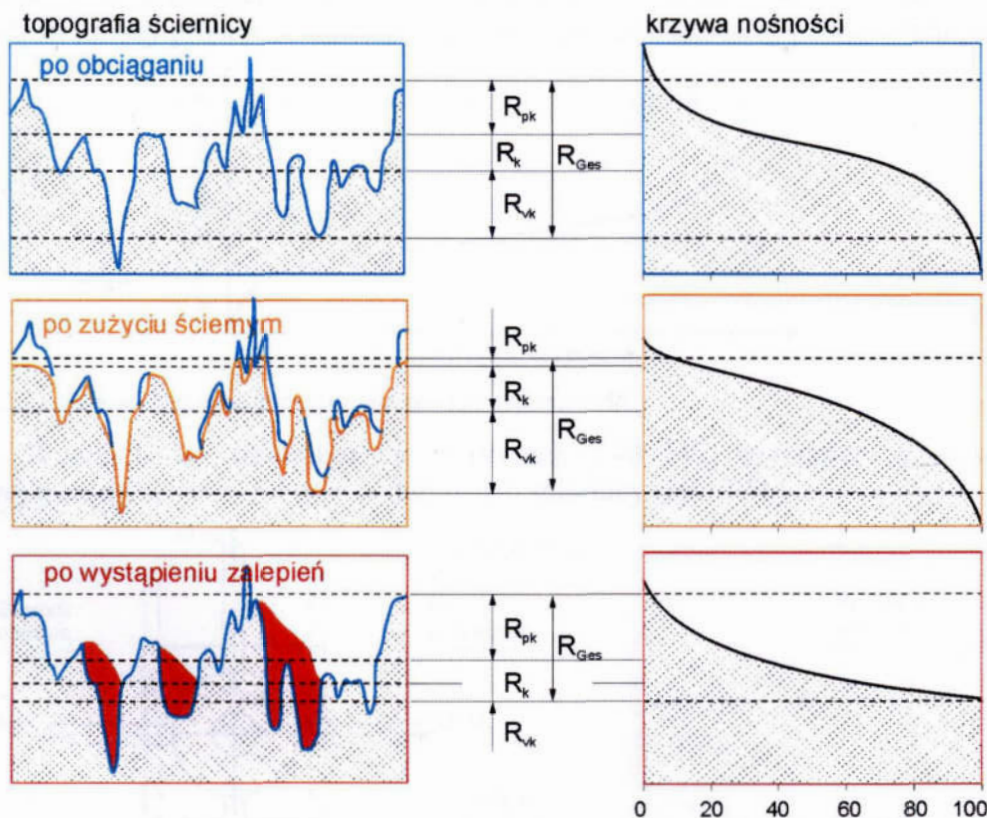


Rys. 2.33. Parametry powierzchni styku ściernicy z przedmiotem obrabianym podczas czołowego szlifowania płaszczyzn [49]

Określone zdolności skrawne ziaren ściernych w znacznym stopniu zależą od ich orientacji wierzchołków na czynnej powierzchni ściernicy. Istotnym parametrem powodującym także zmiany energii właściwej jest orientacja ostrza na powierzchni czynnej ściernicy. Podczas analizy [13, 14, 77] możliwości intensyfikacji obróbki ścierniej zwrócono uwagę na możliwości, jakie leżą w narzędziach ściernych, których dotychczas nie są produkowane, a których specjalna struktura, zapewniająca właściwe rozmieszczenie i orientację ziaren, poprawiłaby właściwości skrawne.

2.3.3. Wybrane metody badania zużycia ściernicy

Zmieniająca się podczas pracy ściernicy mikrotopografia powierzchni czynnej spowodowana jest ścieraniem i mikrowykruszeniami cząstek ziaren ściernicy [15, 188], jak również zalepianiem się przestrzeni międzyziarnowej [15, 85, 115]. Metodę oceny zużycia ściernicy w trakcie jej pracy opracowano w zespole pod kierunkiem Brinksmeier'a [19]. Zastosowano optyczną metodę pomiaru, wykorzystującą czujnik triangulacyjny. Oceny czynnej powierzchni ściernicy dokonano w oparciu o parametry chropowatości powierzchni według krzywej Abbott'a wyznaczając chropowatość zredukowaną R_{Ges} . Na rysunku 2.34 przedstawiono zmiany krzywej nośności w zależności od zużycia czynnej powierzchni ściernicy oraz zmienność jej składowych: części roboczej R_k , części wierzchołkowej R_{pk} i części zagłębień R_{vk} . Informacje o charakterze zużycia ściernicy uzyskuje się na podstawie relacji między składowymi, natomiast ocenę zużycia powierzchni czynnej ściernicy przeprowadza się w oparciu o wartości parametrów R_{pk} i R_{vk} .



Rys. 2.34. Charakter zużycia czynnej powierzchni ściernicy i zmiana krzywej nośności profilu [19]

Do oceny charakteru zużycia czynnej powierzchni ściernicy można też wykorzystać metody:

- klasycznego profilowania 2D i 3D,
- profilowania z zastosowaniem urządzeń laserowych,
- odcisków powierzchni ściernicy,
- metody obserwacji mikroskopowych,
- metody sztucznej inteligencji [155].

Suma mikrozużycia ściernicy składa się na jej zużycie kształtowe, które charakteryzowane jest za pomocą wskaźników makrozużycia [130]:

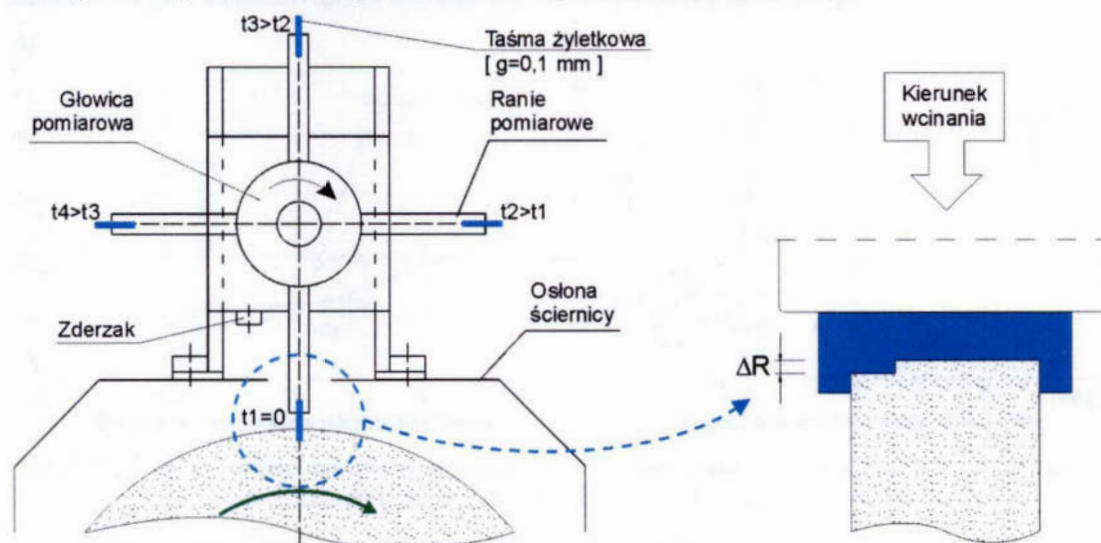
- zużycie objętościowe ściernicy V_s ,
- właściwe zużycie objętościowe ściernicy $V'_s = V_s/H_c$, odniesione do czynnej szerokości ściernicy H_c ,
- właściwe zużycie objętościowe ściernicy $V'_{sc} = V_s/l_c$, przypadające na jednostkę czynnego profilu ściernicy l_c ,
- szybkość zużycia objętościowego $z_s = dV_s/dt$,
- właściwa szybkość zużycia objętościowego $z'_s = z_s/H_c$, w odniesieniu do czynnej szerokości ściernicy H_c ,
- właściwa szybkość zużycia objętościowego $z'_{sc} = z_s/l_c$, w odniesieniu do czynnego profilu ściernicy l_c .

Zużycie ściernicy może przebiegać z różną intensywnością, a jego zależność zwykle przedstawia się za pomocą krzywej zużycia promieniowego (rys. 2.35), na której można wyróżnić obszar nieliniowego zużycia, o większej intensywności spowodowanej procesem obciągania, obszar umiarkowanego, właściwego zużycia ściernicy oraz końcowego obszaru, przyspieszonego zużycia, powodującego wzrost drgań, sił i mocy procesu, a także pogorszenie jakości obrabianej powierzchni [130].



Rys. 2.35. Typowa krzywa zużycia promieniowego ściernicy ΔR

Wyniki badań, opublikowane w pracach [140–142] wymagały opracowania nowej metody badania zużycia kształtowego ściernicy (rys. 2.36).



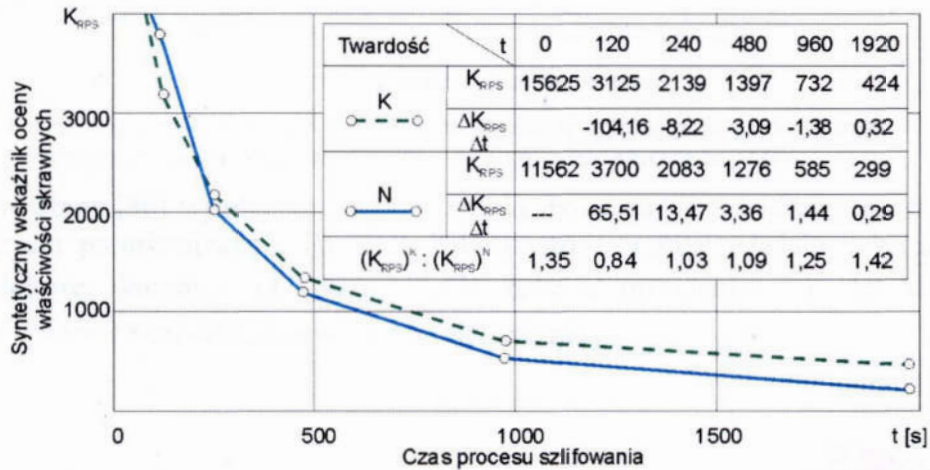
Rys. 2.36. Schemat stanowiska do badania procesu zużycia kształtowego ściernicy [140]

Badania wykazały, że falistość powierzchni ściernicy wpływa na zmiany grubości warstwy skrawanej jednym wierzchołkiem, a w powiązaniu ze zmianami

szerokości krawędzi skrawającej B_{kr} powoduje wzrost składowej odporowej siły szlifowania F_n . Zdefiniowano syntetyczny wskaźnik oceny właściwości skrawnych ściernicy na podstawie jej cech makrogeometrycznych (rys. 2.37) [142].

$$K_{RSP} = \left[\frac{\pi \cdot D \cdot (l_w)_a}{l_s \cdot B_{kr}} \right]_t \quad (2.21)$$

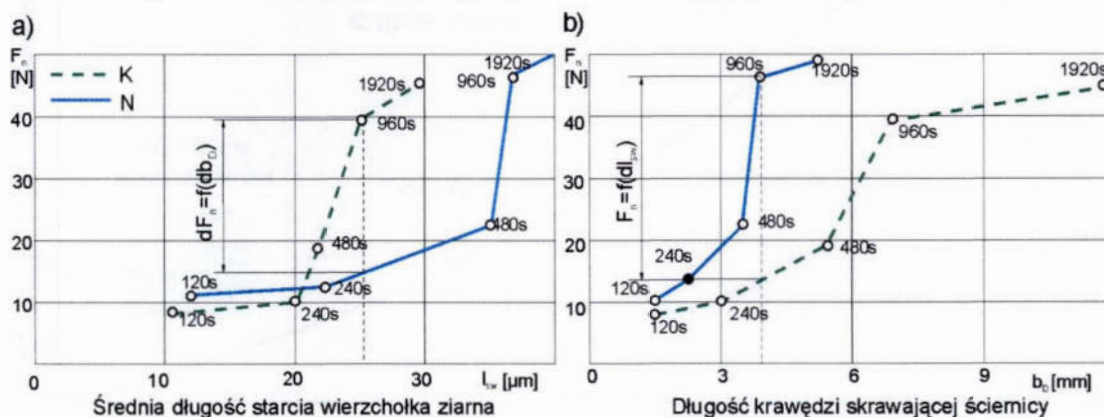
gdzie: D – średnica ściernicy, $(l_w)_a$ – sumaryczna względna długość wierzchołków falistości ściernicy, B_{kr} – szerokości krawędzi skrawającej, l_s – sumaryczna względna długość odcinków starcia wierzchołków.



Rys. 2.37. Przebieg zmian syntetycznego wskaźnika stanu czynnej powierzchni ściernicy w funkcji czasu szlifowania dla ściernicy T1 200x32x76 99A80K7V i T1 200x32x76 99A80N7V [142]

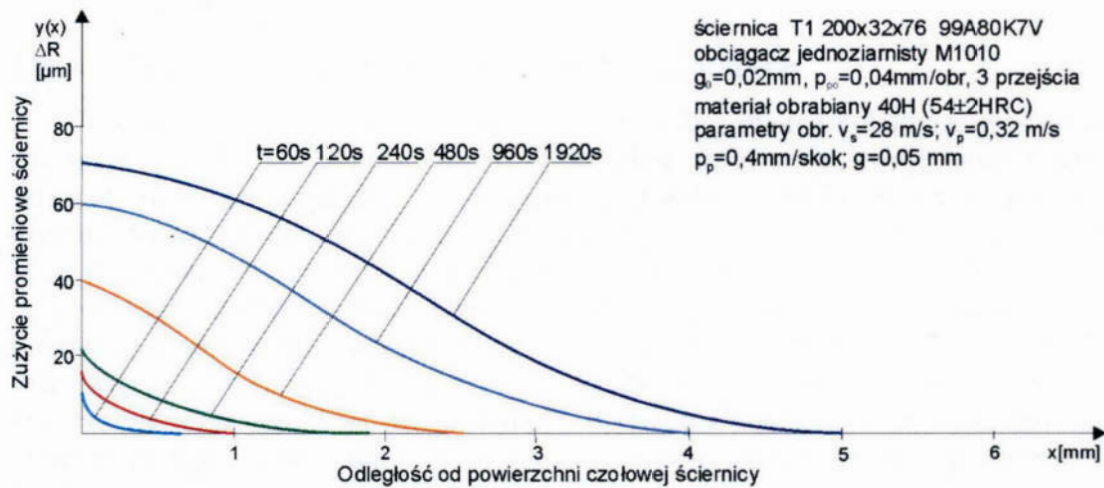
Spadek wartości wskaźnika K_{RSP} oznacza pogorszenie się zdolności skrawnej ściernicy, natomiast intensywność zmian zdolności skrawnej ściernicy można określić odnosząc przyrost wartości wskaźnika ΔK_{RSP} do przyrostu czasu Δt .

W pracach [140–144] dotyczących oceny wpływu zużycia ściernicy na lokalne zmiany grubości warstwy skrawanej, wykazano duży stopień korelacji zużycia kształtowego i składowej normalnej siły szlifowania F_n (rys. 2.38).



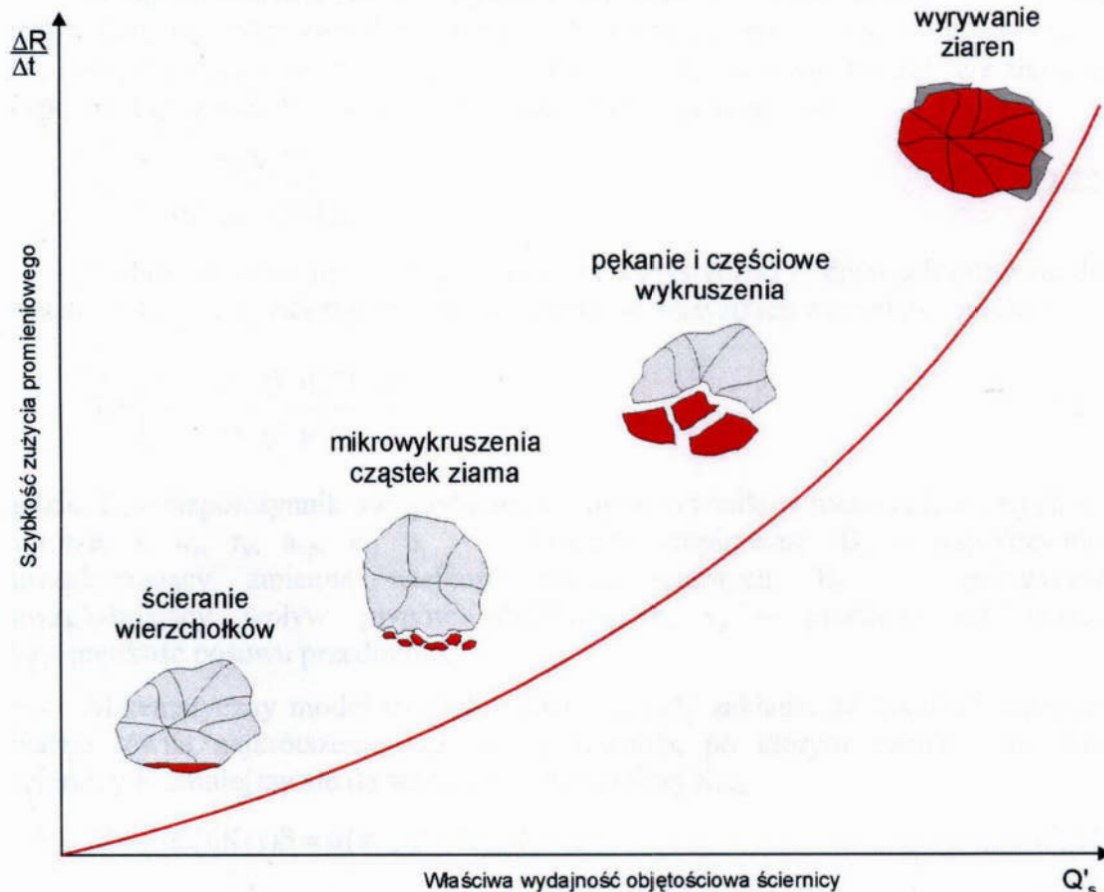
Rys. 2.38. Zmiany wartości składowej normalnej F_n siły szlifowania: a) w funkcji średniej długości starcia wierzchołka, b) w funkcji długości krawędzi skrawającej ściernicy [144]

Opracowana metoda [140] badania zużycia kształtowego ściernicy pozwoliła też na wyznaczenie zmian zużycia kształtowego ściernicy (rys. 2.39).



Rys. 2.39. Przebieg zużycia krawędziowego ściernicy - zarysy czynnej powierzchni ściernicy po różnych czasach w procesie obwodowego szlifowania płaszczyzn [140]

W pracy [86] wyznaczono wpływ mechanizmu zużycia ściernicy na szybkość jej zużycia promieniowego. Rysunek 2.40 ilustruje wpływ właściwej wydajności objętościowej ściernicy Q'_s na szybkość zużycia promieniowego $\Delta R/\Delta t$, który ujmuje wpływ czasu szlifowania na zużycie ściernicy.



Rys. 2.40. Wpływ mechanizmu zużycia ściernicy na szybkość jej zużycia promieniowego

2.3.4. Modelowanie trwałości narzędzi ściernych

Trwałość ściernicy jest okresem czasu pomiędzy dwoma kolejnymi procesami obciążania, czyli okresem, w którym narzędzie zachowuje swoje właściwości skrawne, oceniane względem oczekiwanych efektów obróbki. Suma wszystkich okresów trwałości ściernicy definiowana jest jako żywotność [14, 15, 69, 129, 130, 165]. Pod pojęciem okresu trwałości można też rozumieć zdolność przeciwstawiania się procesom zużycia ściernicy. Okres trwałości uzależniony jest od charakterystyki ściernicy, właściwości i kształtu obrabianego materiału, charakterystyki szlifierki oraz wielkości nastawnych, takich jak: prędkość skrawania, posuw wzdłużny i poprzeczny oraz głębokość szlifowania [130]. Można wyróżnić cztery podstawowe kryteria zużycia, wpływające na konieczność odnowienia czynnej powierzchni ściernicy:

- przekroczenie tolerancji wymiarowo – kształtowych ściernicy,
- zwiększenie chropowatości obrabianej powierzchni,
- niedopuszczalne podwyższenie temperatury, powodujące przypalenia i zmiany struktury powierzchni obrabianego przedmiotu,
- obniżenie wydajności objętościowej obróbki.

W opracowaniach [14, 15] wyznaczono fizyczny model trwałości ściernicy, uzależniony od: intensywności wykruszeń ziaren Q_{ziaren} , spoiwa Q_{spoiwa} , liczby ziaren N_a , i objętości ziarna V_z oraz współczynników interferencji zjawisk zużycia ziaren α i spoiwa β oraz współczynnika częściowego zużycia ziaren – m :

$$T_N = \frac{mV_z N_a}{\alpha Q_{\text{ziaren}} + \beta Q_{\text{spoiwa}}}, \quad (2.22)$$

Natomiast autor pracy [69] wyznaczył statystycznie – doświadczalny model trwałości ściernicy, zależny w różnym stopniu od wszystkich warunków obróbki:

$$T = \left(\frac{C_v v_s^s d^{a_v} B^{r_v} d_p^{a_{vp}} B_z B_c}{v_p g^{e_v} p^{u_v}} \right)^s, \quad (2.23)$$

gdzie: C_v – współczynnik uwzględniający wpływ czynników nieuwzględnionych we wzorze, s , a_v , r_v , a_{vp} , e_v , u_v – wykładniki empiryczne, B_z – współczynnik uwzględniający zmienną wielkość ziaren ściernych, B_c – współczynnik uwzględniający wpływ płynów obróbkowych, v_s – prędkość szlifowania, v_p – prędkość posuwu przedmiotu.

Matematyczny model trwałości ściernicy [75] zakłada, że trwałość ściernicy będzie równa najkrótszemu czasowi szlifowania, po którym zdolność skrawna ściernicy K zmniejszy się do wartości dopuszczalnej K_{\min} .

$$T = \min[t | K(t)\beta = \mu(x_i, t) = K_{\min}], \quad (2.24)$$

gdzie: t – czas szlifowania, β – poziom ufności, $\mu(x_i, t)$ – zmienne w czasie wielkości wejściowe procesu szlifowania.

Natomiast ekonomiczna trwałość ściernicy jest uzyskiwana wtedy, gdy suma kosztów K_E eksploatacji i energii, kosztów narzędzia oraz kosztów obciążania odniesiona do objętości usuniętego materiału osiąga minimum

$$T_E = \min(K_E / V_m), \quad (2.25)$$

2.4. Analiza procesu skrawania pojedynczym ostrzem

Badaniach modelowe, dotyczące doskonalenia opisu zjawisk elementarnych procesu mikroskrawania, przyczyniają się do wyjaśnienia mechanizmów oddzielania materiału w strefie szlifowania oraz zjawisk przy tym zachodzących. Postępy w modelowaniu następują w wyniku doskonalenia metod badawczych, czyli:

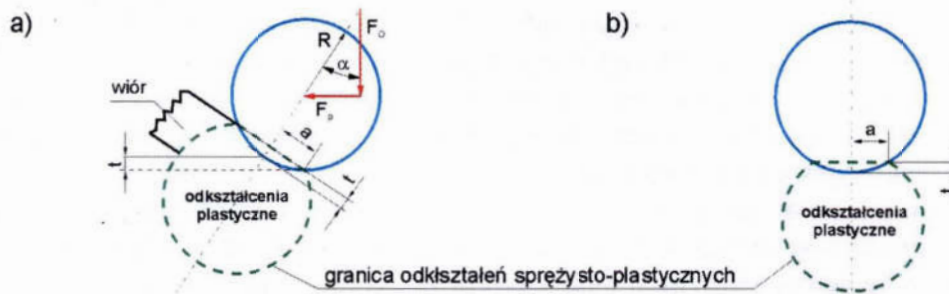
- opracowaniu nowych sposobów wyznaczania wartości i parametrów statystycznych wielkości dotąd nie wyznaczanych eksperymentalnie,
- zmniejszeniu niepewności pomiarowej w wyniku obniżania progu czułości,
- zmniejszeniu niepewności systematycznej i losowej,
- zwiększaniu stabilności czasowej i niezależności wyników od obserwatora,
- lepszym wykorzystaniu możliwości wynikających z matematycznego planowania eksperymentów i zmniejszeniu wpływu ograniczonej liczby danych na niepewność wyników eksperymentu,
- automatyzacji zbierania i przetwarzania danych,
- stosowaniu modeli matematycznych badanych procesów, uwzględniających probabilistyczny charakter zachodzących zjawisk,
- operowaniu informacjami niepełnymi, niepewnymi i nieściłymi,
- wykorzystywaniu możliwości symulacji komputerowych.

2.4.1. Modelowanie procesu skrawania ostrzem ziarna ściernego

Prace badawcze dotyczące modelowania skrawania prowadzone są od dawna. Założenia wczesnych prac [124, 125] opierano na uproszczeniu, że proces skrawania pojedynczego ziarna ściernego może być wyjaśniony poprzez analogię do modelu skrawania ortogonalnego, jakie występuje podczas toczenia i frezowania. W układzie takim proces tworzenia wióra zachodzi w wyniku przemieszczania się materiału wzdłuż płaszczyzny ścinania, a oddzielany materiał przemieszcza się prawie w całości równoległe do powierzchni ostrza, którego kąt natarcia jest dodatni, a prawie cała energia zużywana jest na tworzenie wióra.

W celu odniesienia do warunków skrawania zbliżonych do szlifowania, przeprowadzono badania dla ujemnych kątów natarcia [111], które potwierdziły przewidywania, że wzrost ujemnego kąta natarcia ostrza skrawającego powoduje wzrost sił skrawania i energii właściwej procesu. Badania samego procesu szlifowania wskazały, że charakter procesu i jego warunki energetyczne są odmienne od skrawania ortogonalnego. Znacznie większe są także naprężenia ostateczne w warstwie wierzchniej przedmiotu, a proces odkształceń plastycznych ma istotne znaczenie dla przebiegu mikroskrawania.

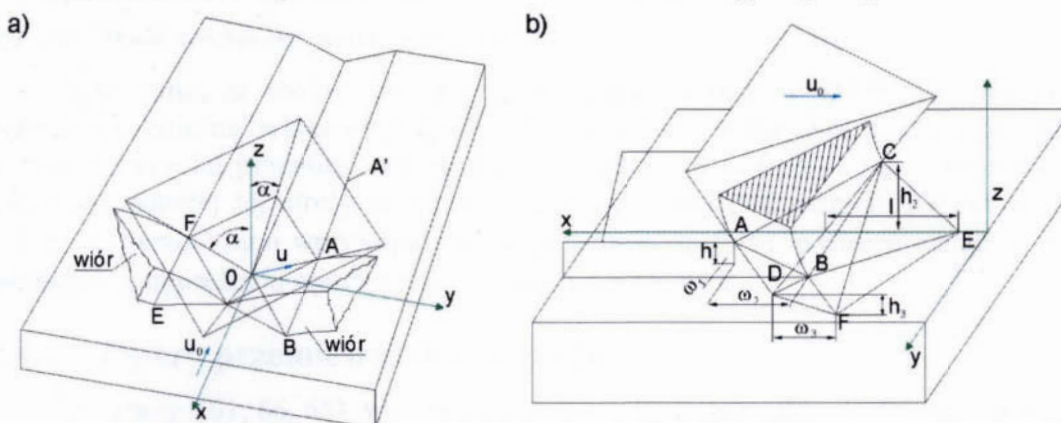
W modelu przedstawionym w opracowaniach [163, 165] zakładano, że proces tworzenia wióra podczas szlifowania traktowany jest jako wyciskanie materiału kulistym ostrzem (rys. 2.41), które tworzy kulistą strefę odkształceń plastyczno – sprężystych. Dla takich ziaren wyznaczono siły skrawania oraz naprężenia w obrabianym materiale. Pominięto występowanie tarcia na powierzchni styku ostrza z materiałem obrabianym i plastyczne płynięcie materiału.



Rys. 2.41. Model procesu skrawania wg Shaw'a [163]: a) strefa odkształceń plastyczno-sprężystych podczas tworzenia wióra, b) strefa odkształceń plastyczno-sprężystych dla pomiaru twardości materiału

Teorię „pola linii poślizgu” (ang. slip-line field) opisującą właściwości plastycznie odkształcanego materiału, zastosowano też w modelowaniu skrawania ostrzem stożkowym. W pracy [27] wyznaczono warunki geometrii ostrza i tarcia na powierzchni styku, dla których może następować skrawanie materiału, oraz wyprowadzono zależności do obliczania naprężeń w warstwie skrawanej. Jednak nie uwzględniono bocznych przemieszczeń materiału w czasie skrawania.

Teorię trójwymiarowego modelowania skrawania ziarnem w kształcie piramidy Vickersa analizowano w wielu pracach [3, 180, 181, 198, 204, 205] (rys. 2.42). Założono, że podczas szlifowania, powierzchnia natarcia ostrza nie jest prostopadła do kierunku skrawania, a oddzielanie materiału następuje w wyniku wyciskania materiału w kierunku bocznym w stosunku do krawędzi skrawania, co prowadzi zarówno do powstania wiórów oraz odkształceń plastycznych materiału.

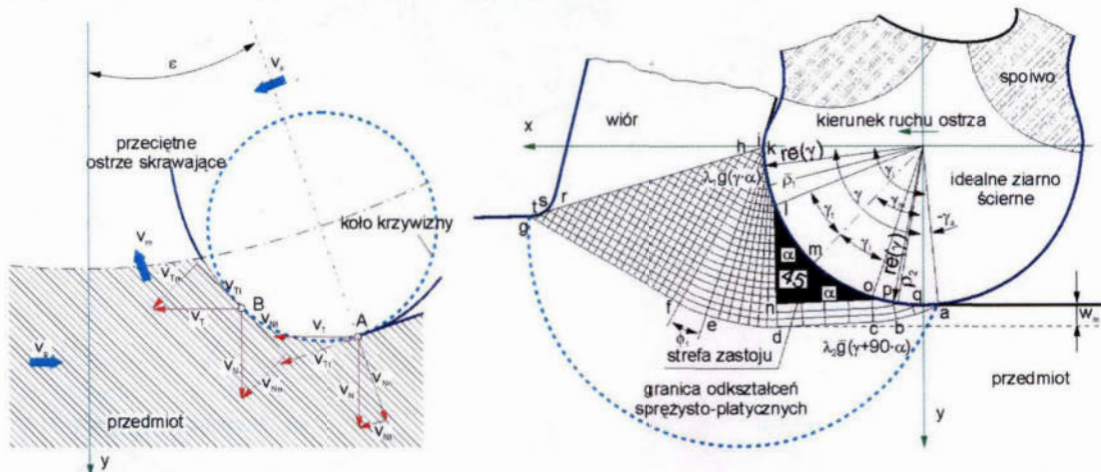


Rys. 2.42. Model procesu skrawania wg: a) Torrance'a [180], b) Xie i Williams'a [198]

Analizę wpływu zmian geometrii ostrza i jego położenia względem toru skrawania przeprowadzono w pracach [23–25, 119, 120]. Wykazano, że dzięki precyzyjnej orientacji położenia ziarna można osiągnąć efekt minimalizacji sił skrawania oraz określono zakres wartości optymalnych kąta natarcia γ .

W opisanych powyżej modelach zakładano prostoliniowy ruch ostrza, oraz stałą głębokość skrawania, co nie jest zgodne z warunkami istniejącymi podczas szlifowania. W modelu [135] wprowadzono założenie krzywoliniowego toru ruchu ziarna skrawającego. Przeprowadzono analizę teoretyczną, która wykazała, że proces tworzenia wióra zależy przede wszystkim od kąta natarcia ostrza γ oraz warunków tarcia między ostrzem i materiałem obrabianym. Wyprowadzono też zależności prędkości płynięcia materiału w kierunku stycznym do powierzchni ostrza:

Model procesu mikroskrawania ostrzem kulistym przedstawiono w pracy [110], w której zastosowano analizę linii pola poślizgu dla prostopadłego wgłębienia zaokrąglonego stempla w materiał. Założono, że modelowe ziarno ściernie zawieszono jest na sprężynie o określonej sztywności i porusza się po okręgu. Wyróżniono trzy fazy pracy ostrza: początkowo dla niewielkiego zagłębienia ostrza występuje jedynie tracie i odkształcenia sprężyste, następnie wraz ze wzrostem zagłębienia ostrza wzrasta siła nacisku na ziarno oraz tarcie, powodując wzrost temperatury, w wyniku czego początkowo następuje plastyczne płynięcie materiału, a następnie skrawanie. Stwierdzono, że dla dowolnego punktu ostrza skrawającego można określić kierunek przemieszczania się materiału, który wyznaczają składowe prędkości w danym punkcie zarysu (rys. 2.43).

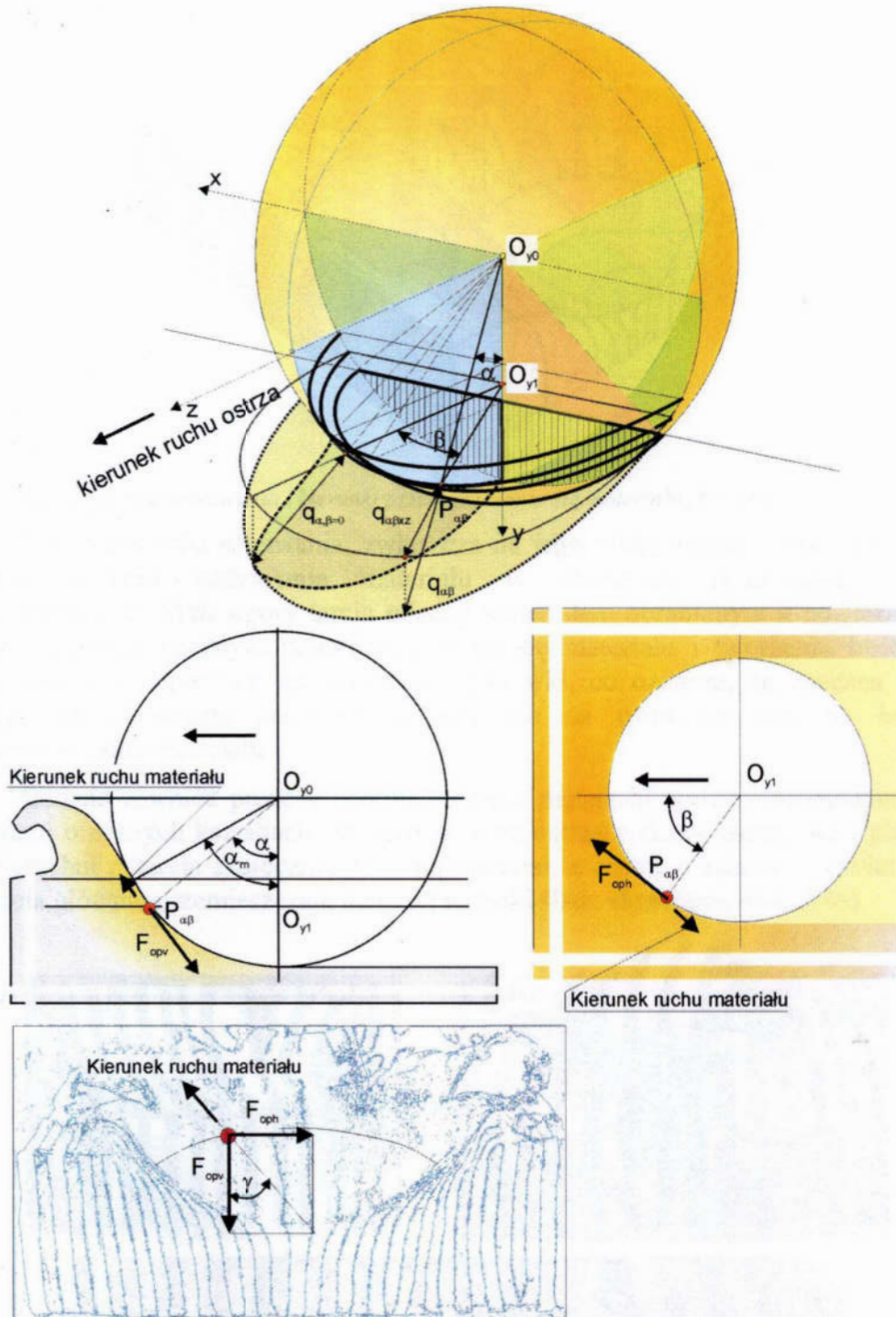


Rys. 2.43. Model procesu skrawania wg Lortza [110]

Wykazano, że istnieje obszar zwany strefą martwą, w której nie następuje przemieszczanie materiału względem ostrza, natomiast w każdym punkcie powyżej tej strefy materiał przemieszcza się przed ostrzem, co powoduje jego oddzielenie, natomiast poniżej tej strefy materiał przemieszcza się pod ostrzem skrawającym. Istotnymi parametrami wpływającymi na położenie strefy są: promień ostrza ρ_k , kąt wcinania η , naprężenia styczne τ i granica plastyczności κ .

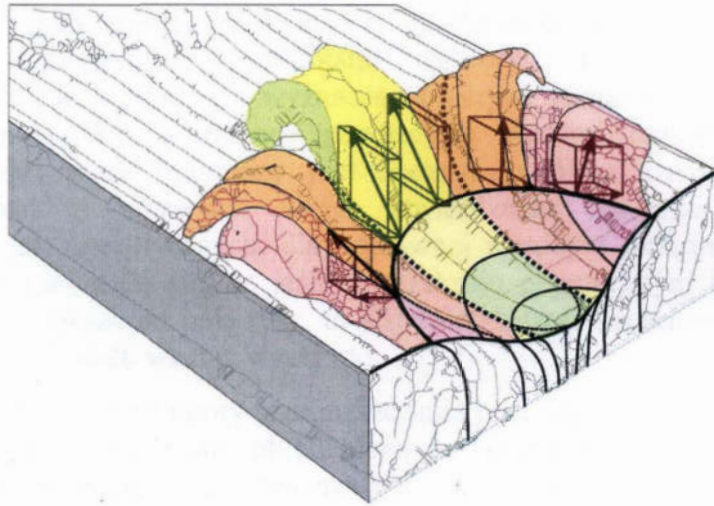
2.4.2. Opory przemieszczeń materiału

W pracy [61, 66, 68] wnioskowano, że siły tarcia jakie występują między rozpatrywaną cząstką materiału a powierzchnią ostrza są jedynie częścią składową oporów skrawania. Rozpatrywana cząstka bowiem w swym ruchu stycznym do powierzchni ostrza, poddawana jest ponadto oddziaływaniom cząstek sąsiednich, stykających się również z powierzchnią ostrza (te mają swoje sąsiednie cząstki itd.), jak również oddziaływaniu tych cząstek sąsiednich, które nie stykają się z powierzchnią ostrza. Schemat do analizy oporów przemieszczania materiału w strefie mikroskrawania przedstawiono na rysunku 2.44.



Rys. 2.44. Schemat do analizy oporów przemieszczania materiału w strefie mikroskrawania [61, 66]

Na rysunku 2.45 przedstawiono kształt strefy kontaktu kulistego wierzchołka ostrza z materiałem, kształty powstających wiórow oraz wypływek. Rysunek ten jest obrazem modelowania procesu mikroskrawania materiałów o różnej plastyczności w warunkach małych i dużych oporów tarcia materiału o powierzchnię narzędzia. Wśród wyróżnionych charakterystycznych obszarów w strefie mikroskrawania widoczne są obszary, w których materiał obrabiany przemieszczany jest w kierunku zbliżonym do kierunku ruchu ostrza. W tych obszarach odbywa się tworzenie wióra i oddzielanie materiału. Warto zauważyć, że boczne wypływek, zwłaszcza podczas mikroskrawania w warunkach dużej wartości oporów tarcia obrabianego materiału o powierzchnię ostrza, mają postać podobną do postaci tworzącego się mikrowióra.



Rys. 2.45. Strefa mikroskrawania i kierunki przemieszczania się materiału [61, 66]

Na proces mikroskrawania, zwłaszcza na jego efektywność, mają zasadniczy wpływ warunki oddzielania materiału w obszarach otaczających strefę mikroskrawania. Małe opory tarcia między materiałem obrabianym a powierzchnią ostrza sprzyjają bocznym przemieszczeniom się materiału i tworzeniu bocznych wypełnionych wypiętrzeń stanowiących wypłytki, co oznacza, że znaczna część pracy mikroskrawania przeznaczona jest nie na usuwanie lecz na boczne przemieszczanie materiału.

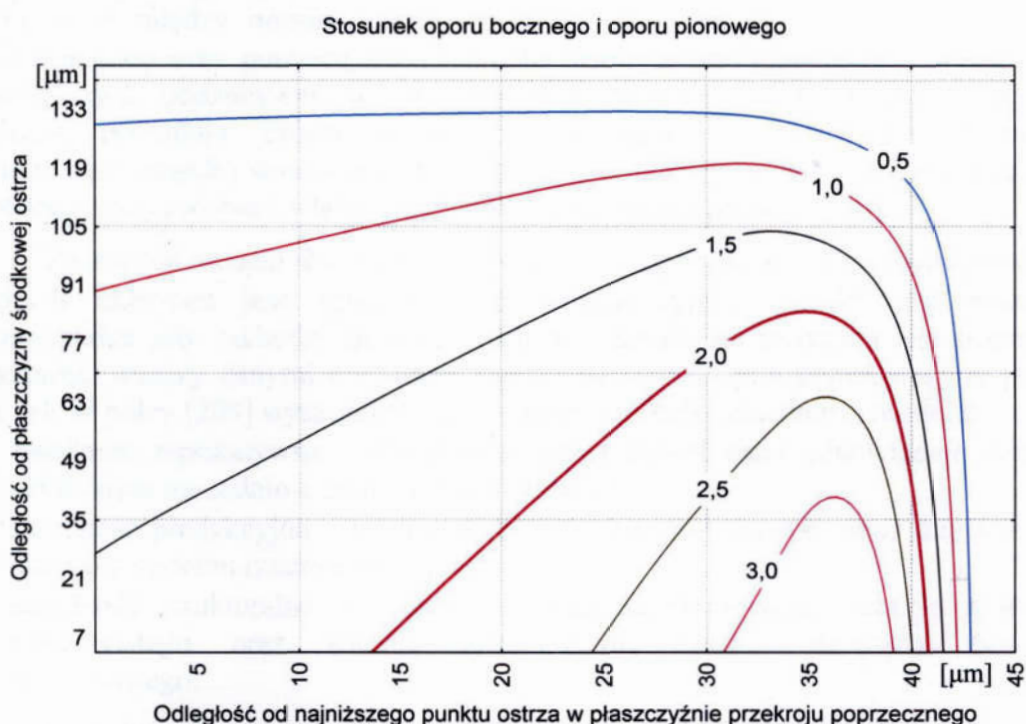
Badano również procesy przemieszczania materiału podczas mikroskrawania ostrzami o różnych kształtach. Stwierdzono, że ostrza o dużej szerokości i płaskiej powierzchni natarcia skutecznie usuwają materiał, a ostrza o klinowej powierzchni natarcia głównie przemieszczają materiał na boki śladu skrawania (rys. 2.46).



Rys. 2.46. Strefa mikroskrawania ostrzem o wierzchołku w kształcie: a) graniastosłupa 90° , o odmiennej orientacji do kierunku skrawania, b) ostrosłupa 45° [68]

Z powyższych spostrzeżeń wynika też, że badania i analizy proporcji między przekrojami wypływek i przekrojami mikrorys, kształtowanych podczas mikroskrawania, w których do wyznaczania zarysu przekroju wykorzystuje się profilometr, mogą być obarczone poważnymi błędami szacowania objętości wypływek, gdyż puste fragmenty pod bocznym wiórem uznaje się za pełną wypływkę. Jest to niezwykle ważne stwierdzenie, zarówno ze względów poznawczych jak i praktycznych, dla poprawnej metodyki interpretacji wyników, gdyż dotąd przyjmowało się, że jeśli w przekroju poprzecznym mikrorysy, pole wypływek jest większe od pola rysy, to jest to wyłącznie skutkiem nieregularnych przemieszczeń materiału wzdłuż wypływki.

Poddano też analizie opory przemieszczania bocznego materiału i stwierdzono, że na powierzchni przedmiotu obrabianego przyjmują one wartość najmniejszą, natomiast w strefach głębszych stosunek oporów bocznych do oporów pionowych jest większy od jedności (rys. 2.47).



Rys. 2.47. Linie stałe wartości stosunku oporów bocznych i pionowych przemieszczania materiału dla średnich współczynników tarcia na powierzchni natarcia $\mu=1$ [68]

Analiza wyników modelowania warunków przemieszczania się materiału w strefie styku z ostrzem wskazuje, że zwiększenie współczynnika tarcia między ostrzem a materiałem obrabianym, zwiększa opory boczne przemieszczania się materiału w stopniu większym niż opory pionowe przemieszczania materiału. Zastosowanie próżni, jako otoczenia procesu, taki skutek właśnie wywołuje, co potwierdzają także badania eksperymentalne [59]. Zastosowanie próżni i (lub) znacznego obniżenia temperatury przedmiotu, w kształtowaniu szczególnie dokładnych i miniaturowych elementów, może też dawać znaczący wzrost efektywności procesu. Ponadto osiąga się korzyści wynikające z ochrony powierzchni przed zanieczyszczeniami z otoczenia i uzyskuje się możliwość zmniejszenia niekorzystnego wpływu mikroobróbki na właściwości fizyczne warstwy wierzchniej.

2.5. Symulacja procesu szlifowania

Modelowanie i symulacja komputerowa jest nowoczesnym narzędziem pozwalającym przyczynić się do wyjaśnienia zjawisk, które zachodzą w strefie szlifowania, a ich analiza z wykorzystaniem badań eksperymentalnych jest bardzo pracochłonna i kosztowna lub umożliwia jedynie odniesienie się do uśrednionych cech globalnych procesu, takich jak np. zamiana sumarycznej siły szlifowania.

Symulacja komputerowa umożliwia szybkie i tanie przeprowadzanie badań nowych rozwiązań i wyselekcjonowanie najlepszych do dalszych badań doświadczalnych z prototypami zbudowanymi w oparciu o założenia wyznaczone w wyniku symulacji.

2.5.1. Zasadność modeli

Elementarnym problemem modelowania i matematycznej symulacji jest kompromis między opisem analitycznym, który powinien być zwięzły i łatwy w interpretacji oraz potrzebą uwzględnienia wielu skomplikowanych i wzajemnie powiązanych oddziaływań w modelowanym procesie. Większa szczegółowość modelu powoduje często konieczność rezygnacji z prostych zależności deterministycznych i stosowanie elementów, które posiadają cechy probabilistyczne, zgodne z rzeczywistymi właściwościami modelowanego procesu [138].

Zasadność modelu jest związana z układem eksperymentu i kryteriami, według których mierzona jest zgodność par wejścia–wyjścia. Model jest zasadny w przypadku gdy zachodzi zgodność tych par. Zasadność mierzona jest stopniem zgodności między danymi z systemu rzeczywistego i danymi generowanymi przez model. W pracy [208] wyszczególniono stopnie wielkości zasadności modelu:

- zasadność replikatywna – generowane przez model dane odpowiadają danym uzyskanym uprzednio z systemu rzeczywistego,
- zasadność predykcyjna – istnieje zgodność obu grup danych przed uzyskaniem danych z systemu rzeczywistego,
- zasadność strukturalna – model odtwarza zaobserwowaną reakcję systemu rzeczywistego oraz wiernie odzwierciedla sposób działania systemu rzeczywistego.

Modelowanie symulacyjne definiowane jest jako czynności wyróżniania i formalizacji cech systemu oraz ustalania relacji zachodzących między nimi, w celu znalezienia ich odpowiedników w innych systemach. Produktem końcowym jest model stanowiący spójny opis istotnych cech odwzorowywanego procesu i jego zmienności w czasie [81, 138].

Można wyróżnić kilka kategorii modeli symulacyjnych, których podziału dokonuje się ze względu na ich cechy:

- Klasyfikacja związana z podstawą czasu – model jest ciągły w czasie, jeżeli opisu czasu dokonuje się w sposób ciągły natomiast model jest dyskretny w czasie, jeżeli czas zmienia się skokowo.
- Klasyfikacja modeli związana z zakresami przyjmowanych wartości przez zmienne opisowe – model jest dyskretny w dziedzinie jego stanów, jeżeli jego zmienne przyjmują zbiór wartości dyskretnych oraz ciągły w dziedzinie stanów, jeżeli stan procesu może być przedstawiony za pomocą liczb rzeczywistych lub ich przedziałów. Modele ciągłe w czasie mogą być dalej dzielone według klas dyskretnych zdarzeń i równań różniczkowych.

- Klasyfikacja według zawartości w opisie modeli zmiennych losowych – zmienne losowe w modelach probabilistycznych na ogół dotyczą: niezawodności i efektywności systemu, zajścia zdarzenia, czasu trwania modelowanych zjawisk oraz błędów pomiaru, przekraczania pewnych wartości krytycznych.
- Klasyfikacja zależna od sposobu oddziaływania systemu rzeczywistego z jego otoczeniem – model jest autonomiczny jeżeli przyjęto, że system rzeczywisty jest izolowany od swojego otoczenia.

W rzeczywistości model podstawowy nigdy nie jest pełny. Model podstawowy dostarcza jedynie wyjaśnienia reakcji systemu rzeczywistego i obejmuje wiele elementów i ich wzajemnych oddziaływań. W praktyce duży stopień złożoności modelu podstawowego może uniemożliwiać wykorzystanie go jako modelu symulacyjnego. Niezbędne jest wówczas skonstruowanie prostszego modelu, który zawierać będzie dopuszczalne i uzasadnione uproszczenie interakcji.

2.5.2. Procedury uproszczania modelu

Procedury uproszczania modeli dotyczą operacji wykonywanych w opisie strukturalnym modelu polegające na modyfikacji jednej lub więcej części tego opisu, co prowadzi do uzyskania modelu scalonego, przez:

- pomijanie jednego lub więcej elementów najmniej znaczących, zmiennych opisowych lub reguł interakcji, które mają najmniejszy wpływ na zasadność modelu,
- zastępowanie zmiennych deterministycznych przez zmienne losowe,
- uogólnienie zakresu zmiennych opisowych, czyli zawężeniu zakresu zmiennych scalonych w stosunku do zakresu zmiennych podstawowych,
- grupowanie elementów w bloki i agregowanie zmiennych opisowych. Proces agregowania można rozpatrywać bez straty informacji, dzięki uogólnieniu zakresu powstałego wyrazu złożonego [208].

2.5.3. Ocena wiarygodności modelu

Ocena wiarygodności systemu dotyczy wyłącznie zewnętrznych rezultatów lub objawów działania. Praktyczna ocena wiarygodności wyników symulacji polega na ich porównaniu z przebiegami zarejestrowanymi w rzeczywistości za pomocą testów statystycznych, porównania wartości średnich, wariancji, rozkładów prawdopodobieństwa oraz przeprowadzenia analizy spektralnej. Pozytywny wynik potwierdza przydatność modelu w badaniach symulacyjnych [138].

2.5.4. Symulacyjne modele probabilistyczne

Rozwiązywanie problemów za pomocą modeli probabilistycznych wymaga zwykle zastosowania różnych generatorów liczb losowych [197]. Warunkiem wstępnym utworzenia modelu probabilistycznego jest przyporządkowanie odpowiedniego rozkładu prawdopodobieństwa każdemu losowemu elementowi modelu, aby później podczas procesu symulacji, określać wartości tych elementów przez generowanie liczb losowych.

Najbardziej prawdopodobny obraz zachowania się symulowanego systemu na podstawie modelu probabilistycznego uzyskuje się: poprzez wielokrotne powtarzanie danego podstawowego okresu funkcjonowania systemu, zmieniając stany początkowe generatora liczb losowych dla każdego okresu, lub przez przedłużanie symulacji danego okresu podstawowego zakładając, że symulowane procesy będą

miały niezmienny charakter. Zarówno w pierwszym, jak i w drugim przypadku proces powinien być na tyle długi, aby uzyskane wyniki były dostatecznie dokładne i wiarygodne ze statystycznego punktu widzenia.

Procesy obserwowane podczas eksperymentów symulacyjnych mają z reguły charakter stochastyczny. Działanie lub zachowanie się systemów dyskretnych ocenia się za pomocą syntetycznych charakterystyk takich jak wartości średnie, wariancje lub momenty wyższych rzędów rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych losowych. Właściwości badanego systemu ujawniają się przez zbiorczy, uśredniony efekt działania dużej liczby czynników stymulujących, nie zaś przez pojedyncze, chwilowe wartości zmiennych stanu. Procesy losowe dzielą się na dwie podstawowe klasy: procesy stacjonarne, w których charakterystyki statystyczne są wielkościami stałymi, oraz procesy niestacjonarne [167], to znaczy zmienne w czasie (np. wartość średnia jest funkcją czasu). Niestacjonarność wymusza często wyznaczenie przedziałów, w których zjawiska zachodzą z zachowaniem zasad stacjonarności lub budowę modelu addytywnego, w którym rozdziela się zmienne deterministyczne i zmienne losowe.

2.5.5. Symulacja procesu szlifowania

W literaturze istnieją przykłady opracowań wielu modeli i symulacji procesu szlifowania, stanowiących podstawę do wnioskowania, że stosowanie modelowania pozwala na wyjaśnienie zjawisk elementarnych zachodzących podczas obróbki ścierniej, techniki symulacji przyczynią się do wprowadzania i testowania nowych rozwiązań technologicznych. W prowadzonych badaniach symulacyjnych stosowano różne techniki modelowania i symulacji procesu szlifowania. W tablicy 2.5 zestawiono zastosowania metod symulacji oraz zakres prowadzonych badań.

Tablica 2.5. Metody symulacji i cechy modelowanego procesu szlifowania

Autor	Metoda symulacji	Badane obszary procesu szlifowania
Yosikawa H. Peklenik J. (1968) [206, 207]	W symulacji wyznaczono losowe położenie wierzchołków na powierzchni ściernicy i określono ich kontakt z jednym profilem zarysu powierzchni obrabianego materiału. W badaniach stosowano metodę Monte Carlo.	Wyznaczono rozkłady przekrojów wióra i średnią szerokości warstwy skrawanej. Badano wpływ warunków kinematycznych na proces oraz aktywność ziaren skrawających.
Pandit S.M. Sathyanarayanan G (1982) [137]	Symulacja obwodowego szlifowania płaszczyzn z uwzględnieniem modelu topografii powierzchni ściernic opisanego dwoma sinusoidami reprezentującymi położenie ziaren oraz wierzchołków skrawających, z uwzględnieniem ugięcia ziaren.	Wyznaczono zależności funkcyjne pozwalające przewidywać chropowatość obrobionej powierzchni na podstawie wyznaczonych charakterystyk profilu zarysu ściernicy. Określono też liczbę wierzchołków ziaren aktywnych.
König W. Steffens K. (1982) [83, 87, 170]	Symulacja obwodowego szlifowania płaszczyzn dla modelu ściernicy, wyznaczonego na podstawie zapisu pomiarów rzędnych zarysu oraz identyfikacji położenia ziaren. Uwzględniono kinematykę procesu, w kolejnych fazach pracy ziaren.	Określono chropowatość obrabianej powierzchni, kinematyczną grubość warstwy skrawanej, aktywność ziaren skrawających oraz wpływ parametrów kinematycznych. Wyznaczano siły skrawania, bilans ciepła i rozkłady temperatury procesu.

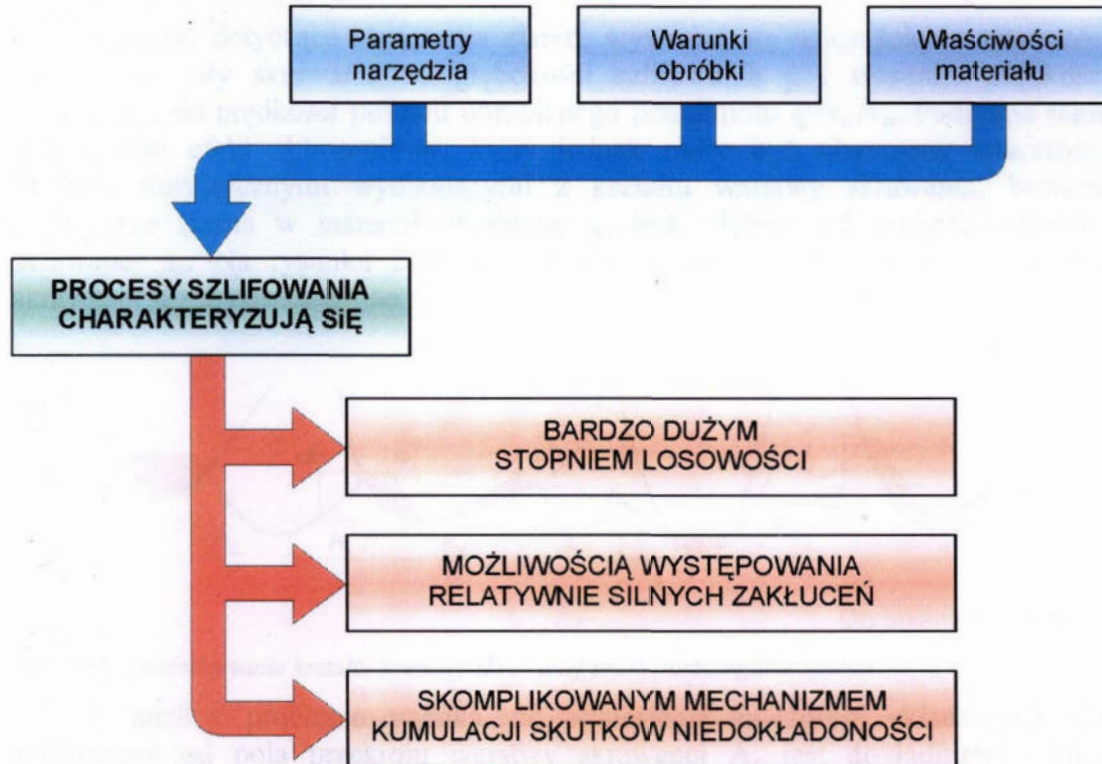
Borkowski J. Markul J. (1982) [11, 119]	Symulacja procesu szlifowania z modelem narzędzia ściernego, o zorientowanym położeniu ziaren z regularnego monokrystalicznego węgla krzemu.	Określono wpływ zorientowanego położenia ziaren ściernych na wydajność szlifowania, oraz zużycie ziaren.
Kruszyński B. Meldner B. (1989) [98–100, 123]	W symulacji szlifowania kół zębatych metodą Niles'a opracowano algorytm wyznaczania sił szlifowania i rozkładów temperatur na powierzchni obrabianych zębów z uwzględnieniem wpływu warunków kinematycznych.	Obliczano siły, moc i ciepło szlifowania oraz wyznaczono rozkłady temperatury na powierzchni szlifowanych zębów.
Chiu N. Malkin S. (1993) [32]	Symulacja procesu szlifowania wałków, z zastosowaniem modeli cząstkowych poszczególnych elementów procesu szlifowania. Dane wejściowe stanowiły zbiór liczb charakteryzujących makrogeometrię ściernicy, w postaci parametrów statystycznych, oraz warunki kinematyczne procesu.	Wyznaczono siły, moc szlifowania, objętość usuwanego materiału, temperatury defektów cieplnych powierzchni obrabianej, chropowatości powierzchni oraz błędy kształtu obrabianego przedmiotu.
Inasaki I. (1996) [46]	Metoda symulacji obwodowego szlifowania płaszczyzn oparta na pomiarach parametrów topografii ściernicy i identyfikacji aktywności ziaren. Wyznaczono parametry kinematyczne kontaktu ziaren ściernicy z materiałem.	Wyznaczono siły i moc szlifowania i aktywność ziaren skrawających. Przewidywano chropowatość obrabianej powierzchni w oparciu o parametry topografii powierzchni czynnej ściernicy i analizę wpływu warunków kinematycznych na siły.
Chen X. Rowe B. (1996) [28–31]	W symulacji złożono losowe rozmieszczenie kulistych modeli ziaren w objętości ściernicy. Obliczenia symulacyjne prowadzono dla każdego kontaktu ziarna z materiałem obrabianym. Uwzględniono obciążanie ściernicy, zużycie i ugięcie ziaren, oraz powstawanie wypływek.	Badano zmiany chropowatości powierzchni obrabianej podczas procesu, wyznaczono siły i moc szlifowania, oraz wpływ obciążania na efekty końcowe procesu.
Warnecke G. Zitt U. (1998) [193]	W symulacji zastosowano numeryczny model stereometrii topografii powierzchni ściernicy. Złożonego losowe rozmieszczenie ziaren w kształcie ośmiościanów foremnych. Dla każdego kontaktu wyznaczano grubości oraz przekroje warstwy skrawanej. Do modelowania przepływu ciepła stosowano metodę elementów skończonych.	Wyznaczano siły i moc szlifowania, rozkłady temperatur w przedmiocie obrabianym oraz wpływ zmiany temperatury na dokładność wymiarową obróbki.
Rolka L. (1998) [155]	Zastosowano metody sztucznej inteligencji do oceny zużycia ściernic w procesie obwodowego szlifowania płaszczyzn w oparciu o dane mierzalne procesu, dla warunków pracy z dominującym zużyciem ściernym narzędzia.	W opracowaniu zastosowano teorię zbiorów rozmytych oraz sztuczne sieci neuronowe do oceny zużycia ściernicy na podstawie mierzonych wartości siły skrawania i wartości skutecznej emisji akustycznej.

Karpiński T. Kochaniewicz P. (2001)	W symulacji obwodowego szlifowania osiowego, wewnętrznych powierzchni walcowych zastosowano modele ściernicy z mikro- i monokrystalicznym ziarnem regularnego azotku boru. Przeprowadzono analizę mikrogeometrii powierzchni szlifowanej przedmiotu obrabianego.	W badaniach wyznaczono wpływ parametrów procesu na kształtowanie zarysu profilu przedmiotu obrabianego po szlifowaniu. Poddano ocenie parametry chropowatości, oraz ilość ziaren, które brały czynny udział w procesie szlifowania.
Bałasz B Królikowski T. (2003) [4, 94–97]	W symulacji określono wpływ geometrycznych cech czynnej powierzchni ściernicy na kształtowanie powierzchni przedmiotu obrobionego dla obwodowego szlifowania płaszczyzn. Modelowanie i symulacja obejmowały: topografię ziarna, topografię ściernicy, usuwania materiału i powstawanie wypływek, kinematykę procesu oraz kształtowanie topografii powierzchni obrobionej.	Analizowano zjawiska występujące w procesie szlifowania, zwłaszcza chwilowe obciążenie czynnych ostrzy skrawających, oraz chwilowe przekroje warstw skrawanych mające wpływ na mechanizmy tępienia i samoostrzenia się ziaren oraz kształtowanie powierzchni.
Lipiński D. (2005) [47, 109]	Opracowano system nadzorowania jakości w procesie szlifowania, pozwalający na powiązanie procedur diagnostycznych z czynnikami powodującymi zagrożenia dla uzyskania wymaganej jakości, z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji oraz logiki rozmytej.	Opracowano metody diagnostyczne, które mają za zadanie wykrywać niedokładności w procesie obróbki, oceniać stopień ich wpływu na istotne parametry jakości wyrobu oraz identyfikować przyczyny ich wystąpienia
Kacalak W., Ściegienka R. (2005)	Opracowano model, algorytm i metodę symulacji procesów szlifowania, polerowania ściernicami elastycznymi oraz wygładzania foliowymi taśmami ściernymi, z uwzględnieniem podatności narzędzi.	Analizowano obciążenie czynnych ostrzy skrawających w procesie szlifowania, polerowania ściernicami elastycznymi oraz wygładzania foliowymi taśmami ściernymi, kształtowanie powierzchni, z wykorzystaniem probabilistycznych modeli tworzenia wypływek.

Zestawione powyżej metody symulacji różnią się założeniami stopniem losowości opracowanych modeli cząstkowych procesu szlifowania oraz zakresem badanych obszarów procesu. Tylko w niewielu opracowaniach uwzględniano proces zużycia ziaren i ściernicy. Brak jest w literaturze przykładów kompleksowego modelowania zużycia ściernicy w zmiennych warunkach procesu szlifowania oraz stosowania technik symulacyjnych do wspomagania projektowania nowych narzędzi.

2.6. Wnioski z analizy literatury

Procesy szlifowania charakteryzują się bardzo dużym stopniem losowości, możliwością występowania relatywnie silnych zakłóceń oraz skomplikowanym mechanizmem kumulacji skutków niedokładności (rys. 2.48).



Rys. 2.48. Schemat charakterystycznych zależności dla procesu szlifowania

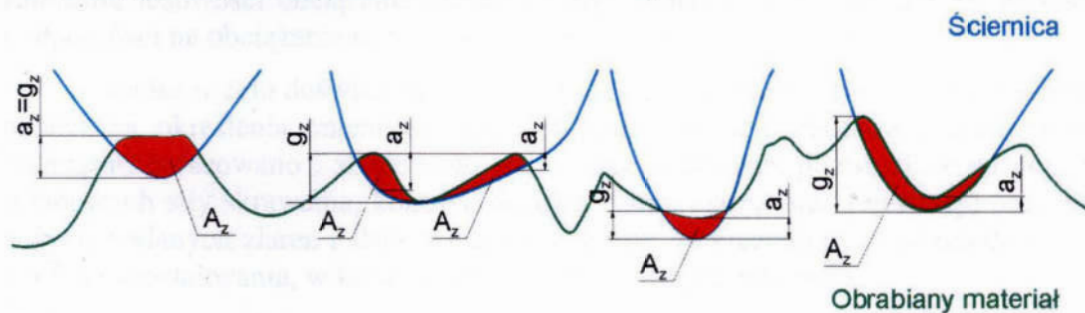
Ze względu na wielką ilość czynników wpływających na przebieg procesu szlifowania, których charakter zmian jest losowy, niemożliwe jest zastosowanie jedynie modeli deterministycznych w opisie zużycia i trwałości ściernicy. Słuszne jest więc poszukiwanie modeli probabilistycznych, mogących uwzględnić większość zjawisk towarzyszących zużyciu narzędzi ściernych.

Na losowy charakter rozmieszczenia ostrzy skrawających na powierzchni ściernicy wpływa wiele czynników, które można podzielić na grupy związane z:

- **procesem produkcji materiału ściernego i ściernicy** takich jak: losowość wielkości, kształtu, mikrogeometrii, promieni zaokrąglenia wierzchołków i kątów wierzchołkowych ostrzy ziaren, losowość orientacji ziaren na powierzchni ściernicy, losowość położenia ziaren, makro–niejednorodność ściernicy;
- **procesem obciążania** na który wpływa losowa wytrzymałość samych ziaren i ich połączenia z ziarnami sąsiednimi, losowość wykuszania i wyrywania ziaren w procesie odnowienia powierzchni czynnej;
- **procesem zużycia ściernicy**, zależnym od: losowej wytrzymałości ziaren ściernicy, losowości wiązań z ziarnami sąsiednimi, losowości obciążenia ziaren ściernych oraz losowości rozkładu zużycia ściernego i wytrzymałościowego.

W literaturze napotyka się analizy problemów dotyczących obciążenia ziaren ściernych oraz modelowania procesów szlifowania, polegające najczęściej na wyznaczeniu sumy składowych sił działających na poszczególne ostrza oraz analitycznym wyprowadzeniu ogólnych zależności składowych siły szlifowania z uwzględnieniem statystycznych zależności opisujących liczbę ziaren aktywnych.

Analizy, dotyczące obciążenia ziaren, wywodzą się najczęściej z zależności składowych siły skrawania od głębokości szlifowania g i stosunku prędkości szlifowania do prędkości posuwu obrabianego przedmiotu $q = v_s / v_p$. Podejście takie daje szybki efekt obliczeniowy, który jednak może być obarczony znacznymi błędami statystycznymi wynikającymi z kształtu warstwy skrawanej, bowiem zagłębienie ziarna w materiał obrabiany g_z jest większe od grubości warstwy skrawanej a_z . Na rysunku 2.49 przedstawiono zróżnicowanie kształtu warstwy skrawanej przez poszczególne ostrza ziaren ściernych.



Rys. 2.49. Zróżnicowanie kształtu warstwy skrawanej przez poszczególne ziarna

Z analizy problemu wynika, że odniesienie zależności składowych siły szlifowania od pola przekroju warstwy skrawanej A_z jest dokładniejsze, choć trudniejsze w realizacji obliczeń symulacyjnych oraz przyjęto, że w niniejszej pracy wykorzystanie zostanie dokładniejsza metoda modelowania obciążenia ziaren.

Podstawową barierą ograniczającą postęp w dziedzinie wyznaczenia zależności pomiędzy elementarnymi zjawiskami zachodzącymi w strefie szlifowania jest trudność identyfikacji i oceny rozmieszczenia ostrzy skrawających na powierzchni czynnej ściernicy, jak również trudności z dostępem do strefy szlifowania podczas obróbki i rejestracji zmian zachodzących podczas szlifowania. Słuszne jest więc stosowanie badań mikroskrawania pojedynczym ostrzem ziarna oraz zastosowanie modelowania i symulacji do wyznaczenia składowych siły działającej na poszczególne ostrza, co umożliwi wyprowadzenie wniosków dotyczących obciążenia i zużycia ziaren oraz całego narzędzia.

ROZDZIAŁ 3

TEZY I ZAKRES PRACY

3.1. Cel pracy

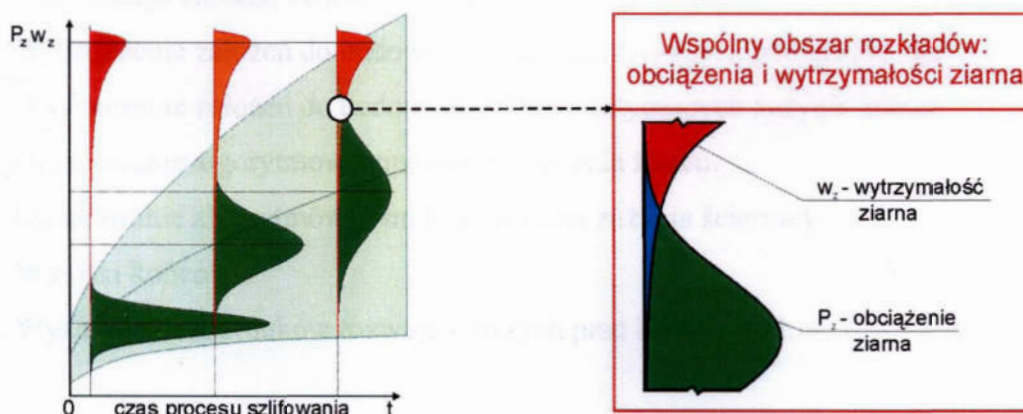
Celem poznawczym pracy jest opracowanie modeli zużycia narzędzi ściernych w zmiennych warunkach procesu szlifowania, z wykorzystaniem probabilistycznego opisu zagadnienia oraz algorytmów symulacji zużycia ściernicy w procesie obwodowego szlifowania płaszczyzn. Matematyczne modele zużycia oparto na założeniu losowości obciążenia mechanicznego ziaren oraz wytrzymałość doraźnej i odporności na obciążenie sumaryczne w czasie pracy ziaren ściernych.

Ponadto w celu doświadczalnej weryfikacji założeń przyjętych w modelowaniu obciążenia, określenia zmienności obciążeń oraz rejestracji procesów zużycia ziaren ściernych, opracowano i zbudowano stanowisko badawcze, pozwalające na pomiar składowych siły skrawania, kontrolę dosuwu ostrza ziarna oraz rejestrację obrazów zużycia badanych ziaren i śladów mikroskrawania, ze szczególnym uwzględnieniem strefy mikroskrawania, w której tworzą się wióry i wypłytki boczne.

3.2. Tezy pracy

Teza 1:

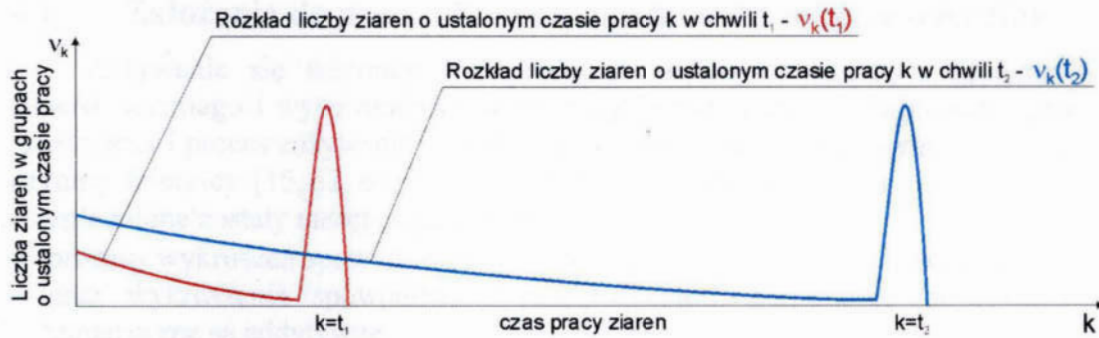
Wartości siły skrawania dla poszczególnych ziaren w procesie szlifowania charakteryzują się znaczną zmiennością, a ich rozrzut może być opisany rozkładem logarytmiczno – normalnym. Intensywność wykruszeń ziaren jest zależna od zmiennych w czasie parametrów charakteryzujących postać i położenie rozkładów wytrzymałości doraźnej i chwilowego obciążenia ziaren, a zwłaszcza od cech wspólnego obszaru tych rozkładów, który odpowiada rzadkim przypadkom przekroczenia wytrzymałości doraźnej przez chwilowe obciążenie ziarna (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Wspólny obszar rozkładów: obciążenia i wytrzymałości ziarna

Teza 2:

Analiza stanów obciążenia i wykonanej pracy przez poszczególne ziarna aktywne (w okresie od rozpoczęcia pracy) pozwala na statystyczną ocenę stanu ściernicy. Opracowanie modelu rozkładu sumarycznego czasu pracy poszczególnych ziaren na powierzchni ściernicy oraz rozkładu ich skumulowanego obciążenia, pozwala na ocenę stanu powierzchni czynnej ściernicy, zużycia kształtowego oraz prognozowanie trwałości ściernicy.



Rys. 3.2. Rozkład liczby ziaren w grupach o ustalonym czasie pracy

3.3. Zakres pracy

- Analiza stanu wiedzy w zakresie badanych problemów.
- Opracowanie probabilistycznego modelu obciążenia ziaren.
- Opracowanie modelu zużycia kształtowego ściernicy.
- Opracowano i zbudowano układy badawczych, stanowiących stanowisko obróbkowe.
- Badania obciążenia ziaren w procesie mikroskrawania.
- Badania i rejestracja zużycia ziaren.
- Analiza wyników badań
- Weryfikacja założeń do modelowania obciążenia ziaren.
- Wyznaczenie założeń do budowy symulacji dotyczących obciążenia ziaren.
- Wyznaczenie założeń do budowy symulacji dotyczących zużycia ziaren.
- Opracowanie algorytmów symulacji obciążenia ziaren.
- Opracowanie algorytmów symulacji procesu zużycia ściernicy.
- Wnioski końcowe.
- Wyznaczenie kierunków rozwoju dalszych prac badawczych.

ROZDZIAŁ 4

MODELOWANIE TRWAŁOŚCI I ZUŻYCIA ŚCIERNICY

4.1. Założenia do probabilistycznego modelu zużycia ściernicy

Zużywanie się ściernicy jest procesem złożonym, zależnym głównie od zjawisk ściernego i wytrzymałościowego zużycia ziaren ściernych. Ponadto proces szlifowania i proces zużywania się ściernicy zależą od zmiennego stanu powierzchni czynnej ściernicy [15, 52, 63, 69, 130]. W analizie procesu zużywania się ściernicy uwzględnione zostały następujące założenia:

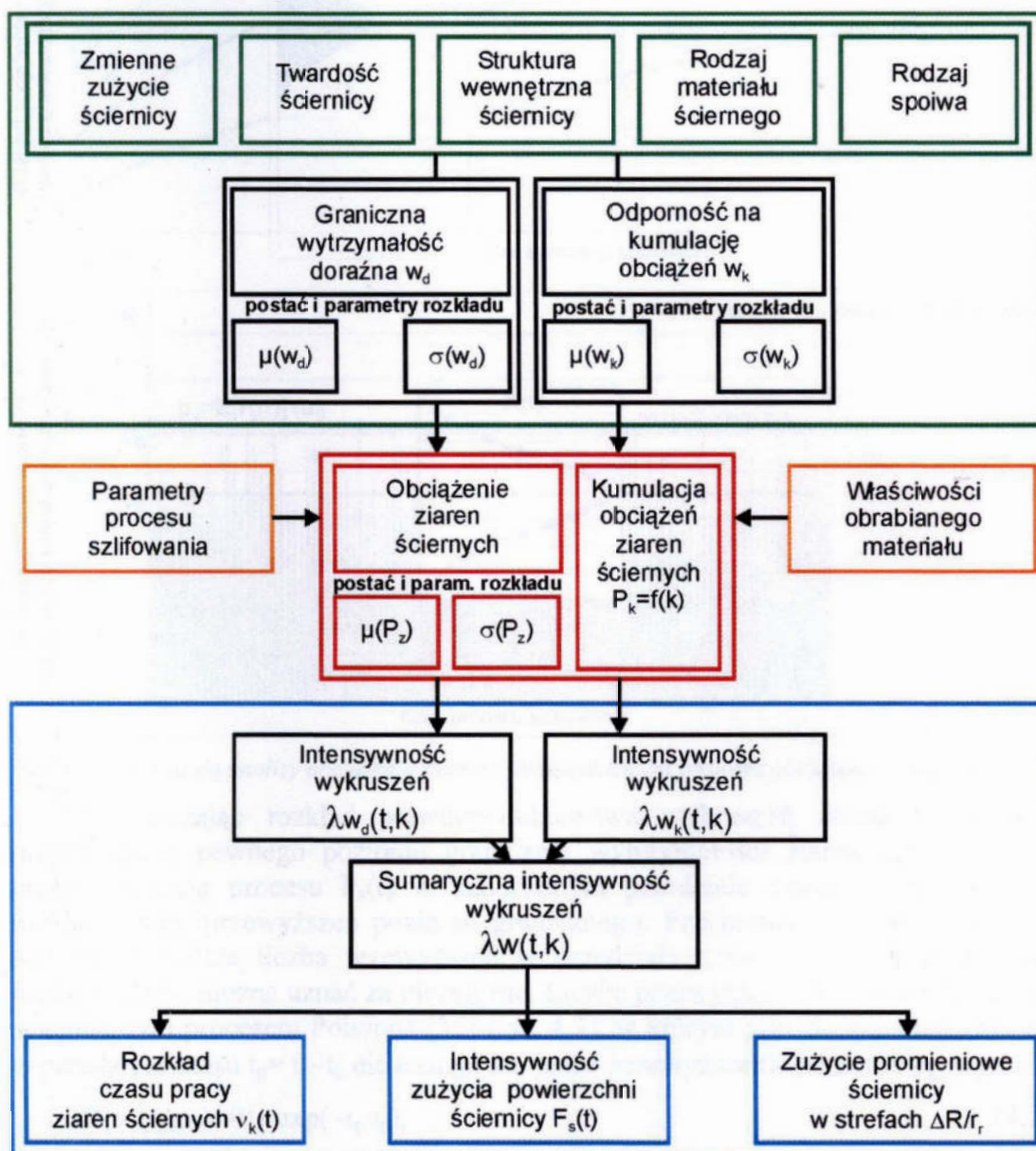
- procesy wykruszeń spowodowane przekroczeniem wytrzymałości doraźnej ziarna oraz wykruszenia spowodowane przekroczeniem odporności na obciążenie sumaryczne są addytywne,
- ziarna o dłuższym czasie pracy charakteryzują się większym starciem, co powoduje wzrost obciążenia,
- proces wykruszeń wskutek przekroczenia wytrzymałości doraźnej zależy od rozkładu granicznej wytrzymałości ziaren i rozkładu obciążenia ziarna zmiennego w czasie pracy ziarna.

Analiza procesu wykruszeń pozwala wyznaczyć zmiany intensywności wykruszeń w czasie pracy w zmiennych warunkach procesu szlifowania, i dalej wartości zużycia promieniowego ściernicy w umownych strefach zużycia ściernicy.

- w początkowym okresie pracy, po zabiegu obciążania intensywność zużycia ściernicy wyraźnie zależy od stanu powierzchni czynnej,
- zależność intensywności zużycia ściernicy w pierwszym etapie procesu szlifowania od stanu powierzchni czynnej maleje z upływem pracy ściernicy, szczególnie w przypadku zastosowania obciążania zgrubnego,
- zmienna intensywność zużycia wytrzymałościowego zależy od charakterystyki narzędzia ściernego, w szczególności od zastosowanego materiału ściernego i spoiwa, a także ich udziału w objętości ściernicy,
- dla ściernicy o mniejszej twardości przeważa proces wykruszeń całych ziaren ściernych, natomiast w przypadku większej twardości narzędzia dominują mikrowykruszenia na powierzchni ziarna lub postępujące zużycie ściernicy powierzchni ziarna,
- po wykruszeniach ziaren aktywnych maleje całkowita powierzchnia starcia wszystkich ziaren aktywnych o wartość powierzchni starcia na ziarnach wykruszonych,
- liczba ziaren wykruszonych w danej chwili jest wartością zmienną w czasie procesu szlifowania, w szczególnych przypadkach intensywnego samoostrzenia ściernicy można przyjąć, że jest wartością stałą,
- w warunkach pracy ściernicy z ograniczonym samoostrzeniem średni czas oczekiwania na wykruszenie w grupie ziaren o ustalonym czasie pracy może zależeć od sumarycznego czasu pracy ziarna ściernego,
- rozkład czasu pracy ziaren aktywnych jest zmienny z upływem czasu szlifowania.

Ponadto trzeba uwzględnić, że cieplne i mechaniczne obciążenie ziaren ściernych, ich wytrzymałość doraźna i odporność na kumulację obciążeń, a także siła niezbędna do wykruszenia ziarna są wartościami zmiennymi losowo [52-54, 64, 65, 67,74-76,102].

Na rysunku 4.1 przedstawiono schemat do analizy modelu zużycia ściernicy. W modelu uwzględniono cechy narzędzi ściernych wpływające na zużycie ziaren ściernych. Wyodrębniono graniczną wytrzymałość ziaren ściernych oraz odporność na kumulację obciążeń, podczas pracy ziarna. Obciążenie ziarna, zmienne w czasie procesu szlifowania, uzależniono od warunków procesu oraz cech materiału obrabianego. Obciążenia, które nie powodują wykruszeń ziaren ze ściernicy kumulują się i odnoszone są do granicznej odporności ziarna na sumę obciążeń. Model umożliwia wnioskowanie o stanie powierzchni czynnej ściernicy na podstawie wyznaczonych zmian intensywności wykruszeń ziaren w czasie procesu szlifowania oraz rozkładów czasu pracy ziaren. Dla warunków pracy narzędzia, w których zachodzi proces wykruszeń ziaren, możliwe jest także wyznaczenie zużycia promieniowego.



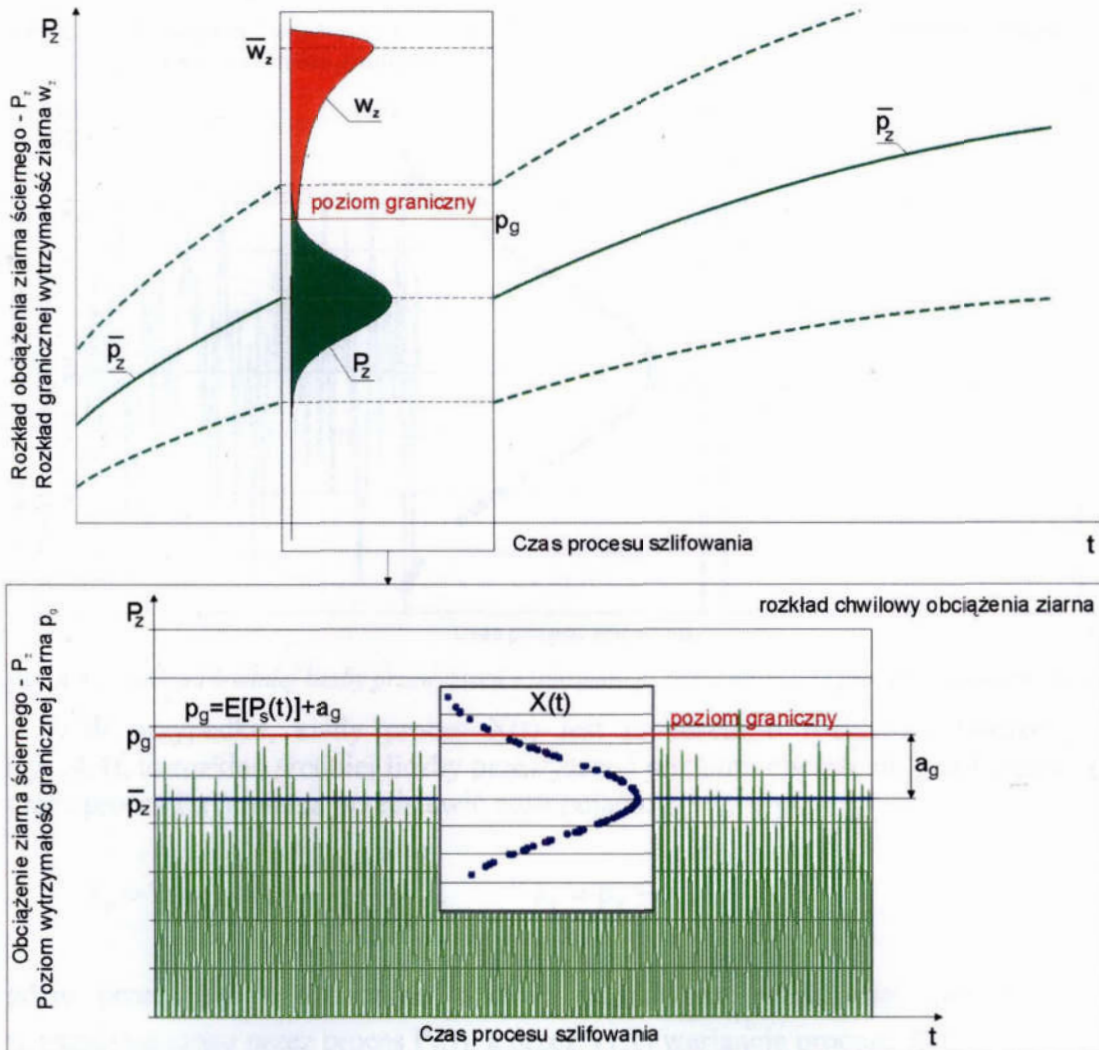
Rys. 4.1. Schemat do analizy założeń modelu zużycia ściernicy

4.2. Probabilistyczny opis obciążenia ziaren ściernych

Analiza stanu wiedzy o procesach zużycia ściernic pozwala uznać proces szlifowania, w okresie odpowiadającym jednej operacji, jako stacjonarny proces stochastyczny i przedstawić obciążenie ziarna jako sumę składowych (rys. 4.2):

- średniej wartości obciążenia ziarna ściernego $\bar{p}_z = E[P_s(t)]$,
- składnika losowego $X(t)$ o wartości oczekiwanej równej zero.

$$P_z(t) = E[P_s(t)] + X(t), \tag{4.1}$$

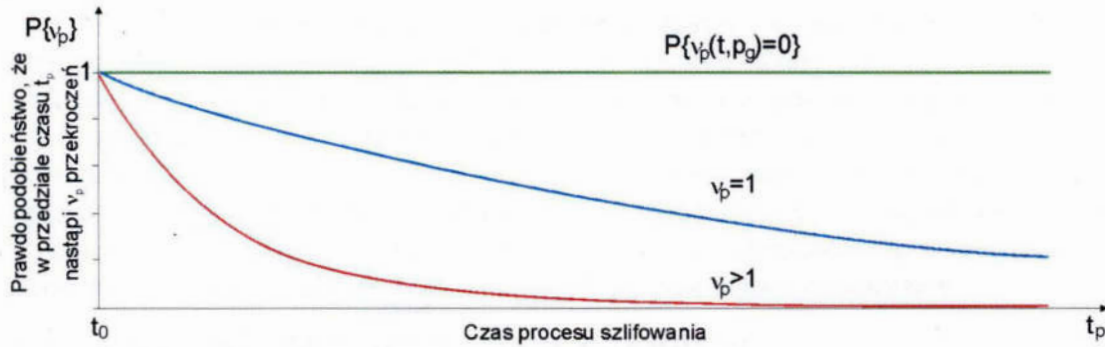


Rys. 4.2. Schemat do analizy obciążenia ziarna z uwzględnieniem poziomu obciążenia granicznego p_g

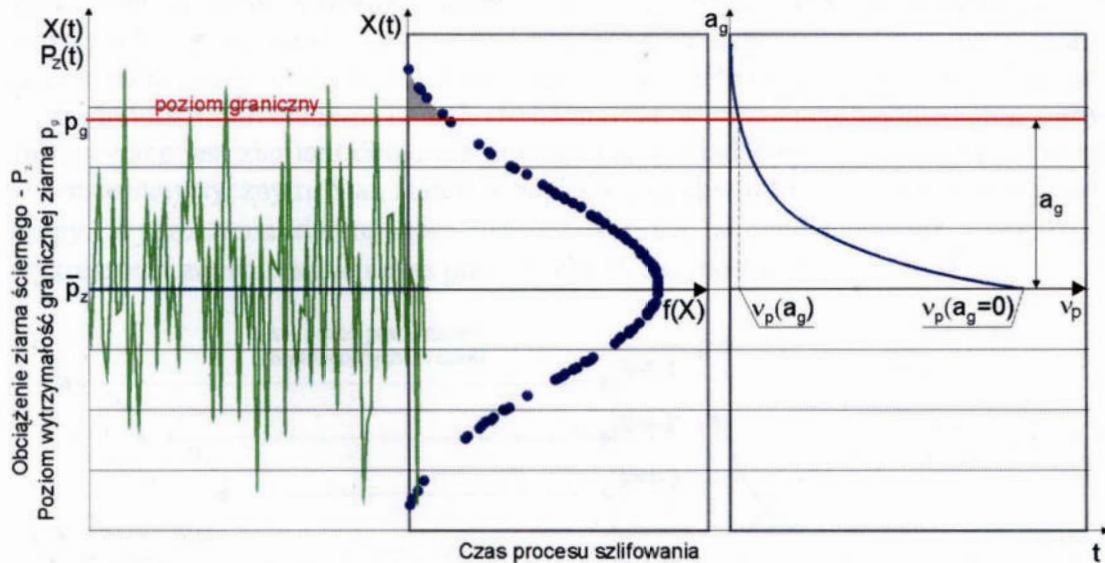
Wyznaczając rozkład prawdopodobieństwa wykruszeń ziarna w wyniku przekraczania pewnego poziomu granicznej wytrzymałości ziarna $p_g = E[P_s(t)] + a$, przez realizację procesu $P_z(t)$ w skończonym przedziale czasu, trzeba określić rozkład liczby przewyższeń poziomu granicznego. Przyjmując, że poziom p_g jest wysoki, a średnia liczba przewyższeń w przedziale czasu jest mała, to kolejne przewyższenia można uznać za niezależne. Liczbę przewyższeń można wtedy opisać stacjonarnym procesem Poissona [35] (rys. 4.3), w którym prawdopodobieństwo, że w przedziale czasu $t_p = t_p - t_0$ nie nastąpi ani jedno przewyższenie poziomu p_g , wynosi:

$$P\{v_p(t_p, p_g) = 0\} = \exp(-t_p v_p), \tag{4.2}$$

v_p – oczekiwana liczba przewyższeń poziomu p_g w jednostce czasu.



Rys. 4.3. *Prawdopodobieństwo, że w przedziale czasu $t_p=t_p-t_0$ nie nastąpi ani jedno przekroczenie poziomu obciążenia granicznego p_g*



Rys. 4.4. *Rozkład średniej liczby przewyższeń v_p poziomu p_g przez normalny proces stacjonarny $X(t)$*

W przypadku, kiedy proces $X(t)$ jest procesem o rozkładzie normalnym (rys. 4.4), to rozkład średniej liczby przewyższeń poziomu obciążenia granicznego p_g przez proces $P_z(t)$ można przedstawić następująco:

$$v_p = E(\bar{p}_z) \cdot \exp\left\{-\frac{a_g^2}{2V(X)}\right\}, \quad a_g = p_g - \bar{p}_z, \quad (4.3)$$

gdzie przez $E(\bar{p}_z)$ oznaczono wartość oczekiwaną przekroczeń poziomu \bar{p}_z w jednostce czasu przez proces $P_z(t)$, a przez $V(X)$ wariancję procesu $X(t)$.

Po założeniu, że rozkład wytrzymałości ziaren na wykruszenie i rozkład ich obciążeń jest normalny, a proces obciążeń ziaren może być traktowany jako proces stacjonarny w szerszym sensie, to rozkład liczby wykruszeń w jednostce czasu przybiera następującą postać:

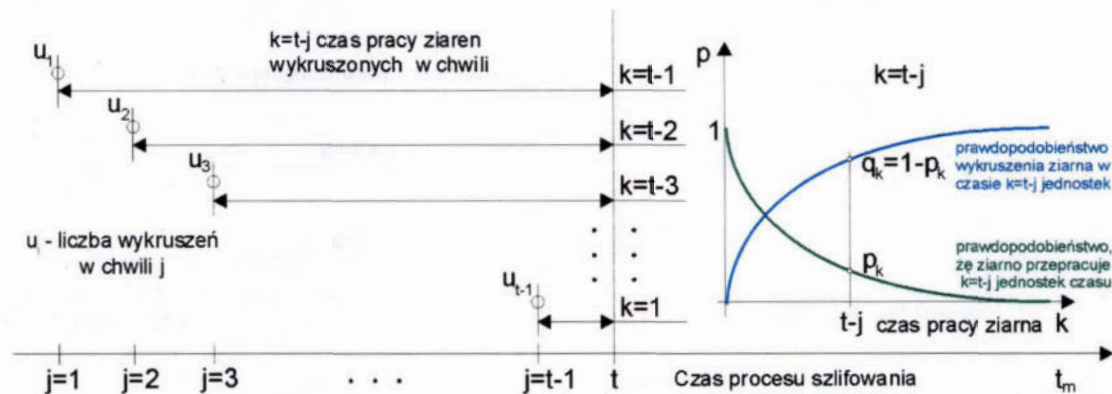
$$v_p(p_g, p_d) = \frac{E(v_p)}{\sqrt{1 + \frac{V(p_d)}{V(X)}}} \cdot \exp\left\{-\frac{(p_d - p_g)^2}{2[V(X) + V(p_d)]}\right\}, \quad (4.4)$$

gdzie p_d jest wytrzymałością doraźną ziarna ściernego na wykruszenie, natomiast $V(p_d)$ jest wariancją wytrzymałości doraźnej ziaren ściernych.

Powyższa analiza dotyczy wykruszenia ziaren, w wyniku przekroczenia wytrzymałości doraźnej ziaren lub mostków spoiwa. Ziarno może jednak ulec wykruszeniu lub pęknięciu w czasie, w którym nie doszło do przekroczenia wytrzymałości doraźnej. Duża kruchość ziaren ściernych i mostków spoiwa powoduje jednak, że ich zużycie wytrzymałościowe następuje częściej wskutek przekroczenia ich wytrzymałości doraźnej niż zmęczeniowej. W przypadku małych wykruszeń, np. w ostrych narożach, nie dochodzi do przekroczenia wytrzymałości doraźnej, ale nie powoduje to też zwykle wykruszenia ziaren ze ściernicy.

4.3. Rozkład czasu pracy ziaren aktywnych

Procesy wykruszeń ziaren powodują zmiany stanu ziaren aktywnych. Zmiennymi cechami są między innymi: czas pracy ziaren i stan starcia naroży ziaren aktywnych, intensywność wykruszeń i liczba ostrzy aktywnych. Czas pracy ziarna jest okresem czasu od chwili, w której ziarno rozpoczęło pracę stykając się okresowo z przedmiotem obrabianym. Ponadto założono, że w momencie wykruszenia ziarno zastępowane jest ziarnem dotąd nie pracującym, posiadającym te same właściwości w sensie statystycznym. Stan ziaren w następującej chwili t można podzielić na dwie grupy. Wykruszenia ziaren, które rozpoczęły pracę w chwilach $j=1,2,\dots,t-1$, czyli wykruszenia ziaren, których czas pracy w chwili t wynosi $k=t-j$ (rys. 4.5).



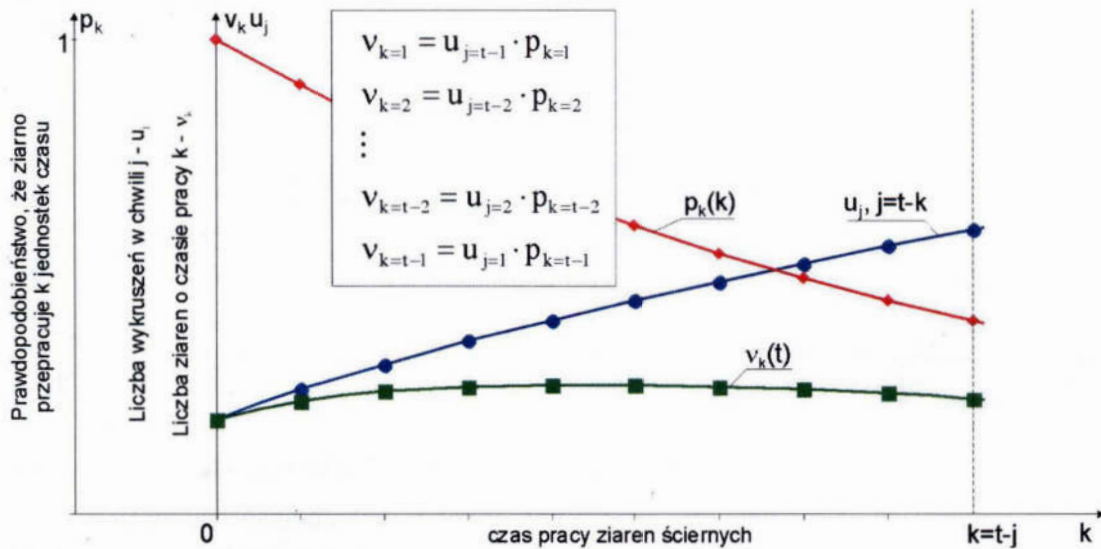
Rys. 4.5. Czas pracy ziaren, które rozpoczęły pracę w kolejnych chwilach $j=1,2,\dots,t-1$

Oczekiwaną liczbę wykruszeń można przedstawić jako:

$$a_t = \sum_{j=1}^{t-1} u_{t-j} \cdot (1 - p_{k=t-j}), \quad (4.5)$$

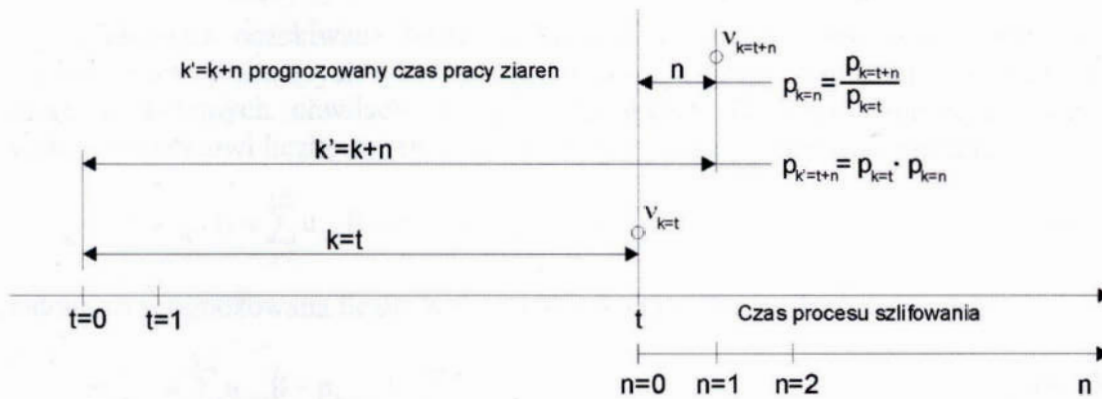
gdzie przez u_j oznaczono oczekiwaną liczbę wykruszeń w chwili j , a przez p_{t-j} prawdopodobieństwo, że ziarno rozpoczynające pracę w chwili j , nie zostanie wykruszone w okresie $j\dots t$, czyli $\Delta t=t-j$. Ze wzoru (4.5) można wyznaczyć liczbę ziaren w grupach o ustalonym czasie pracy w chwili t , wynoszącym odpowiednio $j\dots t$, czyli $\Delta t=t-j$, dla $j=1,2,\dots,t-1$ (rys. 4.6):

$$v_{k=t-j}(t) = u_{t-j} p_{k=t-j}, \quad \text{dla } j=1,2,\dots,t-1, \quad (4.6)$$



Rys. 4.6. Rozkład liczby ziaren, które rozpoczęły pracę w chwilach $j=1,2,\dots,t-1$

Charakterystyczną grupę dla wyznaczenia okresu trwałości ściernicy stanowią ziarna pracujące od chwili początkowej, których czas pracy wynosi $t+n$; $n=0,1,2,3,\dots$, czyli ziarna które przepracują jeszcze n jednostek czasu (rys. 4.7).



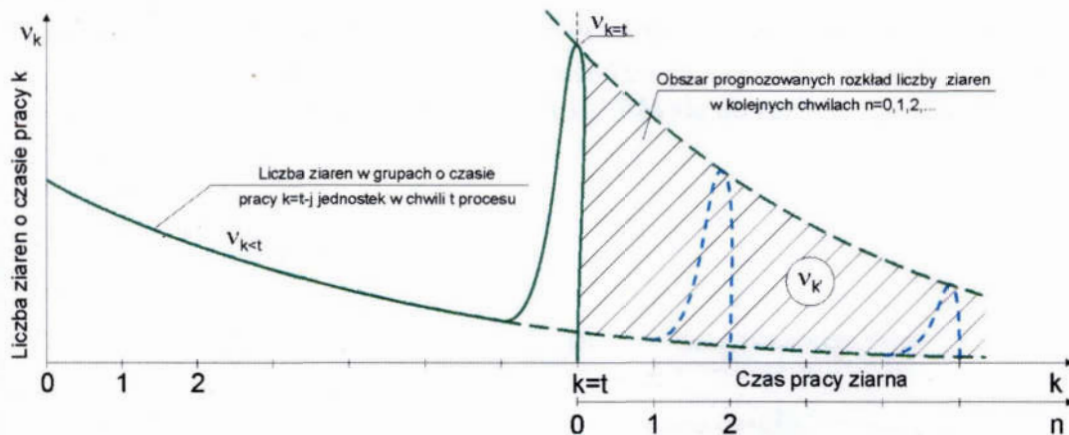
Rys. 4.7. Prognozowany czas pracy ziaren, które pracują od chwili początkowej

Liczba ziaren w przyszłości ($t+n$) w grupach o ustalonym czasie pracy k większym od t zależy od rozkładu liczebności grupy ziaren, które przepracowały t jednostek czasu. Jeżeli przez p_t oznaczymy prawdopodobieństwo, że czas pracy ziarna przekroczy t jednostek, wtedy prawdopodobieństwo warunkowe, że ziarno nie ulegnie wykruszeniu po czasie pracy $t+n$ jednostek czasu wynosi p_{t+n}/p_t .

Liczba ziaren pracujących od chwili początkowej, czyli ziaren, których czas pracy wynosi $t+n$; jednostek czasu, dla $n=0,1,2,3,\dots$ wynosi:

$$v_{k=t+n} = v_{k=t} \cdot \frac{p_{k=t+n}}{p_{k=t}}, \quad \text{dla } n = 0,1,2,\dots, \quad p_{k=t+n} < p_{k=t}, \quad (4.7)$$

Na rysunku 4.8 przedstawiono prognozowany rozkład liczby ziaren w kolejnych chwilach $n=0,1,2,\dots$



Rys. 4.8. Prognozowany rozkład liczby ziaren w kolejnych chwilach $n=0,1,2,\dots$

Natomiast oczekiwana liczba wykruszeń w chwili t w grupie ziaren pracujących od chwili początkowej wynosi:

$$b_t = v_{k=t} \cdot (1 - p_{k=t}), \quad (4.8)$$

gdzie v_k oznacza liczbę ziaren o czasie pracy wynoszącym $k=t$ jednostek, $p_{k=t}$ określa prawdopodobieństwo, że czas pracy ziarna przekroczy t jednostek.

Całkowita oczekiwana liczba wykruszeń w chwili t jest sumą wykruszeń z grupy ziaren pracujących od chwili początkowej i grupy ziaren, które rozpoczęły pracę w kolejnych chwilach procesu szlifowania. Ponadto sumaryczna liczba wykruszeń stanowi liczbę ziaren o czasie pracy wynoszącym zero jednostek.

$$u_t = v_{k=0}(t) = \sum_{j=1}^{t-1} u_{t=j} (1 - p_{k=t-j}) + v_{k=t} (1 - p_{k=t}), \quad (4.9)$$

natomiast prognozowana liczba wykruszeń w kolejnych chwilach n wynosi:

$$u_{t=t+n} = \sum_{j=1}^{t-1} u_{t=j} (1 - p_{k=t-j}) + \sum_{i=0}^n v_{k=t} \left(1 - \frac{p_{k=t+n}}{p_{k=t}} \right), \quad (4.10)$$

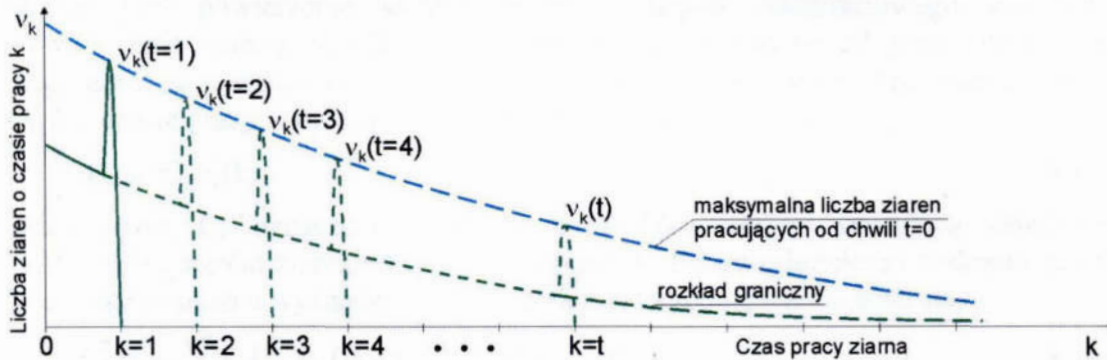
Wyznaczając rozkład liczby ziaren w grupach o określonym czasie pracy $k \leq t$ założono, że w momencie rozpoczęcia procesu szlifowania czas pracy wszystkich ziaren na powierzchni czynnej ściernicy wynosi zero, a ich liczba określona jest przez $v_0(t_0) = v_{k=0}(t=0)$, ponadto całkowity czas procesu wynosi t jednostek. Wówczas rozkład czasu pracy ziaren i ich liczebność w grupach o ustalonym czasie pracy określona jest następująco:

$$v_k(t) = \begin{cases} u_t & , \text{dla } k = 0 \\ u_{t-k} \cdot p_k & , \text{dla } k = 1, 2, \dots, t-1 \\ v_0(t_0) - \sum_{i=1}^{t-1} v_i(t) & , \text{dla } k = t \\ 0 & , \text{dla } k > t \end{cases}, \quad (4.11)$$

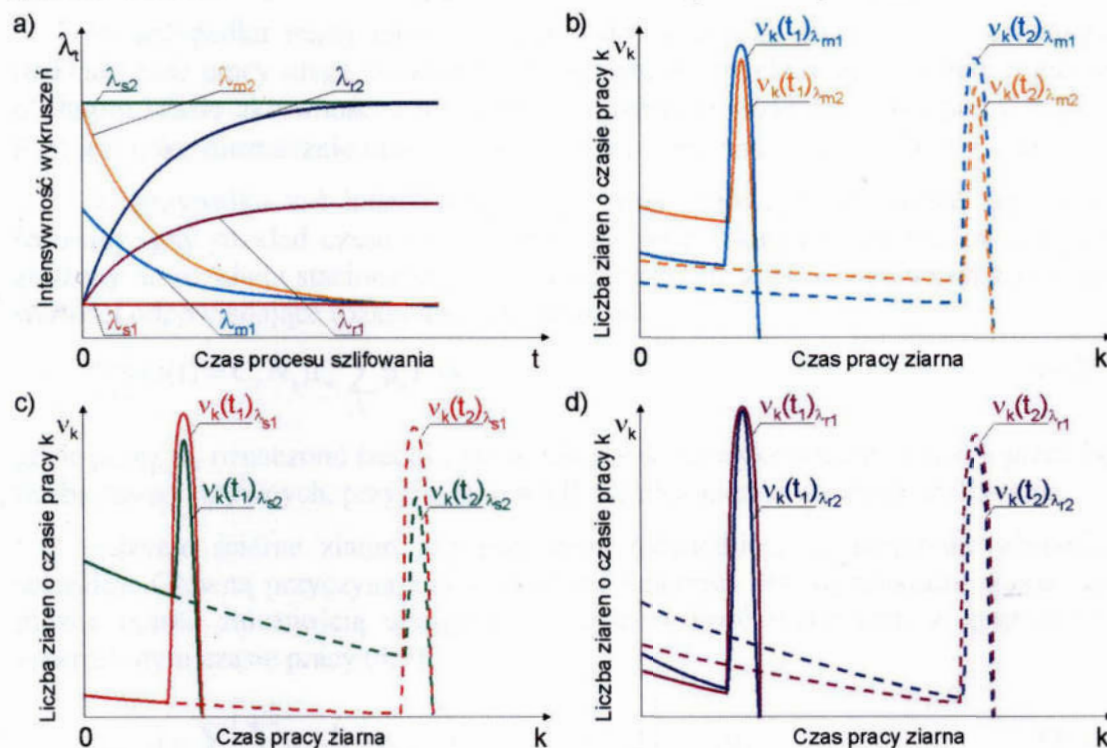
$$u_t = v_{k=0}(t) = \sum_{i=1}^t v_{k=i} (1 - p_{k=i}), \quad (4.12)$$

Wykruszenia ziaren, zachodzące niekoniecznie ze stałą intensywnością, powodują że rozkład czasu pracy ziaren aktywnych jest zmienny w czasie procesu

szlifowania. Jeżeli prawdopodobieństwo wykruszenia ziarna nie zależy od czasu pracy ziarna k , to następuje dość szybka stabilizacja rozkładu czasu pracy $v_k(t)$ – rozkład czasu pracy ziaren aktywnych szybko zbliża się do rozkładu granicznego.



Rys. 4.9. Rozkład liczby ziaren w kolejnych chwilach t – czasu procesu szlifowania.



Rys. 4.10. Zmiana rozkładów czasu pracy ziaren aktywnych podczas procesu szlifowania:
 a) przykładowe funkcje intensywności wykruszeń, b) rozkład dla warunków malejącej intensywności wykruszeń, c) rozkład w warunkach intensywności niezmiennej w czasie, d) rozkład w warunkach intensywności rosnącej z upływem czasu pracy narzędzia

Na rysunku 4.9 przedstawiono rozkład liczby ziaren w kolejnych chwilach t – czasu procesu szlifowania, natomiast rysunek 4.10 przedstawia rozkłady czasu pracy ziaren w zmiennych warunkach procesu szlifowania, wyznaczonych odpowiednio dla różnych zmian intensywności wykruszeń. Im mniejsza jest intensywność zużycia wytrzymałościowego ziaren, tym mniejsze są zmiany rozkładu czasu ich pracy i tym wolniej rozkład czasu pracy zmierza do rozkładu granicznego.

4.4. Sumaryczna powierzchnia starcia i zużycie objętościowe

Znając rozkład czasu pracy ziaren aktywnych możliwe jest wyznaczenie sumarycznej powierzchni starcia ziaren i zużycia objętościowego ściernicy. Powierzchnia starcia określonego ziarna aktywnego zależy od jego obciążenia, odporności na ścieranie i czasu pracy. Można przyjąć, że powierzchnia starcia ziarna $F_k(t)$ o czasie pracy wynoszącym k jednostek w chwili t wynosi:

$$F_k(t) = C_z f_z(k), \quad (4.13)$$

gdzie przez C_z oznaczono stałą, a przez $f_z(k)$ funkcję opisującą zależność powierzchni starcia ziarna od czasu jego pracy k . Po uwzględnieniu rozkładu czasu pracy ziaren można wyznaczyć sumaryczną powierzchnię starcia ściernicy:

$$F_s(t) = \sum_k F_k(t) v_k(t) = C_z \sum_k f_z(k) v_k(t), \quad (4.14)$$

W przypadku małej intensywności wykruszeń czas pracy ziaren jest długi, rozkład czasu pracy ulega zmianom polegającym na zwiększeniu liczebności ziaren o długim czasie aktywności i nie następuje ustalenie rozkładu czasu pracy ziaren. $F_s(t)$ jest tylko nieznacznie mniejsza od wartości wyrażenia $F_s(t) = C_z \sum_k f_z(k) v_{k=t}(t)$.

W przypadku zaś intensywnego wytrzymałościowego zużywania się ziaren ściernicy, gdy rozkład czasu pracy ziaren już po krótkim okresie szlifowania jest zbliżony do rozkładu stacjonarnego, sumaryczna powierzchnia starcia szybko osiąga wartości odpowiadające rozkładowi granicznemu:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F_s(t) = C_z N_a \mu_w^{-1} \sum_k p_k f_z(k), \quad (4.15)$$

gdzie przez μ_w oznaczono średni czas oczekiwania na wykruszenie ziarna, a przez N_a liczbę ziaren aktywnych, przyjętą jako wielkość niezmienną w czasie szlifowania.

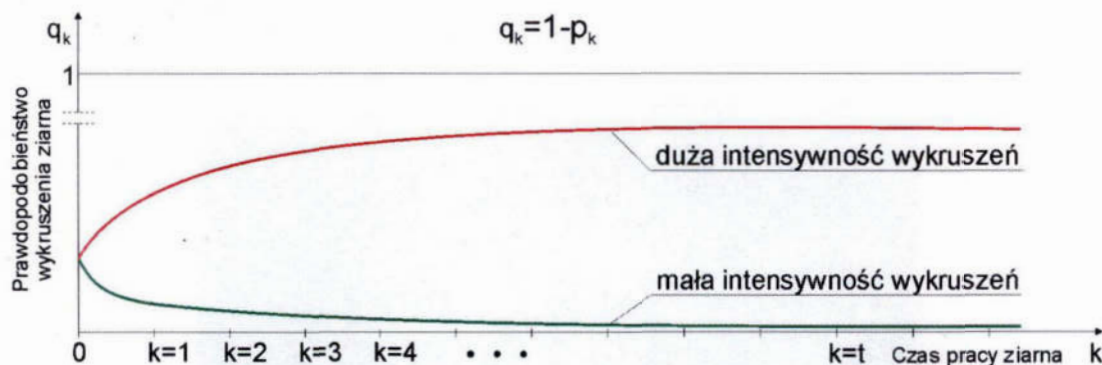
Zużycie ściernicy jest przyczyną niewielkiego zmniejszenia objętości ściernicy. Główną przyczyną zmian objętości ściernicy jest wykruszanie ziaren, co można opisać zależnością ujmującą sumaryczną ilość wykruszeń z grup ziaren o określonym czasie pracy (4.9).

$$u_n(t) = \sum_t \left[\sum_{j=1}^{t-1} u_{t-j} (1 - p_{k=t-j}) + v_{k=t} (1 - p_{k=t}) \right] = \sum_t u_t, \quad (4.16)$$

Po oznaczeniu przez \bar{V}_z średniej objętości wykruszonego ziarna, a przez $V_z^{(1)}$ ziarnistości ściernicy, zmniejszenie objętości ściernicy w wyniku wykruszeń ziaren i spoiwa wynosi:

$$\Delta V = \frac{\bar{V}_z}{V_z^{(1)}} u_n(t) = \frac{\bar{V}_z}{V_z^{(1)}} \sum_t \sum_k v_k (1 - p_k), \quad (4.17)$$

Na rysunku 4.11 przedstawiono prawdopodobieństwo wykruszenia ziaren w zależności od ich sumarycznego czasu aktywności dla warunków dużej i małej intensywności wykruszeń ziaren ze ściernicy w procesie szlifowania.



Rys. 4.11. Prawdopodobieństwo wykruszenia ziarna w zależności od sumarycznego czasu aktywności

Powyższa analiza ogranicza się do wyznaczenia zależności ogólnych, nie określając dokładnego wpływu czasu pracy ziarna na prawdopodobieństwo jego wykruszenia. Ze względu na specyfikę pracy narzędzi ściernych wyznaczony model zużycia ściernicy został podzielony odmiany, zależne od warunków procesu szlifowania. Model zużycia ściernicy rozgraniczono na przypadki pracy ściernicy, zależne od intensywności wykruszeń ziaren ściernych.

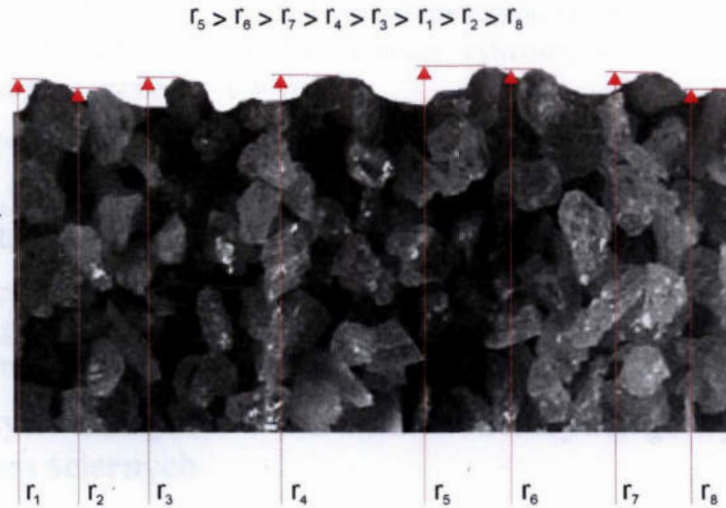
4.5. Model zużycia ściernicy

Opracowany model może służyć do symulacji procesu zużycia narzędzi ściernych. Możliwe jest generowanie losowych intensywności wykruszeń dla każdej z grup ziaren o ustalonym czasie pracy. Mogą one spełniać odpowiednie warunki dotyczące prawdopodobieństwa wykruszenia w zależności od poziomu i rozkładu obciążenia ziaren oraz rozkładu wytrzymałości ziaren na określony typ obciążenia.

Praktyczne znaczenie przedstawionego modelu polega na tym, że posługiwanie się nim z wykorzystaniem niektórych danych empirycznych pozwala wyznaczyć wartości innych wielkości, których doświadczalne wyznaczenie jest bardzo trudne i pracochłonne. Mierząc np. ubytki masy ściernicy po upływie określonego czasu szlifowania można obliczyć średnie ilości ziaren wykruszonych, następnie intensywności wykruszeń a dalej rozkład czasu pracy ziaren aktywnych i sumaryczną powierzchnię starcia ściernicy. Można zatem wyznaczyć te cechy, które pozwalają lepiej poznać i opisać stany chwilowe oraz ich zmiany z upływem czasu pracy narzędzia.

4.5.1. Zużycie narzędzia w warunkach małej intensywności wykruszeń ziaren ściernych

Poddając analizie czynną powierzchnię ściernicy po operacji obciążania należy zauważyć, że składowa harmoniczna zarysu o częstotliwości odpowiadającej wartości posuwu obciążania posiada dużą energię, dzięki dużej wariancji wierzchołków ostrzy skrawających. Na powierzchni czynnej więc, znajduje się określona liczba ostrzy, których promienie toru skrawania są wyraźnie większe od średniego (rys. 4.12). Obciążenie mechaniczne i cieplne dla tych ziaren będzie większe, niż dla ziaren pozostałych. Na powierzchni czynnej ściernicy znajduje się również określona ilość ziaren, których wiązania spoiwa zostały naruszone podczas obciążania. Należy spodziewać się więc zwiększonej liczby wykruszeń w początkowej fazie pracy ściernicy.



Rys. 4.12. Promienie działania ostrzy aktywnych

W przypadku warunków pracy z postępującym tępieniem ziaren, liczba ziaren, które ulegną wykruszeniu w początkowym okresie pracy jest mała w stosunku do całkowitej liczby ziaren aktywnych. Można więc przyjąć, że wykruszenie ziaren zachodzi prawie niezależnie od stanu ziaren, czyli w przybliżeniu jest potokiem zdarzeń niezależnych. Oznacza to, że jeżeli do chwili t_1 nie nastąpiło wykruszenie ziarna, to w nowej chwili t_2 stan ziarna jest niezmienny i jego wykruszenie w czasie $t_s = t_2 - t_1$ nastąpi prawdopodobieństwem zależnym od długości rozpatrywanego czasu pracy ściernicy $P(t_s)$, a nie czasu pracy rozpatrywanego ziarna ściernego. Czas oczekiwania na wykruszenie ziarna k_u ma rozkład geometryczny (rys. 4.13), gdzie prawdopodobieństwo wystąpienia wykruszenia ziarna w wyniku przekroczenia poziomu obciążenia granicznego p_g w przedziale czasu od 0 do t wynosi $P(t, p_g)$.

$$P\{k_u > t\} = 1 - P(t, p_g), \quad (4.18)$$

Dla procesów stacjonarnych, dla rozkładu opisanego rozkładem Poissona,

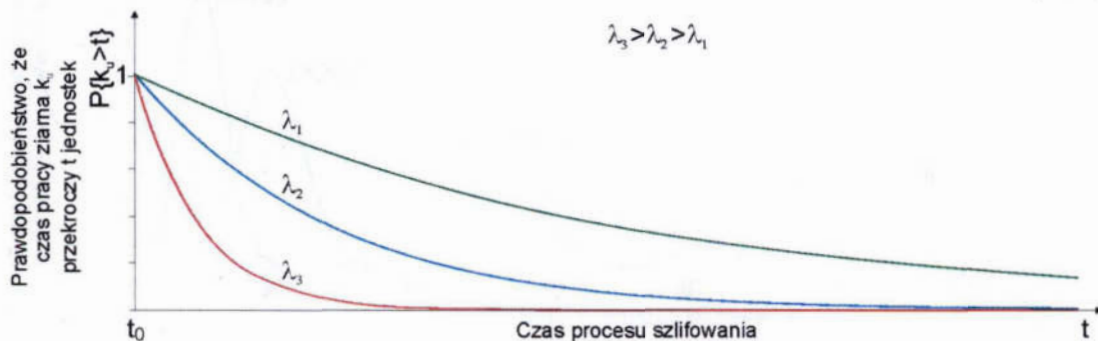
$$P(t, p_g) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (4.19)$$

gdzie λ oznacza oczekiwaną liczbę wykruszeń w czasie t . Funkcję gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia wykruszenia wyrażono następująco:

$$f(t, p_g) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t), \quad (4.20)$$

natomiast wartość oczekiwana oraz odchylenie standardowe czasu wystąpienia wykruszenia ziarna wynoszą:

$$E(k_u) = S(k_u) = \lambda^{-1}, \quad (4.21)$$



Rys. 4.13. Rozkład czasu k_u oczekiwania na wykruszenie ziarna

Podczas pracy ściernicy w warunkach postępującego tępienia ziaren można przyjąć, że ze ściernicy w okresie jej trwałości wykruszy się λ_0 ziaren. Oczekiwana liczba wykruszeń w czasie $t=t-t_0$ wynosi:

$$E[\xi_w(t)] = \lambda_0 P(t, p_g) = \lambda_0 [1 - \exp(-\lambda t)], \quad (4.22)$$

gdzie $P(t, p_g)$ oznacza prawdopodobieństwo wykruszenia każdego z λ_0 ziaren w okresie jej trwałości ściernicy.

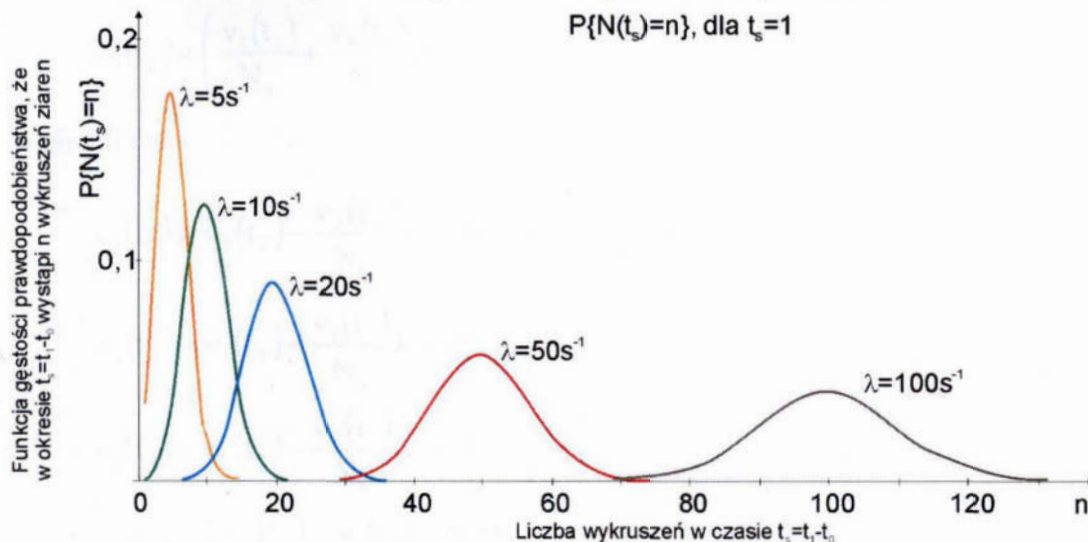
Model powyższy dobrze opisuje zużycie ściernic o dużej twardości podczas wygladzającego szlifowania kształtowego oraz zużycie ściernic ze spoiwami zapewniającymi znaczne siły wiązania ziarna na powierzchni czynnej ściernicy.

4.5.2. Zużycie narzędzia w warunkach intensywnego wykruszania ziaren ściernych

W warunkach pracy ściernicy charakteryzujących się znaczną intensywnością samoostrzenia, będącego przyczyną zużycia kształtowego narzędzia, wykruszenia ziaren z powierzchni ściernicy mogą być traktowane jako proces stacjonarny i bez następstw. Można założyć, że rozkład liczby wykruszeń w czasie od t_0 do t_1 nie zależy od rozkładu liczby wykruszeń do chwili t_0 , ponieważ czas pojedynczego obciążenia ziarna jest mały, a ilość ziaren równocześnie obciążonych jest bardzo mała w porównaniu do całkowitej liczby ziaren aktywnych. Czas, w jakim ziarno styka się z przedmiotem obrabianym k_0 , jest bardzo krótki w stosunku do czasu jednego obrotu ściernicy. Analizując wykruszenie ziarna w chwili t można przyjąć, że nie będzie ono wpływać na tę część powierzchni czynnej ściernicy, która stykać się będzie z przedmiotem obrabianym w chwili $t+\Delta t$, o ile spełniony zostanie warunek $\Delta t > k_0$. Występowanie kolejnych wykruszeń można więc uznać za zjawiska niezależne, a strumień wykruszeń za strumień poissonowski. Prawdopodobieństwo, że w okresie $t_s=t_1-t_0$ nastąpi n wykruszeń wynosi:

$$P\{N(t_s) = n\} = \frac{(\lambda t_s)^n}{n!} \exp(-\lambda t_s), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (4.23)$$

Wykres zależności $P\{N(t_s)=n\}=f(n)$ dla okresu czasu $t_s=1$, dla różnych wartości λ oczekiwanej liczby wykruszeń przedstawiony został na rysunku 4.14.



Rys. 4.14. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa, że w okresie $t_s=t_1-t_0$ wystąpi n wykruszeń ziaren

Modele czasu pracy ziaren aktywnych oraz sumarycznej powierzchni starcia ściernicy w warunkach intensywnego samoostrzenia opracowane zostały z uwzględnieniem następujących założeń:

- liczba ziaren aktywnych jest niezmienna w czasie procesu obróbki,
- średnie grubości warstw skrawanych poszczególnymi ostrzami aktywnymi są jednakowe na całej szerokości strefy szlifowania – czyli średnie wartości obciążeń przypadające na ziarna aktywne są jednakowe wzdłuż tworzącej ściernicy, co odpowiada przypadkom, gdy szerokość strefy szlifowania jest równa szerokości powierzchni szlifowanej lub wysokości ściernicy, np. w szlifowaniu wgłębnym,
- liczba wykruszeń w grupie ziaren o określonym sumarycznym czasie pracy jest wprost proporcjonalna do liczby ziaren w tej grupie i nie zależy od ich czasu pracy,
- średni czas pracy ziarna do chwili wykruszenia jest bardzo krótki w porównaniu do okresu trwałości ściernicy.

Założono, że w chwili $t=0$ wszystkie ziarna są nowe, czyli ściernica była kształtowana przez usunięcie zewnętrznej warstwy ziaren,

$$v_0(t_0) = v_{k=0}(t_{t=0}) = N_a, \quad (4.24)$$

gdzie liczba ziaren aktywnych wynosi N_a , a ich czas pracy wynosi $k=0$. Po oznaczeniu przez λ oczekiwanej liczby wykruszeń w czasie $t=t_1-t_0$, w chwili $t=1$ można wyróżnić dwie grupy ziaren: o czasie pracy wynoszącym $k=1$ i grupę ziaren nowych – odsłoniętych w wyniku wykruszeń ziaren w czasie $t=t_1-t_0$.

$$\begin{aligned} v_1(t_1) &= N_a - \lambda \\ v_0(t_1) &= \lambda \end{aligned}, \quad (4.25)$$

w chwili $t=2$

$$\begin{aligned} v_2(t_2) &= v_1(t_1) - \frac{v_1(t_1)}{N_a} \lambda = (N_a - \lambda) \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right) \\ v_1(t_2) &= v_0(t_1) - \frac{v_0(t_1)}{N_a} \lambda = \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right) \\ v_0(t_2) &= \left(\frac{v_1(t_1)}{N_a} + \frac{v_0(t_1)}{N_a}\right) \lambda = \lambda \end{aligned}, \quad (4.26)$$

w chwili $t=3$

$$\begin{aligned} v_3(t_3) &= v_2(t_2) - \frac{v_2(t_2)}{N_a} \lambda = (N_a - \lambda) \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right)^2 \\ v_2(t_3) &= v_1(t_2) - \frac{v_1(t_2)}{N_a} \lambda = \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right)^2 \\ v_1(t_3) &= v_0(t_2) - \frac{v_0(t_2)}{N_a} \lambda = \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right) \\ v_0(t_3) &= \left(\frac{v_2(t_2)}{N_a} + \frac{v_1(t_2)}{N_a} + \frac{v_0(t_2)}{N_a}\right) \lambda = \lambda \end{aligned}, \quad (4.27)$$

Obliczony, po czasie t_m procesu szlifowania, rozkład liczebności ziaren w grupach o określonym czasie pracy wynosi:

$$\begin{aligned}
 v_m(t_m) &= (N_a - \lambda) \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right)^{m-1} \\
 v_{m-1}(t_m) &= \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right)^{m-1} \\
 &\vdots \\
 v_2(t_m) &= \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right)^2 \\
 v_1(t_m) &= \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right) \\
 v_0(t_m) &= \lambda
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Rozkład liczby ziaren aktywnych o czasie pracy wynoszącym k jednostek czasu w chwili t_m procesu szlifowania można zapisać następująco:

$$v_k(t_m) = \begin{cases} (N_a - \lambda) \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right)^{m-1} & , \text{ dla } k = m \\ \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right)^k & , \text{ dla } k = 0, 1, \dots, m-1 \end{cases} \tag{4.29}$$

Oczekiwana sumaryczna powierzchnia starcia na wszystkich ziarnach zależy od liczby ziaren aktywnych N_a , funkcji opisującej zależność powierzchni starcia od czasu pracy ziarna $f(k)$ i oczekiwanej liczby wykruszeń w jednostce czasu λ .

$$\begin{aligned}
 F_s(t_m) &= N_a \bar{F}_0 + C_z f_z(k)_{k=m} (N_a - \lambda) \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right)^{m-1} + \\
 &+ C_z \lambda \sum_{k=1}^{m-1} f_z(k) \left(1 - \frac{\lambda}{N_a}\right)^k
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Oczekiwana objętość wykruszonych ziaren od chwili początkowej $t=0$ do chwili t_m zależy od średniej objętości wykruszonego ziarna \bar{V}_z , oczekiwanej liczby wykruszeń λ i czasu procesu t_m .

$$V_{zw}(t_m) = \sum_{i=1}^{\lambda t_m} V_{zi} = \bar{V}_z \lambda t_m \tag{4.31}$$

Zmniejszenie objętości ściernicy w wyniku wykruszeń ziaren i spoiwa wynosi:

$$\Delta V_s(t_m) = \frac{V_{zw}}{V_z^{(1)}} = \frac{\bar{V}_z \lambda t_m}{V_z^{(1)}} \tag{4.32}$$

gdzie $V_z^{(1)}$ oznacza ziarnistość ściernicy.

4.5.3. Zużycie narzędzia dla zmiennej intensywności wykruszeń w czasie szlifowania

Zależności wprowadzone dla modelu zużycia ściernicy w warunkach pracy dla zmiennej intensywności wykruszeń są analogiczne do zależności dla warunków pracy o intensywności wykruszeń stałej w czasie procesu szlifowania, a różnią się tym, że zamiast stałej intensywności wykruszeń λ wprowadzono zmienną w czasie intensywność wykruszeń λ_i .

Założono, że w chwili $t=0$ wszystkie ziarna są nowe, czyli ściernica była kształtowana przez usunięcie zewnętrznej warstwy ziaren

$$v_0(t_0) = v_{k=0}(t_{t=0}) = N_a, \quad (4.33)$$

gdzie liczba ziaren aktywnych wynosi N_a , a ich czas pracy wynosi $k=0$. Po oznaczeniu przez λ_1 oczekiwanej liczby wykruszeń w czasie $t=t_1-t_0$, w chwili $t=1$ można wyróżnić dwie grupy ziaren:

$$\begin{aligned} v_1(t_1) &= N_a - \lambda_1 \\ v_0(t_1) &= \lambda_1 \end{aligned}, \quad (4.34)$$

w chwili $t=2$

$$\begin{aligned} v_2(t_2) &= v_1(t_1) - \frac{v_1(t_1)}{N_a} \lambda_2 = (N_a - \lambda_1) \left(1 - \frac{\lambda_2}{N_a}\right) \\ v_1(t_2) &= v_0(t_1) - \frac{v_0(t_1)}{N_a} \lambda_2 = \lambda_1 \left(1 - \frac{\lambda_2}{N_a}\right), \\ v_0(t_2) &= \lambda_2 \end{aligned}, \quad (4.35)$$

w chwili $t=3$

$$\begin{aligned} v_3(t_3) &= v_2(t_2) - \frac{v_2(t_2)}{N_a} \lambda_3 = (N_a - \lambda_1) \left(1 - \frac{\lambda_2}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_3}{N_a}\right) \\ v_2(t_3) &= v_1(t_2) - \frac{v_1(t_2)}{N_a} \lambda_3 = \lambda_1 \left(1 - \frac{\lambda_2}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_3}{N_a}\right), \\ v_1(t_3) &= v_0(t_2) - \frac{v_0(t_2)}{N_a} \lambda_3 = \lambda_2 \left(1 - \frac{\lambda_3}{N_a}\right) \\ v_0(t_3) &= \lambda_3 \end{aligned}, \quad (4.36)$$

w chwili $t=4$

$$\begin{aligned}
 v_4(t_4) &= v_3(t_3) - \frac{v_3(t_3)}{N_a} \lambda_4 = (N_a - \lambda_1) \left(1 - \frac{\lambda_2}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_3}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_4}{N_a}\right) \\
 v_3(t_4) &= v_2(t_3) - \frac{v_2(t_3)}{N_a} \lambda_4 = \lambda_1 \left(1 - \frac{\lambda_2}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_3}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_4}{N_a}\right) \\
 v_2(t_4) &= v_1(t_3) - \frac{v_1(t_3)}{N_a} \lambda_4 = \lambda_2 \left(1 - \frac{\lambda_3}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_4}{N_a}\right) \\
 v_1(t_4) &= v_0(t_3) - \frac{v_0(t_3)}{N_a} \lambda_4 = \lambda_3 \left(1 - \frac{\lambda_4}{N_a}\right) \\
 v_0(t_4) &= \lambda_4
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

Po obliczeniach, w chwili t_m procesu szlifowania, rozkład liczebności ziaren w grupach o określonym czasie pracy wynosi:

$$\begin{aligned}
 v_m(t_m) &= (N_a - \lambda_1) \left(1 - \frac{\lambda_2}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_3}{N_a}\right) \dots \left(1 - \frac{\lambda_m}{N_a}\right) \\
 v_{m-1}(t_m) &= \lambda_1 \left(1 - \frac{\lambda_2}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_3}{N_a}\right) \dots \left(1 - \frac{\lambda_m}{N_a}\right) \\
 &\vdots \\
 v_2(t_m) &= \lambda_{m-2} \left(1 - \frac{\lambda_{m-1}}{N_a}\right) \left(1 - \frac{\lambda_m}{N_a}\right) \\
 v_1(t_m) &= \lambda_{m-1} \left(1 - \frac{\lambda_m}{N_a}\right) \\
 v_0(t_m) &= \lambda_m
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

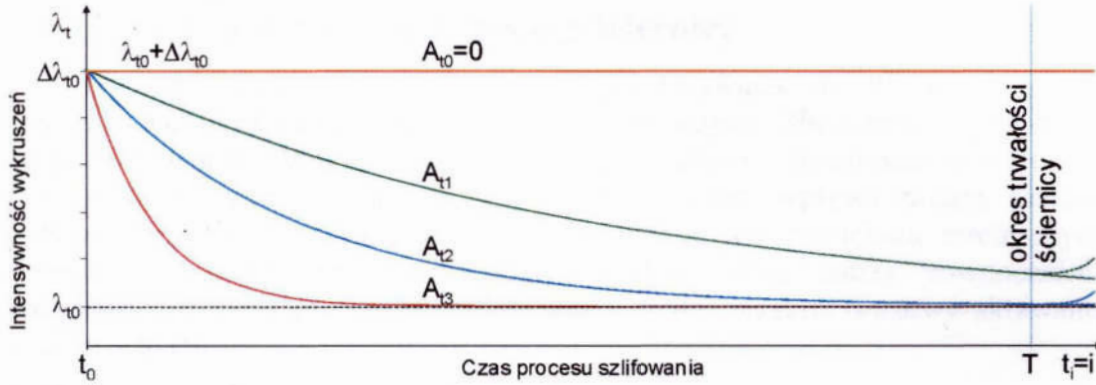
Rozkład liczby ziaren aktywnych o czasie pracy wynoszącym k jednostek czasu w chwili t_m procesu szlifowania można zapisać następująco:

$$v_k(t_m) = \begin{cases} (N_a - \lambda_1) \prod_{i=2}^m \left(1 - \frac{\lambda_i}{N_a}\right) & , \text{ dla } k = m \\ \lambda_{m-k} \prod_{i=m-k+1}^m \left(1 - \frac{\lambda_i}{N_a}\right) & , \text{ dla } k = 0, 1, \dots, m-1 \end{cases} \tag{4.39}$$

Funkcja intensywności wykruszeń $\lambda_i = f(t, k)$ jest najczęściej nieznaną i należy ją określić, uwzględniając warunki pracy ściernicy. Z analizy probabilistycznego modelu obciążenia ziarna wnioskuje się, że dla najczęściej spotykanych warunków procesu szlifowania z zachowaniem wymaganej trwałości kształtu i wymiarów ściernicy (ograniczone samoostrzenie), można się posługiwać modelem intensywności wykruszeń (rys. 4.15):

$$\lambda_i = \lambda_{t_0} + \Delta \lambda_{t_0} \exp[-A_t(i-1)], \tag{4.40}$$

gdzie λ_{t_0} jest graniczną intensywnością wykruszeń, dla $t \rightarrow \infty$, a $\lambda_{t_0} + \Delta \lambda_{t_0}$ jest intensywnością wykruszeń w chwili początkowej.

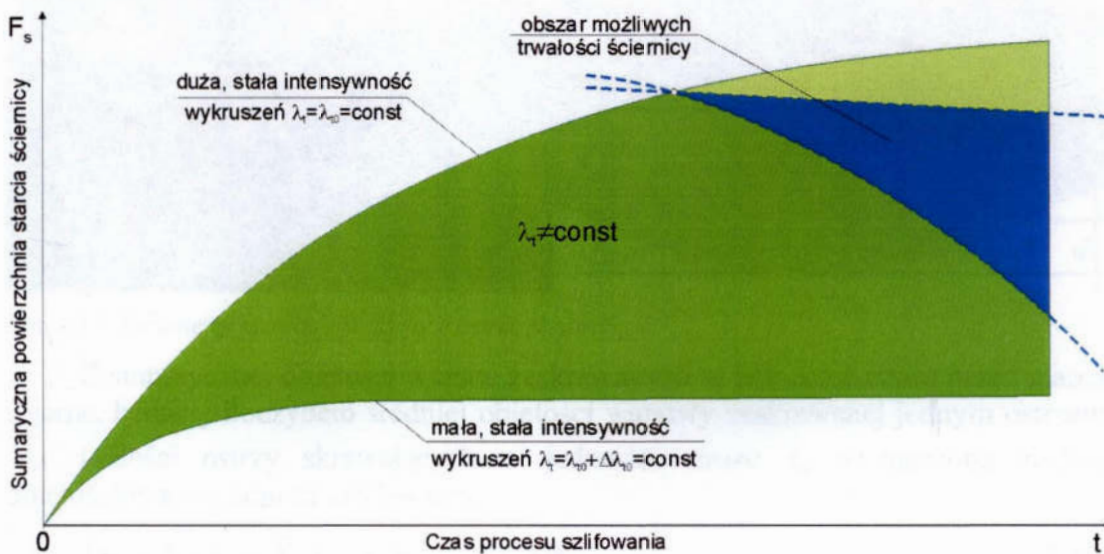


Rys. 4.15. Model malejącej intensywności wykruszeń z upływem czasu szlifowania

Wartość stałej A_t zależy od twardości ściernicy i średniego obciążenia ostrzy aktywnych na czynnej powierzchni ściernicy. Dla ściernic o mniejszej twardości wartość A_t przyjmuje większe wartości. Oznacza to, że wartość oczekiwana liczby wykruszeń w jednostce czasu λ_t będzie duża po rozpoczęciu procesu i będzie się zmniejszać z upływem czasu do wartości granicznej λ_{t_0} . Od średniego obciążenia ziaren aktywnych zależy ilość ziaren wykruszonych w początkowym okresie pracy ściernicy. Dla większych wartości obciążenia średniego wykruszają się szybciej ziarna słabiej utwardzone na powierzchni ściernicy lub ziarna, które w wyniku obciążania znalazły się na wierzchołkach zarysu ściernicy. Wtedy oczekiwana liczba wykruszeń λ_t szybko zmierza do wartości λ_{t_0} . Takiemu przypadkowi odpowiada duża wartość stałej A_t .

Po uwzględnieniu zależności rozkładu czasu pracy ziaren aktywnych w zmiennych warunkach procesu szlifowania i modelu zmiennej intensywności wykruszeń sumaryczna powierzchnia starcia wynosi (rys. 4.16):

$$F_s(t_m) = N_a (F_0)_{sr} + C_z f_z(k)_{k=m} (N_a - \lambda_1) \prod_{i=2}^m \left(1 - \frac{\lambda_i}{N_a}\right) + C_z \sum_{k=1}^{m-1} f_z(k) \lambda_{m-k} \prod_{i=m-k+1}^m \left(1 - \frac{\lambda_i}{N_a}\right) \quad (4.41)$$



Rys. 4.16. Zakres zmian sumarycznej powierzchni starcia ziaren aktywnych dla przyjętego modelu intensywności wykruszeń zmiennego w czasie okresu trwałości narzędzia

4.6. Analiza zużycia kształtowego ściernicy

Trwałość ściernicy oraz intensywność jej zużywania się zależy głównie od mechanicznego i cieplnego obciążenia ziaren aktywnych. Obciążenie to powiększa się ze wzrostem przekrojów warstw skrawanych jednym ostrzem oraz ze wzrostem zużycia ziaren ściernych. Ponadto na obciążenie ziarna wpływa zmiana kształtu powierzchni czynnej ściernicy w wyniku zużycia, co powiększa strefę styku ściernicy z obrabianym przedmiotem, zwiększa ilość ostrzy równocześnie kontaktujących się z przedmiotem i zwiększa średni przekrój warstwy skrawanej jednym ostrzem.

4.6.1. Obciążenie ziaren ściernych

Po oznaczeniu przez \bar{F}_{nz} i \bar{F}_{tz} średnich wartości składowych normalnej i stycznej siły działającej na jedno ostrze aktywne na powierzchni czynnej ściernicy, wartości składowych: normalnej F_n i F_t siły szlifowania wynoszą:

$$F_n = \bar{F}_{nz} Z_c, \quad F_t = \bar{F}_{tz} Z_c, \quad (4.42)$$

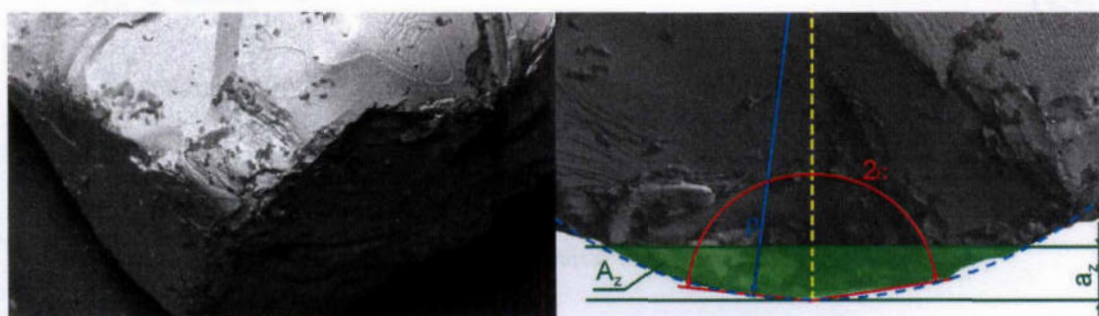
przy czym:

$$\bar{F}_{nz} = \bar{k}_{st}(\cdot) A_z, \quad \bar{F}_{tz} = \mu_s(\cdot) F_{nz}, \quad (4.43)$$

gdzie $\bar{k}_{st}(\cdot)$ oznacza średni właściwy opór skrawania, zależny od cech skrawnych powierzchni czynnej narzędzia, a w tym od: przekroju poprzecznego warstwy skrawanej jednym ostrzem – A_z , promienia zaokrąglenia wierzchołka ostrza – ρ , kąta wierzchołkowego ostrza – 2ε , czasu pracy ziarna oraz właściwości obrabianego materiału, a przez $\mu_s(\cdot)$ oznaczono współczynnik zależny głównie od: właściwości obrabianego materiału i ściernicy oraz prędkości v_s .

Średni przekrój warstwy skrawanej, zależny głównie od średniej grubości warstwy skrawanej i kształtu ostrza (rys. 4.17), wyraża zależności:

$$\bar{A}_z = K(\varepsilon, \rho) (\bar{a}_z)^2 \operatorname{tg} \varepsilon, \quad (4.44)$$



Rys. 4.17. Parametry kształtu określające ostrze skrawające

Z sumarycznej objętości warstw zeskrawanych w jednostce czasu przez ziarna ściernic, będącej iloczynem średniej objętości warstwy zeskrawanej jednym ostrzem \bar{V}_A i ilości ostrzy skrawających w jednostce czasu z_t , wyznaczona została objętościowa wydajność szlifowania:

$$Q_v = \bar{V}_A z_t = \bar{A}_z L_\psi z_F b_t v_s = v_p g p_p, \quad (4.45)$$

Z zależności (4.44, 4.47 i 4.50) wyprowadzona została średnia wartość grubości warstwy skrawanej w przekroju x:

$$\bar{a}_z(x, t) = \sqrt{\frac{v_p}{\sqrt{v_s^2 \pm v_p^2}} \frac{\sqrt{g_x(x, t)}}{\sqrt{D}} \frac{1}{z_F(t)} \frac{1}{K(\varepsilon, \rho) \operatorname{tg} \varepsilon}}, \quad (4.51)$$

gdzie

$$g_x(x, t) = \begin{cases} g - y(x) & , \text{ dla } 0 \leq x \leq p_p \\ y(x - p_p) - y(x) & , \text{ dla } x > p_p \end{cases}, \quad (4.52)$$

Uwzględniając zmienne charakter grubości warstwy skrawanej jednym ostrzem, średni przekrój warstwy skrawanej wynosi:

$$\bar{A}_z = \frac{\bar{V}_a}{L_{\psi x}} = \frac{v_p}{\sqrt{v_s^2 \pm v_p^2}} \frac{\sqrt{g_x(x, t)}}{\sqrt{D}} \frac{1}{z_F(t)}, \quad (4.53)$$

ponadto średnia wartość składowej normalnej siły skrawania przypadającej na jedno ostrze aktywne wynosi:

$$\bar{F}_{nz} = \bar{k}_{st}(\cdot) \frac{v_p}{\sqrt{v_s^2 \pm v_p^2}} \frac{\sqrt{g_x(x, t)}}{\sqrt{D}} \frac{1}{z_F(t)}, \quad (4.54)$$

natomiast ilość ostrzy aktywnych w strefie o szerokości dx, odległej od krawędzi czołowej ściernicy o x, wynosi:

$$z_c = \frac{\sqrt{v_s^2 \pm v_p^2} \sqrt{D} \sqrt{g_x(x, t)}}{v_s} \frac{dx}{\cos \varphi_x(x, t)} z_F(t), \quad (4.55)$$

Po uwzględnieniu wyników badań doświadczalnych [72, 74] średni właściwy opór skrawania, zależny od średniego przekroju warstwy skrawanej, parametrów ostrza, czasu pracy ziarna i właściwości materiału można przedstawić zależnością:

$$\bar{k}_{st}(\cdot) = C_n(\cdot) (\bar{A}_z(x))^{n-1}, \quad (4.56)$$

gdzie $C_n(\cdot)$ jest stałą zależną głównie od kształtu ostrzy, ich zużycia i właściwości materiału, n jest wykładnikiem zależnym od właściwości obrabianego materiału, właściwości ściernicy i parametrów procesu szlifowania, $0,5 < n < 0,8$

Z analizy zależności (4.54 i 4.56) wynika średnia wartość składowej normalnej siły skrawania przypadającej na jedno ostrze aktywne:

$$\bar{F}_{nz} = C_n(\cdot) \frac{v_p^n}{(v_s^2 \pm v_p^2)^{n/2}} \frac{(g_x(x, t))^{n/2}}{D^{n/2}} \frac{1}{(z_F(t))^n}, \quad (4.57)$$

natomiast całkowita wartość siły stycznej wynosi:

$$F_n = C_n(\cdot) \frac{(v_s^2 \pm v_p^2)^{\frac{n+1}{2}} v_p^n}{v_s} D^{\frac{1-n}{2}} (z_F(t))^{1-n} \int_0^b \frac{(g_x(x, t))^{\frac{n+1}{2}}}{\cos \varphi_x(x, t)} dx, \quad (4.58)$$

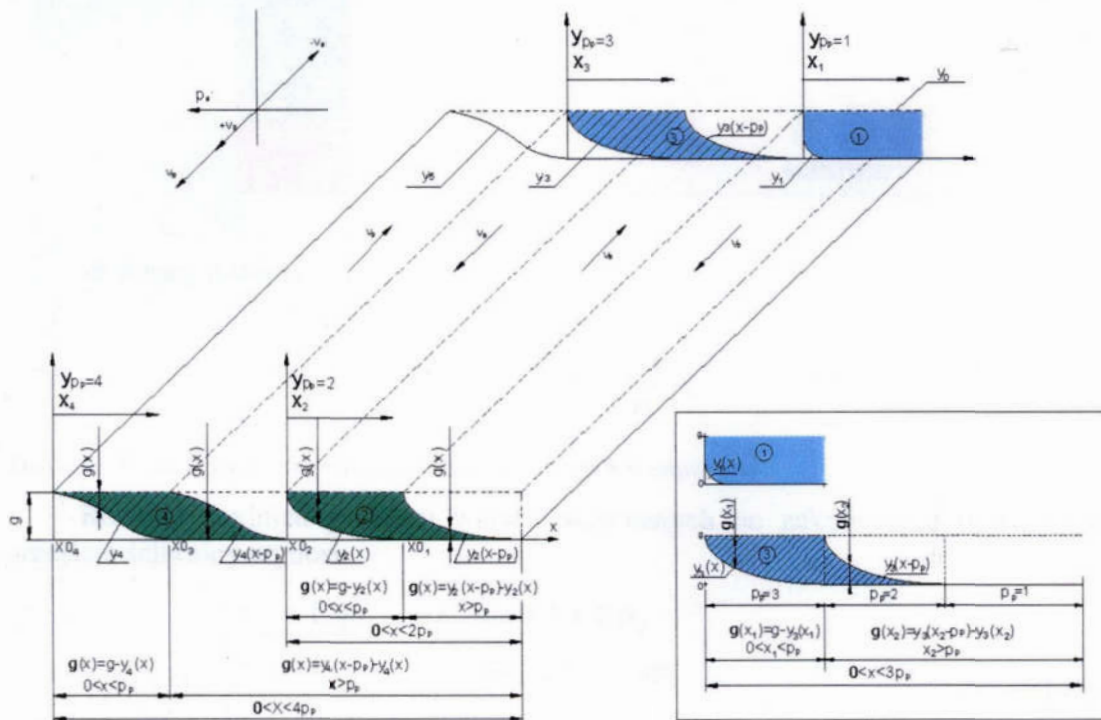
W czasie procesu szlifowania, składowe siły zależą od kształtu tworzącej zarysu ściernicy, przedstawionej na rysunku 4.18 oraz wzrostu szerokości strefy szlifowania, zależnej jest od posuwu poprzecznego.

Wzrost sił szlifowania i mocy z upływem czasu szlifowania wynika ze wzrostu średniego czasu pracy ziaren, zużycia ściernego ziaren aktywnych oraz wzrostu szerokości strefy szlifowania i zmniejszenia wartości średniej grubości warstwy skrawanej.

Podczas szlifowania w warunkach postępującego tępienia ziaren ściernych o wzroście siły szlifowania z upływem czasu procesu decyduje głównie ściernie zużycie ziaren aktywnych. Natomiast podczas szlifowania z intensywnym samoostrzeniem ściernicy, o wzroście siły szlifowania z upływem czasu decyduje wytrzymałościowe zużywanie się ziaren i ściernicy. W wyniku intensywnego wykruszania się ziaren aktywnych wzrasta szerokości strefy szlifowania, co powoduje zwiększenie liczby ziaren skrawający jednocześnie i zmniejszenie wartości średniej grubości warstwy skrawanej.

4.6.2. Promieniowe i objętościowe zużycie ściernicy

W warunkach szlifowania z posuwem poprzecznym, mniejszym od wysokości ściernicy, kształt i pole strefy szlifowania są zmienne w czasie (rys. 4.19). Od średniej grubości warstwy skrawanej przypadającej na jedno ostrze zależy jego mechaniczne i ciepłe obciążenie i wynikające z tego prawdopodobieństwo wykruszenia ziarna w określonym czasie. Założono więc, że zużycie promieniowe ściernicy następuje z intensywnością zależną od średniej grubości warstwy skrawanej (4.51) zmiennej wzdłuż szerokości strefy szlifowania i ponadto zmiennej w czasie szlifowania. Zarys tworzącej ściernicy $y(x)$ (4.52) w dowolnej chwili procesu szlifowania nie jest znany. Do jego wyznaczenia niezbędne jest wyznaczenie średnich grubości warstw skrawanych w kolejnych chwilach procesu, po których następuje posuw poprzeczny.



Rys. 4.19. Zarys tworzącej ściernicy w kolejnych chwilach procesu szlifowania, po których następuje posuw poprzeczny

Średnia grubość warstwy skrawanej w umownej strefie zużycia promieniowego ściernicy zależna jest od zużycia promieniowego w strefie poprzedzającej. Liczbę umownych stref zużycia ściernicy wyznacza iloraz wysokości ściernicy H i wartości posuwu poprzecznego ściernicy p_p .

$$h = \frac{H}{p_p}, \quad (4.59)$$

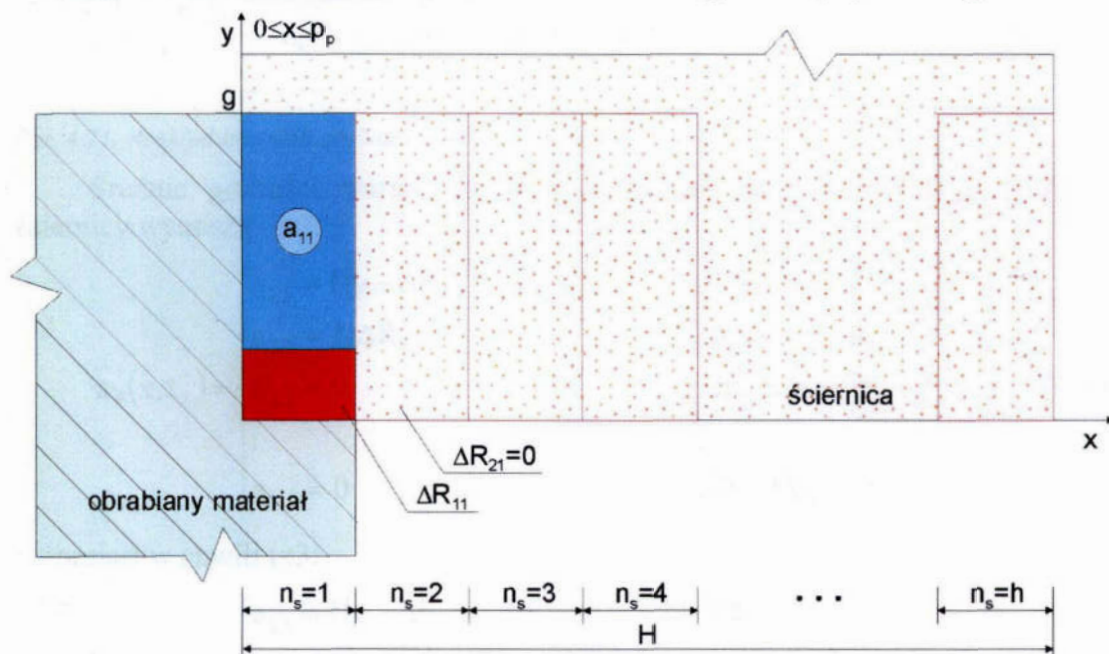
W początkowym okresie pracy ściernicy głębokość szlifowania jest równa całkowitej głębokości szlifowania g , natomiast szerokość strefy szlifowania jest równa wartości posuwu poprzecznego ściernicy p_p . Jak wynika z zależności (4.51, 4.52, 4.57) średnia grubość warstwy skrawanej w chwili $t=1$ jest funkcją całkowitej głębokości szlifowania i wynosi:

$$\bar{a}_z(x, t_1) = \sqrt{C_a \frac{v_p}{\sqrt{v_s^2 \pm v_p^2}} \frac{\sqrt{g_x(x, t_1)}}{\sqrt{D}} \frac{1}{z_F(t_1)}}, \quad (4.60)$$

przy czym

$$C_a = \frac{1}{K(\varepsilon, \rho) \text{tge}}, \quad (4.61)$$

Rysunek 4.20 przedstawia schemat do analizy zużycia promieniowego ściernicy w strefach zużycia wyznaczonych wartością posuwu poprzecznego.



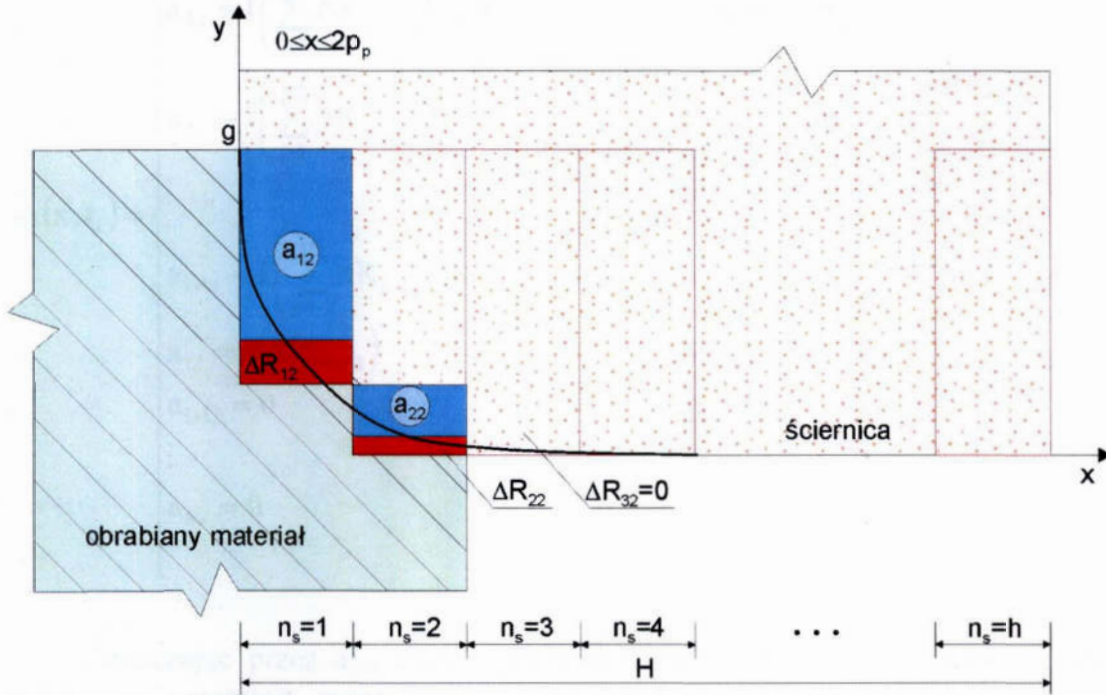
Rys. 4.20. Rozkład średnich grubości warstw skrawanych w chwili $t=1$

Rozkład średnich grubości warstw skrawanych po zakończeniu pierwszego przejścia ściernicy wynosi:

$$\bar{a}_z(x, t_1) = \begin{cases} a_{1,1} = f(g) & , \text{dla } 0 \leq x \leq p_p \\ a_{2,1} = 0 & , \text{dla } p_p \leq x \leq 2p_p \\ \vdots & \vdots \\ a_{h,1} & , \text{dla } (h-1)p_p \leq x \leq hp_p \end{cases}, \quad (4.62)$$

gdzie $f(g)$ oznacza funkcję zmian średniej grubości warstwy skrawanej zależną od głębokości szlifowania.

W kolejnej chwili (rys. 4.21), zużycie w strefie pierwszej w chwili pierwszej – $\Delta R_{s=1,t=1}$ wyznacza grubość warstwy skrawanej dla strefy drugiej – $a_z(s=2,t=2)$. Natomiast grubość warstwy skrawanej dla strefy pierwszej zmniejsza się o wartość zużycia w tej strefie $a_{s=1,t=2} = a_{s=1,t=1} - \Delta R_{s=1,t=1}$.



Rys. 4.21. Rozkład średnich grubości warstw skrawanych w chwili $t=2$

Średnie grubości warstw skrawanych po zakończeniu drugiego przejścia ściernicy wynoszą:

$$\bar{a}_z(x, t_2) = \begin{cases} a_{1,2} = f(g - \Delta R_{1,1}) & , 0 \leq x \leq p_p \\ a_{2,2} = f(\Delta R_{1,1}) & , p_p \leq x \leq 2p_p \\ a_{3,2} = 0 & , 2p_p \leq x \leq 3p_p \\ \vdots & \vdots \\ a_{h,2} = 0 & , (h-1)p_p \leq x \leq hp_p \end{cases} \quad (4.63)$$

natomiast w chwili $t=3$:

$$\bar{a}_z(x, t_3) = \begin{cases} a_{1,3} = f(g - \Delta R_{1,1} - \Delta R_{1,2}) & , 0 \leq x \leq p_p \\ a_{2,3} = f(\Delta R_{1,1} + \Delta R_{1,2} - \Delta R_{2,2}) & , p_p \leq x \leq 2p_p \\ a_{3,3} = f(\Delta R_{2,2}) & , 2p_p \leq x \leq 3p_p \\ a_{4,3} = 0 & , 3p_p \leq x \leq 4p_p \\ \vdots & \vdots \\ a_{h,3} = 0 & , (h-1)p_p \leq x \leq hp_p \end{cases} \quad (4.64)$$

W chwili $t_i = i < h$ rozkład średnich grubości warstw skrawanych w umownych strefach zużycia ściernicy wynosi:

$$\bar{a}_z(x, t_i) = \begin{cases} a_{1,i} = f\left(g - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta R_{1,j}\right) & , 0 \leq x \leq p_p \\ a_{2,i} = f\left(\sum_{j=1}^{i-1} \Delta R_{1,j} - \sum_{j=2}^{i-1} \Delta R_{2,j}\right) & , p_p \leq x \leq 2p_p \\ a_{3,i} = f\left(\sum_{j=2}^{i-1} \Delta R_{2,j} - \sum_{j=3}^{i-1} \Delta R_{3,j}\right) & , 2p_p \leq x \leq 3p_p \\ \vdots \\ a_{i-1,i} = f\left(\sum_{j=i-2}^{i-1} \Delta R_{i-2,j} - \Delta R_{i-1,i-1}\right) & , (i-2)p_p \leq x \leq (i-1)p_p \\ a_{i,i} = f(\Delta R_{i-1,i-1}) & , (i-1)p_p \leq x \leq ip_p \\ a_{i+1,i} = 0 & , ip_p \leq x \leq (i+1)p_p \\ \vdots \\ a_{h,i} = 0 \end{cases} \quad (4.65)$$

Oznaczając przez $a_{i,m}$ średnią grubość warstwy skrawanej w strefie i ; dla $i=2,3,\dots,h$, natomiast przez $\Delta R_{i,j}$ zużycie promieniowe ściernicy w strefie i , w okresie czasu od t_{j-1} do t_j ; dla $j=1,2,\dots,m$; $m > h$ wyznaczono rozkład dla chwili t_m .

$$\bar{a}_z(x, t_m) = \begin{cases} a_{1,m} = f\left(g - \sum_{j=1}^m \Delta R_{1,j}\right) & , \text{dla } 0 \leq x \leq p_p \\ a_{i,m} = f\left(\sum_{j=i-1}^{m-1} \Delta R_{i-1,j} - \sum_{j=i}^{m-1} \Delta R_{i,j}\right) & , \text{dla } (i-1)p_p \leq x \leq ip_p \end{cases} \quad (4.66)$$

Średnia liczba wykruszeń w okresie czasu od t_{j-1} do t_j w umownej strefie ściernicy o numerze i zależy od średniej grubości warstwy skrawanej $(\bar{a}_z)_{i,j}$ wynosi:

$$\lambda_{i,j} = \begin{cases} \lambda_0 [\bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{i,j} - \bar{F}_{nz0}] & , \text{dla } \bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{i,j} - \bar{F}_{nz0} > 0 \\ 0 & , \text{dla } \bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{i,j} - \bar{F}_{nz0} \leq 0 \end{cases} \quad (4.67)$$

przy czym λ_0 oznacza oczekiwaną liczbę wykruszeń, $\bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{i,j}$ średnią wartość siły normalnej na jednym ostrzu aktywnym w strefie i , w chwili t_j , natomiast \bar{F}_{nz0} oznacza poziom średniej wartości składowej normalnej siły przypadającej na jedno ostrze aktywne, dla którego nie występują wykruszenia, r jest wykładnikiem wyznaczalnym doświadczalnie. Po uwzględnieniu zależności (4.67) wyznaczona została wartości zużycia promieniowego w strefach ściernicy:

$$\begin{aligned}
 \Delta R_{1,1} &= A\lambda_0 \left[\bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{1,1} - \bar{F}_{nz0} \right] \\
 \Delta R_{2,1} &= 0 \\
 &\vdots \\
 \Delta R_{h,1} &= 0 \\
 \\
 \Delta R_{1,2} &= A\lambda_0 \left[\bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{1,2} - \bar{F}_{nz0} \right] \\
 \Delta R_{2,2} &= A\lambda_0 \left[\bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{2,2} - \bar{F}_{nz0} \right], \\
 \Delta R_{3,2} &= 0 \\
 &\vdots \\
 \Delta R_{h,2} &= 0 \\
 &\vdots \\
 \Delta R_{i,j} &= A\lambda_0 \left[\bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{i,j} - \bar{F}_{nz0} \right] \\
 &\vdots \\
 \Delta R_{h,m} &= A\lambda_0 \left[\bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{h,m} - \bar{F}_{nz0} \right]
 \end{aligned} \tag{4.68}$$

przy czym stała A wynosi

$$A = \frac{\bar{V}_z \cdot t_j}{\pi \cdot V_z^{(1)} \cdot D \cdot p_p}, \tag{4.69}$$

Po przekształceniu wzorów (4.44, 4.56, 4.57) otrzymano:

$$\bar{F}_{nz}(\bar{a}_z)_{i,j} = C_n \cdot \left((\bar{a}_z)_{i,j} \right)^{2n}, \tag{4.70}$$

gdzie C_n ujmuje czynniki nie wyodrębnione w zależności (4.57), natomiast wykładnik n zależny jest od warunków obróbki $0,5 < n < 0,8$.

Po uwzględnieniu zależności (4.70) określającej średnią wartość składowej normalnej siły skrawania, przypadającej na jedno ostrze aktywne, zależnej od średniej grubości warstwy skrawanej – wyznaczony został rozkład wartości zużycia promieniowego w umownych strefach powierzchni czynnej ściernicy, we wszystkich chwilach procesu od $t=0$ do $t=m$; $m>h$:

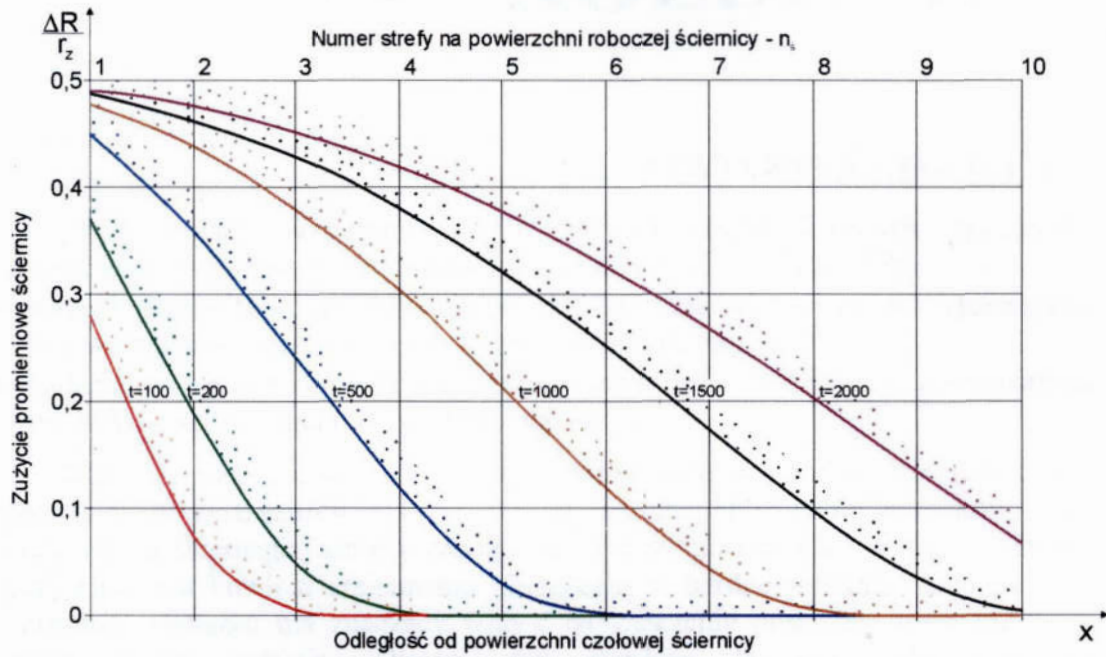
$$\begin{aligned}
 \Delta R_{1,1} &= A\lambda_0 \left[C_n (g)^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r \\
 \Delta R_{2,1} &= 0 \\
 &\vdots \\
 \Delta R_{h,1} &= 0 \\
 \Delta R_{1,2} &= A\lambda_0 \left[C_n (g - \Delta R_{1,1})^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r \\
 \Delta R_{2,2} &= A\lambda_0 \left[C_n (\Delta R_{1,1})^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r \\
 \Delta R_{3,2} &= 0 \\
 &\vdots \\
 \Delta R_{h,2} &= 0 \\
 \Delta R_{1,3} &= A\lambda_0 \left[C_n (g - \Delta R_{1,1} - \Delta R_{1,2})^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r \\
 \Delta R_{2,3} &= A\lambda_0 \left[C_n (\Delta R_{1,1} + \Delta R_{1,2} - \Delta R_{2,2})^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r \\
 \Delta R_{3,3} &= A\lambda_0 \left[C_n (\Delta R_{2,2})^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r \\
 \Delta R_{4,3} &= 0 \\
 &\vdots \\
 \Delta R_{h,3} &= 0 \\
 \Delta R_{1,m} &= A\lambda_0 \left[C_n \left(g - \sum_{j=1}^{m-1} \Delta R_{1,j} \right)^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r \\
 \Delta R_{2,m} &= A\lambda_0 \left[C_n \left(\sum_{j=1}^{m-1} \Delta R_{1,j} - \sum_{j=2}^{m-1} \Delta R_{2,j} \right)^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r \\
 \Delta R_{3,m} &= A\lambda_0 \left[C_n \left(\sum_{j=2}^{m-1} \Delta R_{2,j} - \sum_{j=3}^{m-1} \Delta R_{3,j} \right)^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r \\
 &\vdots \\
 \Delta R_{h,m} &= A\lambda_0 \left[C_n \left(\sum_{j=h-1}^{m-1} \Delta R_{h-1,j} - \sum_{j=h}^{m-1} \Delta R_{h,j} \right)^{n/2} - \bar{F}_{nz0} \right]^r
 \end{aligned} \tag{4.71}$$

Zużycie promieniowe ostatniej strefy ściernicy podczas ciągłego, obwodowego szlifowania płaszczyzn decyduje o odchyłce wywołanej zużyciem promieniowym ściernicy. Sumaryczne zużycie ostatniej strefy ściernicy podczas szlifowania w okresie czasu $t=t_m-t_0$ wyznaczone z zależności (4.71) wynosi:

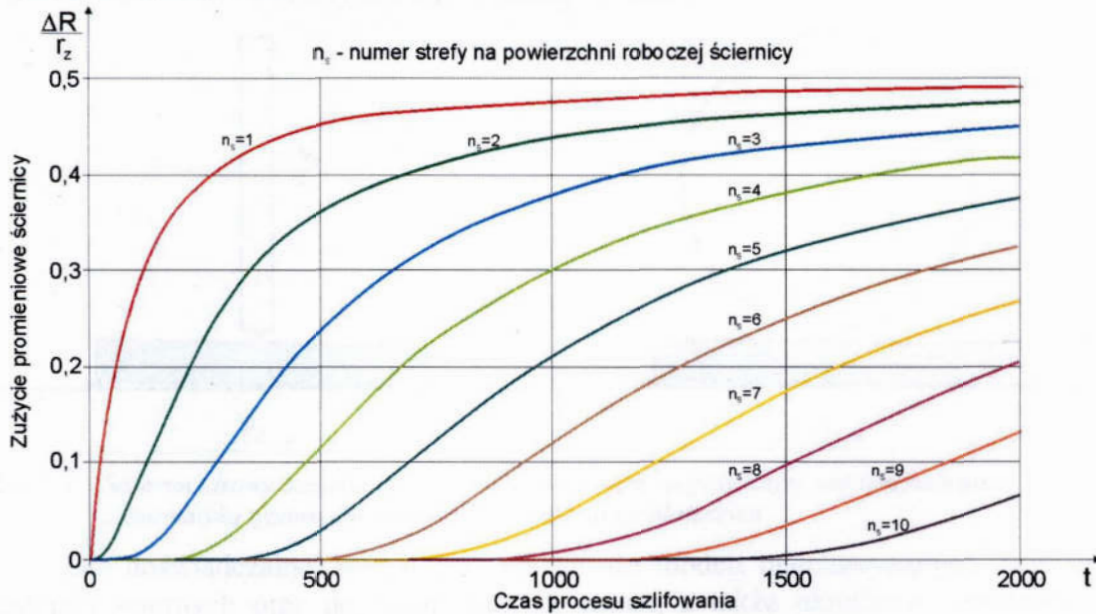
$$(\Delta R_s)_h = \begin{cases} \sum_{j=h}^m \Delta R_{h,j} & , \text{ dla } m \geq h \\ 0 & , \text{ dla } m < h \end{cases} \tag{4.72}$$

Na rysunku 4.22 przedstawiony został przykładowy przebieg zużycia promieniowego ściernicy wyznaczony w umownych strefach na podstawie

wyprowadzonych powyżej zależności. Natomiast rysunek 4.23 przedstawia wpływ czasu szlifowania na zużycie promieniowe ściernicy.



Rys. 4.22. Zużycie promieniowe ściernicy wzdłuż jej wysokości po upływie różnych czasów szlifowania



Rys. 4.23. Wpływ czasu szlifowania na zużycie promieniowe ściernicy w określonych strefach

Opracowane modele zużycia ściernicy, z uwzględnieniem probabilistycznego charakteru zmienności obciążenia ziaren ściernych wykorzystano do opracowania algorytmów symulacji procesu zużycia narzędzi ściernych.

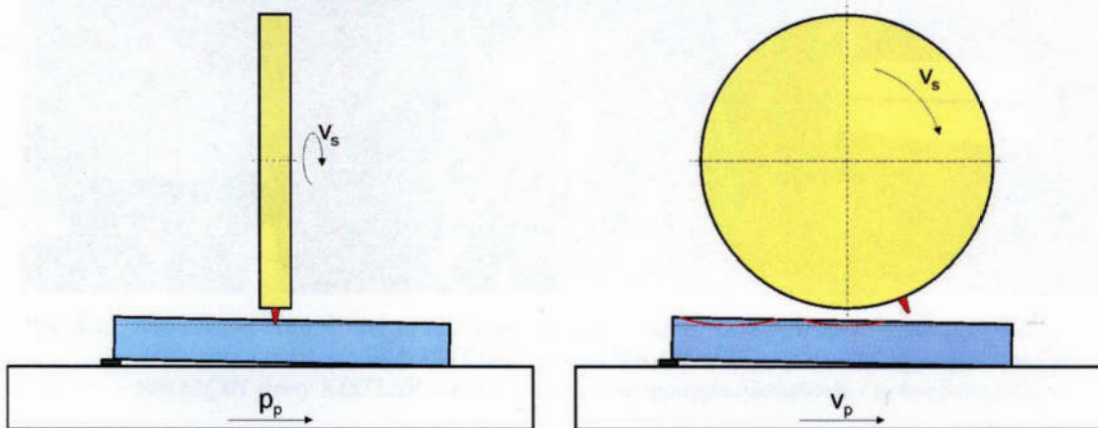
ROZDZIAŁ 5

STANOWISKO BADAWCZE

W badaniach eksperymentalnych zużycia ziaren ściernych najczęściej stosowane są dwie metody, o odmiennej kinematyce procesu [15, 129]:

- badanie procesów mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym z kinematyką typową dla procesów toczenia, tzw. próby ścierania ziaren,
- badania procesów mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym z kinematyką typową dla szlifowania obwodowego płaszczyzn.

Metoda badania ziaren ściernych, z zastosowaniem odmiany kinematycznej, typowej dla procesu szlifowania (rys. 5.1) jest bardziej zbliżona do warunków pracy ostrza ziarna ściernego, umieszczonego na czynnej powierzchni ściernicy. Ziarno poddawane jest bowiem zmiennemu obciążeniu w bardzo krótkim okresie czasu. Zmienność obciążeń ma znaczący wpływ na znaczenie poszczególnych przyczyn i mechanizmów zużycia. Dlatego też odmiana ta jest najpowszechniej wykorzystywana w badaniach zużycia ziaren ściernych.



Rys. 5.1. Schemat ideowy badania procesów mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym z kinematyką typową dla szlifowania obwodowego płaszczyzn

Dla doświadczalnej weryfikacji założeń do modeli matematycznych zużycia narzędzi ściernych oraz do badań zużycia ziaren, a także określenia zmienności obciążeń ziaren w strefie mikroskrawania, opracowano i zbudowano układy badawcze, stanowiące stanowisko obróbkowe, wyposażone w:

- szlifierkę do płaszczyzn SPC 20B,
 - tor pomiarowy składowych siły skrawania,
 - wizyjną kontrolę dosuwu ostrza skrawającego
- oraz wykorzystano urządzenia pomiarowe w postaci:
- mikroskop warsztatowy Carl Zeiss JENA,
 - skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-5500LV,
 - profilometr T2000 firmy Hommelwerke.

Charakterystyka stanowiska obróbkowego i toru pomiarowego, a także procedura przygotowania i przeprowadzenia badań eksperymentalnych przedstawiona została w kolejnych podrozdziałach opracowania.

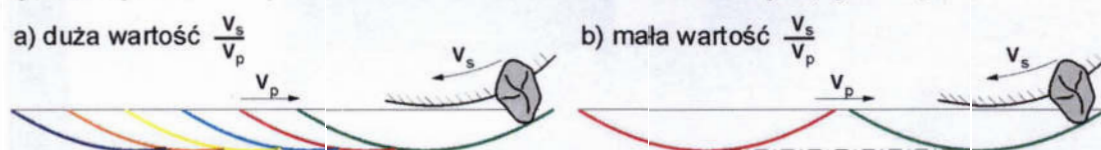
5.1. Stanowisko obróbkowe

Do badań eksperymentalnych wykorzystano na szlifierkę do płaszczyzn SPC 20B firmy PONAR JOTES, wyposażoną dodatkowo w kamerę przemysłową WV-KS152E firmy PANASONIC oraz piezoelektryczny siłomierz 9602AQ01 firmy KISTLER, wraz z zespołem wstępnego obciążenia i uchwytem próbek. Podstawowe elementy stanowiska badawczego przedstawione zostały na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Stanowisko obróbkowe: a) szlifierka do płaszczyzn SPC 20B firmy PONAR JOTES, b) kamera przemysłowa WV-KS152E firmy PANASONIC, c) piezoelektryczny siłomierz 9602AQ01 firmy KISTLER, wraz z zespołem wstępnego obciążenia i uchwytem próbek

Zaprojektowane stanowisko badawcze może być wykorzystane do badania obciążenia i zużycia ziaren ściernych w procesie mikroskrawania pojedynczymi ziarnami z kinematyką typową dla procesu obwodowego szlifowania płaszczyzn. Zastosowanie siłomierza umożliwiło pomiar trzech składowych siły skrawania ze stopniową regulacją zakresu pomiaru, natomiast demontaż badanego ziarna pomiędzy doświadczeniami pozwolił na obserwację i pomiar zużycia wierzchołka ziarna po każdej próbie. Parametry kinematyczne szlifierki pozwalały na pomiary obciążenia ziarna dla prędkości skrawania zgodnej z prędkościami uzyskiwanymi w procesie szlifowania płaszczyzn. Płynna regulacja prędkości posuwu umożliwiła nastawę zadanego naddatku przypadającego na operację skrawania ziarna (jeden wyodrębniony kontakt ostrza z materiałem obrabianym, rys. 5.3).



Rys. 5.3. Wyodrębniony kontakt ostrza z materiałem obrabianym dla dużej i małej wartości stosunku prędkości skrawania do prędkości posuwowej

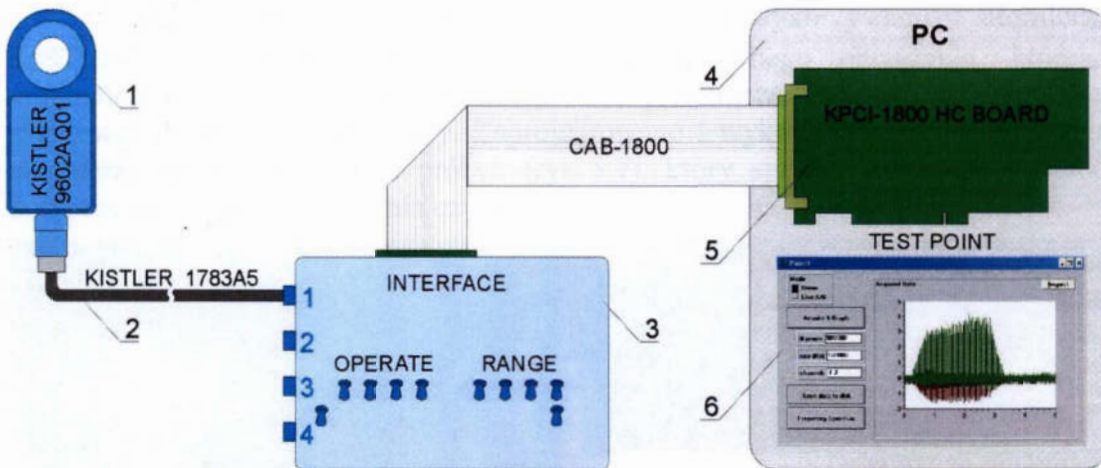
5.1.1. Komputerowa rejestracja obciążenia ziaren

W celu badania obciążenia ziarna ściernego w procesie mikroskrawania wykorzystano specjalny zestaw pomiarowy, pozwalający na komputerową akwizycję składowej normalnej siły skrawania w zakresach $0 \div 150$ i $0 \div 300$ N oraz dwóch składowych stycznych w zakresach $0 \div 75$ i $0 \div 150$ N, z częstotliwością pomiaru do 333 kHz. Rysunki 5.4 i 5.5 przedstawiają główne elementy i schemat toru pomiarowego, zastosowanego w badaniach, na który składają się:

1. Piezoelektryczny siłomierz KISTLER – 9602AQ01, ze zintegrowanym wzmacniaczem sygnału dla trzech kanałów odpowiadających trzem składowym mierzonej siły
2. Przewód łączeniowy, o małej impedancji KISTLER – 1783A5
3. Interfejs zasilania i sterowania siłomierza
4. Komputer PC,
5. Karta pomiarowa KEITHLEY – KPCI-1800HC
6. Oprogramowanie Test Point v 5.0

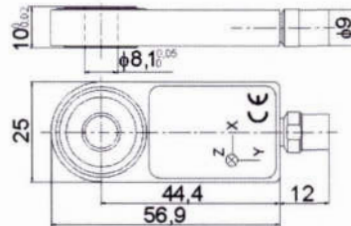


Rys. 5.4. Elementy toru pomiarowego siły skrawania



Rys. 5.5. Schemat toru pomiarowego siły skrawania

Zastosowany siłomierz KISTLER – 9602AQ01 służy do quasi–statycznego pomiaru trzech składowych siły w układzie ortogonalnym z dokładnością pomiaru siły wynoszącą 10 mN [7]. Siłomierz wyposażony jest w zintegrowany trzykanałowy wzmacniacz, pozwalający na zerowanie i zmianę zakresu pomiarowego. Do badań zastosowano okablowanie siłomierza KISTLER – 1783A5, o małej impedancji, wykonane w klasie IP67, w otulinie PUR, odpornej na działanie wody, rozpuszczalników oraz substancji smarujących i chłodzących. Podstawowe wymiary siłomierza oraz oznaczenia kierunków i zwrotów mierzonych składowych siły przedstawione zostały na rysunku 5.6.



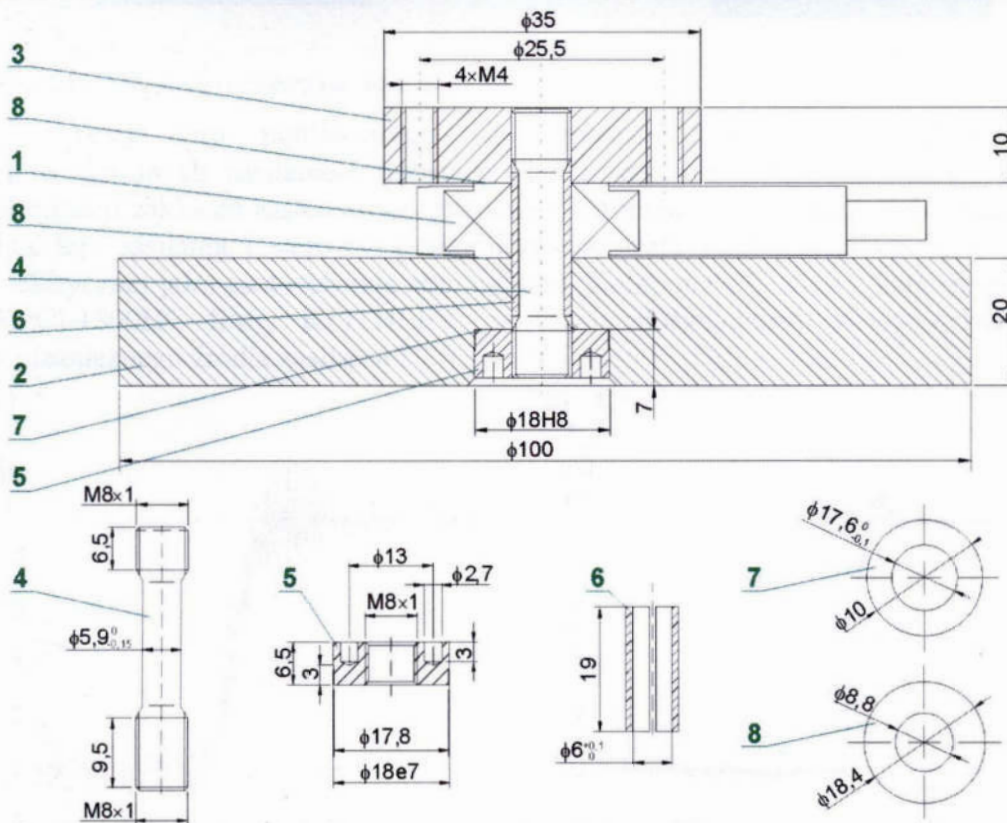
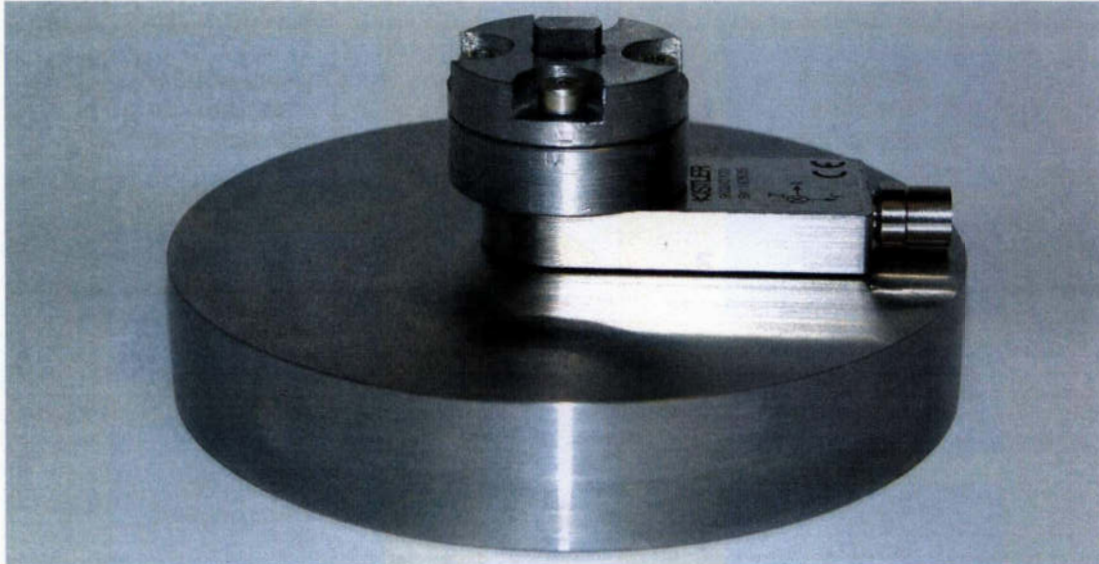
Rys. 5.6. Siłomierz KISTLER – 9602AQ01

Podstawowe dane techniczne siłomierza, dotyczące: zakresów pomiarowych, maksymalnego obciążenia, liniowości i histerezy pomiaru, sztywności, dopuszczalnej temperatury pracy oraz parametrów sygnału wyjściowego przedstawione zostały w tabelicy 5.1.

Tablica 5.1. Podstawowe dane techniczne siłomierza KISTLER – 9602AQ01

Cechy	Oznaczenia	Zakres	Jednostki
I zakres pomiarowy	F_z	$-300 \div 300$	N
	F_x, F_y	$-150 \div 150$	N
II zakres pomiarowy	F_z	$-150 \div 150$	N
	F_x, F_y	$-75 \div 75$	N
Max obciążenie	F_z	25	kN
Liniowość		$\leq \pm 2$	%FSO
Histereza		≤ 2	%FSO
Sztywność		≈ 1250	N/ μm
Temperatura pracy		$-10/+70$	$^{\circ}\text{C}$
Napięcie sygnału wyjściowego		$-5 \div 5$	V
Impedancja sygnału wyjściowego		≈ 100	Ω

Uzyskanie poprawnych wyników pomiarów sił z wykorzystaniem siłomierza KISTLER – 9602AQ01 wymaga zastosowania wstępnego obciążenia, którego minimalna wartość powinna dziesięciokrotnie przekraczać wartość spodziewanej składowej stycznej mierzonej siły. Zaprojektowano i wykonano zespół mocowania siłomierza wraz z uchwytem próbek (rys. 5.7), który spełnia powyższe warunki dotyczące wstępnego obciążenia czujnika siły



Rys. 5.7. Zespół wstępnego obciążenia siłomierza wraz z uchwytem próbek

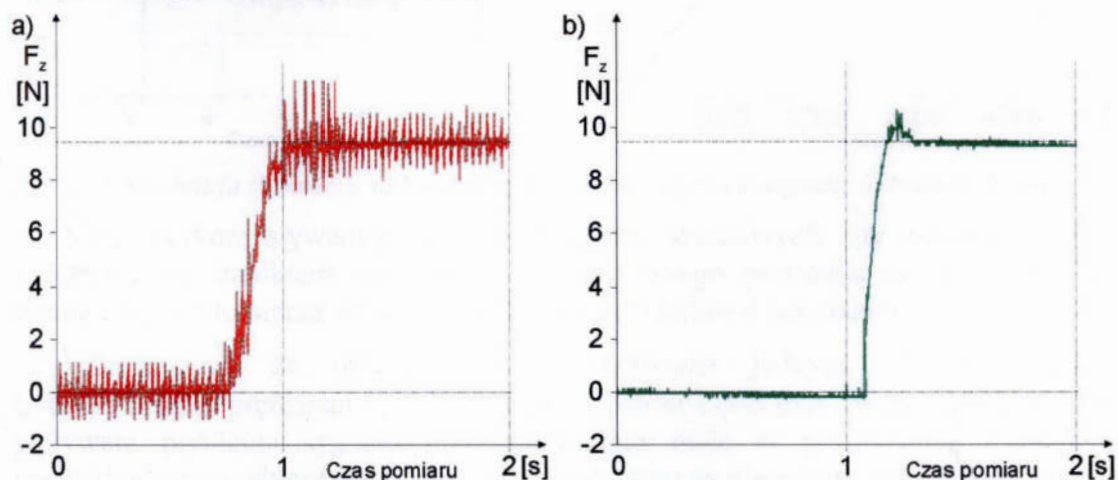
Na zespół mocowania siłomierza (1) składają się: podstawa (2), uchwyt próbek (3), śruba wstępnego obciążenia siłomierza (4), nakrętka regulacji obciążenia (5), tuleja centrująco – izolująca (6), podkładka nakrętki (7) oraz dwie podkładki izolujące (8).

Minimalizacja wpływu zakłóceń elektromagnetycznych pomiaru wymogła zastosowanie izolacji siłomierza i obrabiarki, zerowanie wszystkich urządzeń elektrycznych stanowiących tor pomiarowy oraz kontrolę izolacji w trakcie pomiarów. W czasie testowania układu siłomierza opracowano procedurę pomiaru składowych siły skrawania, przedstawioną na rysunku 5.8.



Rys. 5.8. Schemat procedury pomiaru siły

Testy toru pomiarowego siły wykazały znaczny wpływ zakłóceń spowodowanych zasilaniem urządzeń pomiarowych z sieci elektrycznej. W celu eliminacji zakłóceń zastosowano zasilanie siłomierza z oddzielnego źródła zasilania. Interfejs zasilania i sterowania siłomierza pozwala zarówno na zasilanie z sieci elektrycznej jak i zastosowanie akumulatora. Komputer PC wraz z kartą pomiarową KPCI-1800HC firmy KEITHLEY, w czasie doświadczeń, zasilany był także z niezależnego źródła zasilania UPS.



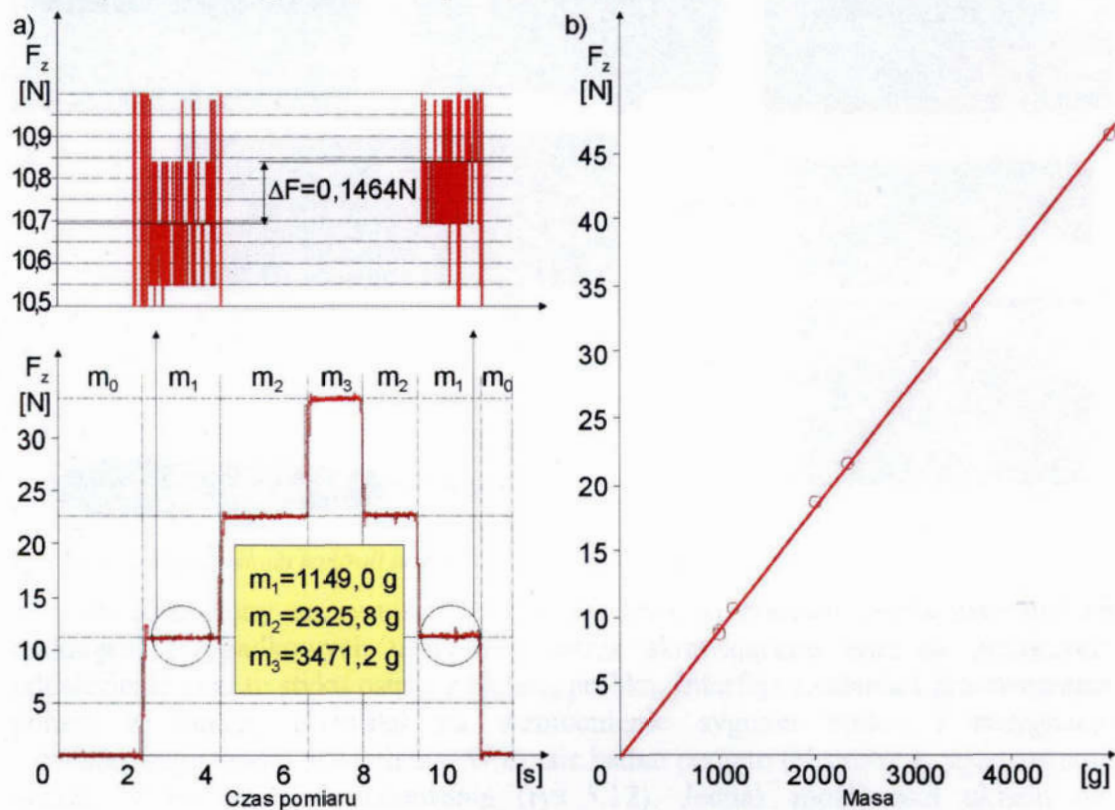
Rys. 5.9. Wpływ zakłóceń wynikających z zasilania toru pomiarowego siły: a) z sieci elektrycznej, b) z niezależnego źródła zasilania - akumulatorów

Na rysunku 5.9 przedstawiono wpływ zakłóceń spowodowanych zasilaniem układów pomiarowych z sieci elektrycznej po przyłożeniu obciążenia stałego o masie 1002,6 g. Pomiaru dokonano dla drugiego zakresu pomiarowego siłomierza

i częstotliwości próbkowania wynoszącej 1 kHz. Po przeliczeniu wskazań siłomierza maksymalny bezwzględny błąd pomiaru siły wynosił: dla składowej normalnej $\pm 1,3915$ N oraz dla składowych stycznych $\pm 0,6958$ N.

Po zastosowaniu zasilania układu pomiarowego z akumulatorów wartości bezwzględnego błędu pomiaru wynosiły $\pm 0,2195$ N dla składowej normalnej oraz $\pm 0,1098$ N dla składowych stycznych, zatem zmniejszyły się prawie siedmiokrotnie.

W czasie testów układu pomiarowego wykonano kalibrację wskazań siłomierza, a także przeprowadzono test wpływu histerezy i kontrolę liniowości wskazań układu oraz przeprowadzono test płynięcia sygnału spowodowany specyfiką urządzeń pomiarowych opartych na układach piezoelektrycznych. Ponadto obliczono błędy wynikające z powyższych testów. Wyniki testu histerezy przedstawione zostały na rysunku 5.10a, natomiast wyniki kontroli liniowości wskazań siłomierza przedstawia rysunek 5.10b.



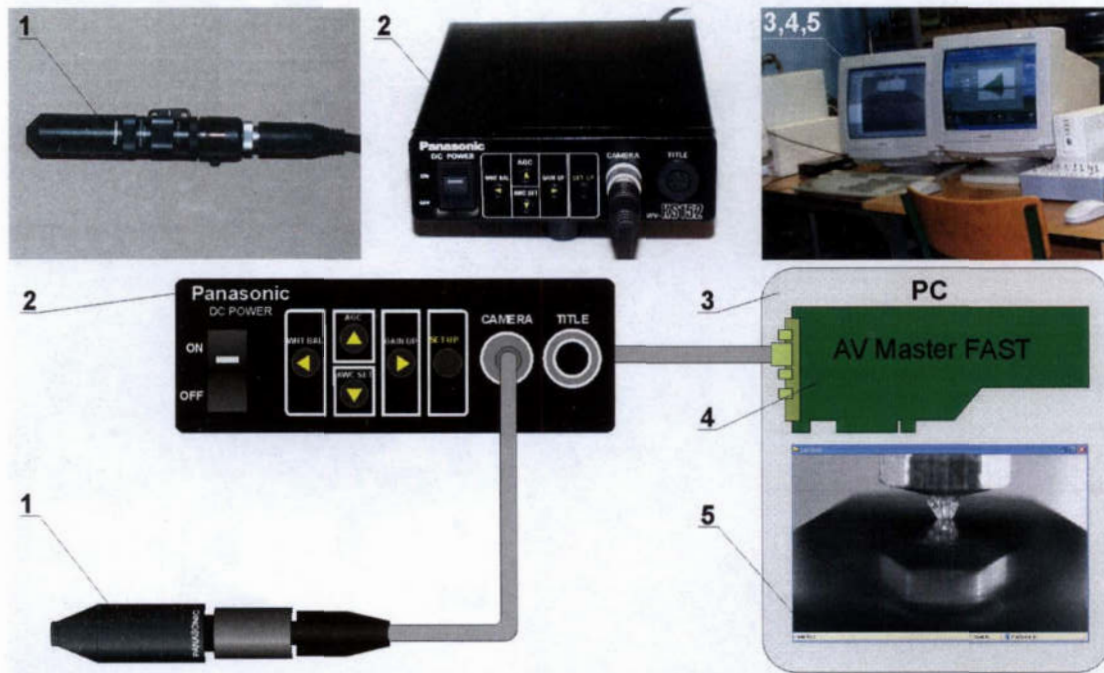
Rys. 5.10. Kalibracja siłomierza: a) badanie histerezy oraz płynięcia sygnału, b) badanie liniowości

Dla wykorzystywanego zakresu pomiaru składowych siły skrawania błąd spowodowany zanikiem ładunku piezoelektrycznego powstającego w elemencie pomiarowym siłomierza wynosi $0,2123$ N/s dla składowej normalnej.

Zakładając, że przeciętny czas skrawania jednym ziarnem wynosi $t_s = 0,185$ ms dla prędkości $v_s = 27$ m/s i drogi ostrza $L_\psi = 5$ mm, błędy spowodowane wpływem płynięcia sygnału będą pomijalnie małe w porównaniu z błędem spowodowanym zakłóceniami elektrycznymi, które są niezależne od czasu pomiaru. Podobnie pomijalnie mały wpływ na dokładność pomiaru mają niedokładności wskazań spowodowane błędem histerezy czujnika siły. Zmiana siły o wartość $F_z = 21,3867$ N w czasie $\Delta t = 8,22$ s powoduje błąd pomiaru wynoszący $0,0178$ N.

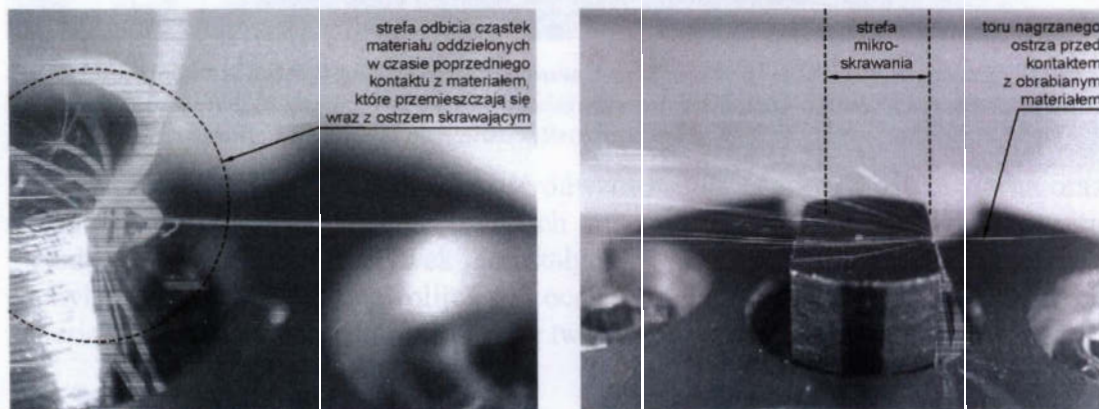
5.1.2. Kontrola dosuwu ostrza skrawającego

Badania procesu mikroskrawania jednym ostrzem głębokości skrawania w zakresie $a_z=1\div 30\ \mu\text{m}$ wymogły zastosowanie układu kontroli dosuwu ostrza skrawającego przed wykonaniem skrawania. W tym celu zastosowano układ monitorujący, którego główne elementy stanowiły: kamera przemysłowa WV-KS152E firmy PANASONIC (1), interfejs zasilania i przetwarzania obrazu (2), komputer PC (3), wyposażony w kartę przetwarzania obrazu AV Master firmy FAST (4) oraz oprogramowanie do Fast Capture (5), pozwalające na korekcję, kompresję i zapis otrzymanego sygnału wideo.



Rys. 5.11. Schemat układu kontroli dosuwu ostrza skrawającego

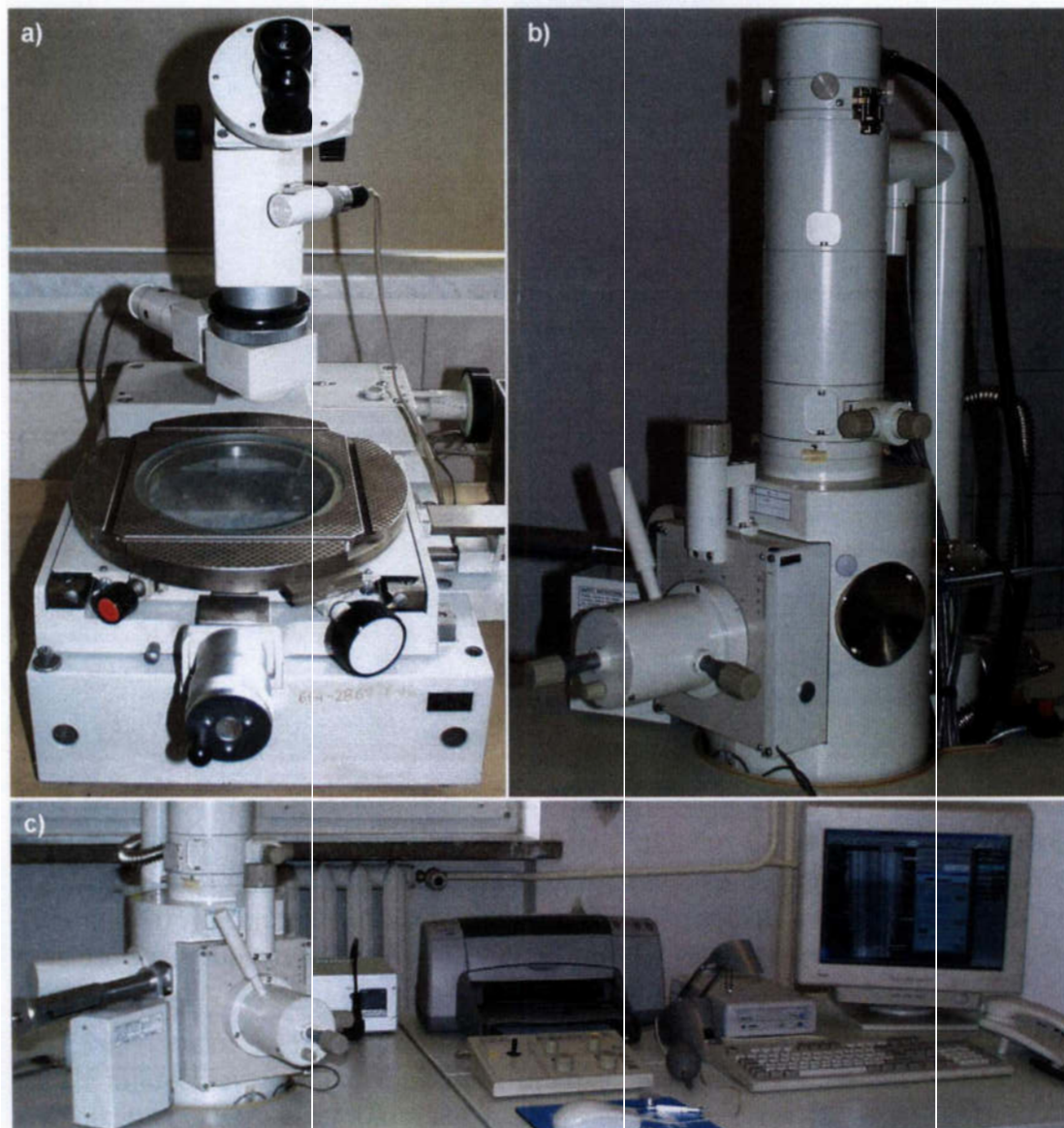
Przedstawiony na rysunku 5.11 układ kontroli dosuwu ostrza pozwolił na uniknięcie przypadkowych uszkodzeń ostrza skrawającego oraz na precyzyjne odnalezienie punktu styku ostrza z badaną próbką. Interfejs zasilania i przetwarzania obrazu z kamery pozwalał na wzmocnienie sygnału wideo i rezygnację z dodatkowego źródła oświetlenia. W czasie badań podjęto też próby zarejestrowania obrazu wideo w czasie skrawania (rys. 5.12). Jednak możliwości układu nie pozwalały na dokładne odwzorowanie procesów zachodzących w trakcie prób.



Rys. 5.12. Zarejestrowane obrazy toru pracy ostrza i toru odbicia wiórow z wykorzystaniem układu kontroli dosuwu ostrza skrawającego

5.2. Pomiary mikroskopowe

Pomiary i rejestracja zużycia ziaren ściernych oraz analiza strefy mikroskrawania wymagały zastosowania urządzeń mikroskopowych: mikroskopu warsztatowego Carl Zeiss JENA (rys. 5.13a) i skaningowego mikroskopu elektronowego JEOL JSM-5500LV (rys. 5.13b), wyposażonego w komputerowy system oceny, rejestracji i pomiarów zużycia ziaren (rys. 5.13c).

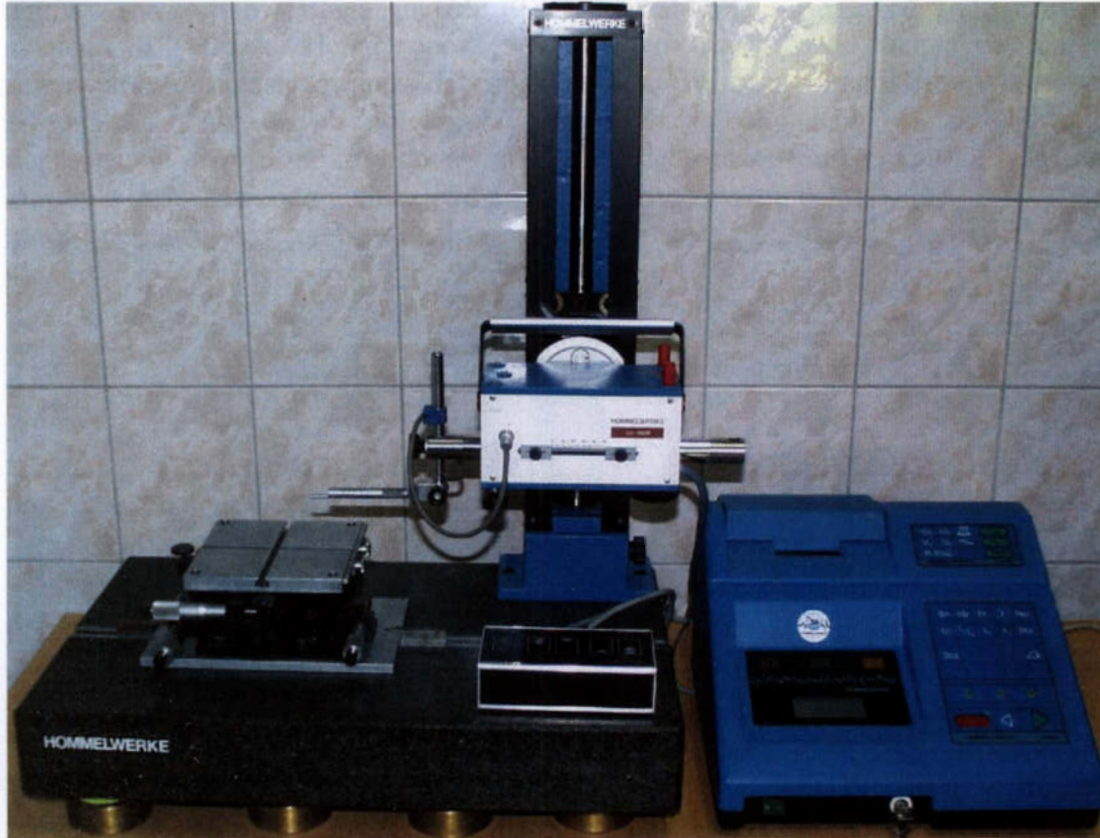


Rys. 5.13. Urządzenia mikroskopowe wykorzystywane w badaniach: a) mikroskop warsztatowy Carl Zeiss JENA, b) skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-5500LV, c) stanowisko do komputerowej rejestracji i pomiarów mikroskopowych

Sz szczególnie cenna była możliwość odwzorowania geometrii ostrza ziarna oraz rejestracja zużycia po kolejnych etapach mikroskrawania. Ponadto opracowano metodę odwzorowania wpływów powstałych w procesie mikroskrawania dzięki pochyleniu próbki, co pozwoliło na ocenę udziału odkształceń plastycznych materiału w strefie wpływki oraz analizę tworzenia oddzielonych mikrowiórów.

5.3. Profile śladów mikroskrawania

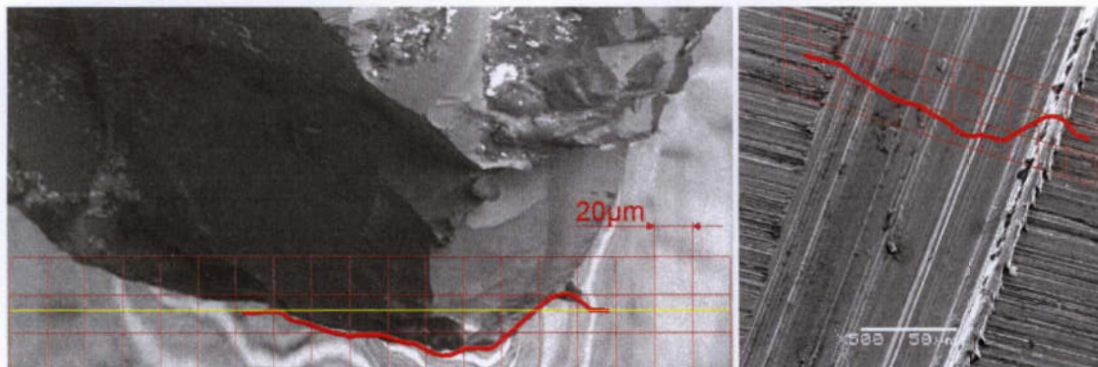
Rejestrację śladów mikroskrawania oraz pomiary grubości warstwy skrawanej jednym ostrzem i pola przekroju warstwy skrawanej przeprowadzone zostały na profilometrze T2000 firmy Hommelwerke (rys. 5.14).



Rys. 5.14. Profilometr T2000 firmy Hommelwerke

Pomiarów dokonano z wykorzystaniem układu LV50-E1 o dokładności prowadzenia $0,4 \mu\text{m} / 50 \text{ mm}$, z wykorzystaniem czujnika do pomiaru chropowatości TKE $100/90^\circ/R=5 \mu\text{m}$. Jednostka sterująca MSC-2, podłączona do komputera PC i zastosowaniu oprogramowania T2000 v.3.44PL, pozwalała na pomiary śladów mikroskrawania, analizę i zapis do formatu ASCII.

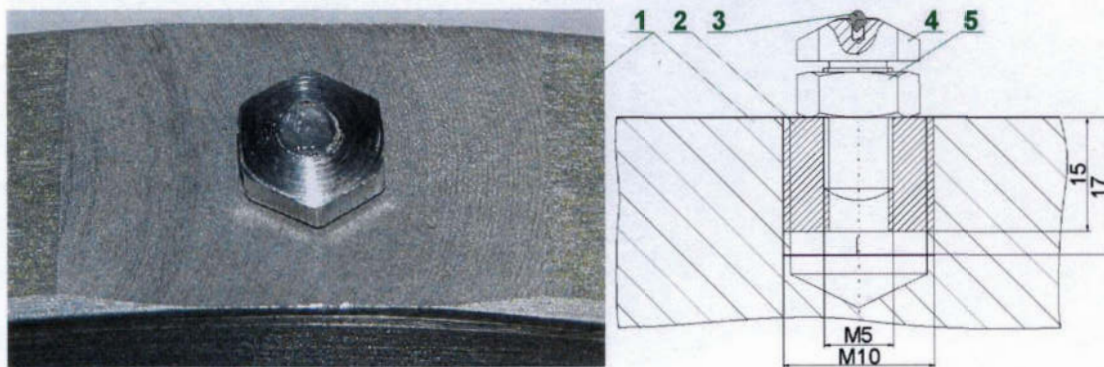
Na rysunku 5.15. przedstawiono przykład rejestracji obrazu geometrii ostrza i śladu mikroskrawania, otrzymanych z mikroskopu skaningowego oraz porównanie z wynikami pomiaru przekroju warstwy skrawanej z profilometru.



Rys. 5.15. Odzworowanie geometrii ostrza ziarna skrawającego Al_2O_3 z naniesionym przekrojem poprzecznym śladu skrawania stali NC6, HRC 50, $v_s=26,8 \text{ m/s}$, $p=0,32 \text{ m/s}$

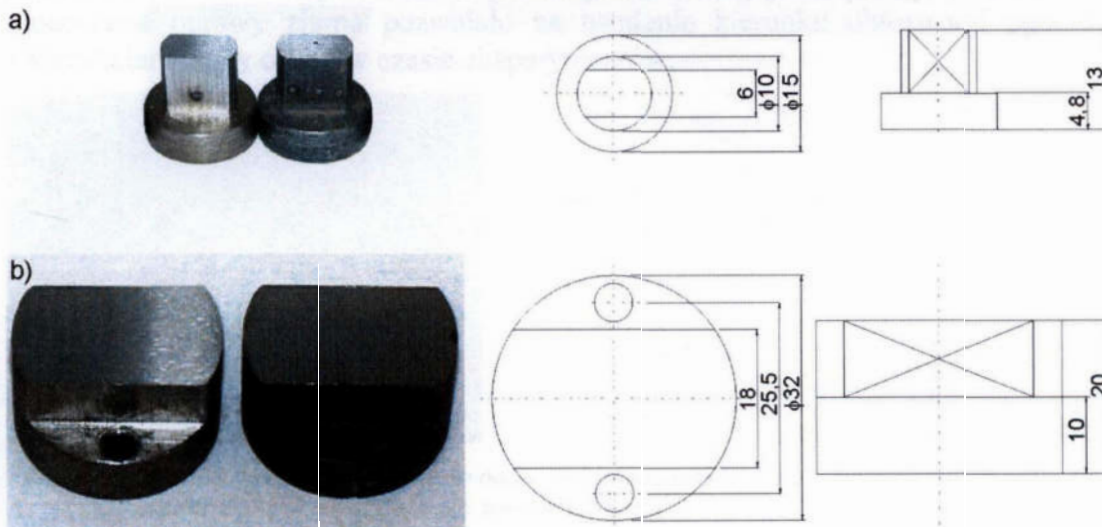
5.4. Konstrukcja próbek i uchwytów

Do badań zużycia ziaren z elektrokorundu szlachetnego skonstruowano i zbudowano uchwyt (rys. 5.16), zamocowany na tarczy (1) o średnicy $\phi 200$ wykonanej ze spieków aluminiowych. W celu uzyskania stabilnego mocowania ziarna zastosowano stalowe gniazdo (2), które zabezpieczono przed wykręceniem sklejeniem z tarczą klejem epoksydowym. Do utwierdzenia badanych ziaren ściernych także zastosowano klej epoksydowy. W celu minimalizacji wpływu odkształceń plastycznych połączenia ziarna (3) z uchwytem (4) zastosowano dopasowanie otworu gniazda do wymiarów każdego mocowanego ziarna. Nastawę kierunku skrawania ziarna umożliwiono dzięki zastosowaniu nakrętki (5).



Rys. 5.16. Osadzenie badanych ziaren

Badania eksperymentalne wymagały zastosowania dwóch rodzajów konstrukcji próbek (rys. 5.17). Próbki przedstawione na rysunku 5.17a – typ A umożliwiały obserwację i rejestrację całej powierzchni na mikroskopie skaningowym, jednak ze względu na małe wymiary nie pozwalały na prowadzenie badań obciążenia ziarna dla warunków małej wartości stosunku prędkości skrawania do prędkości posuwowej. W celu umożliwienia badań pojedynczego kontaktu ostrza skrawającego z materiałem obrabianym zwiększono badaną powierzchnię próbki – typ B (rys. 5.17b). Zastosowanie większych próbek skutkowało ograniczeniem możliwości stosowania mikroskopu skaningowego i wymogło stosowanie dodatkowego uchwytu mocowania próbki w czasie pomiarów mikroskopowych.



Rys. 5.17. Próbki zastosowane w badaniach: a) stal NC6, b) stal 45

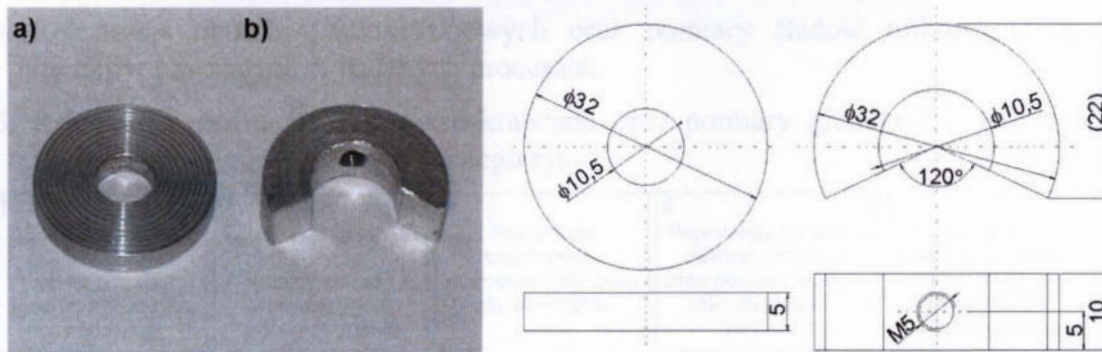
W celu mocowania pierwszego rodzaju próbek skonstruowano i wykonano uchwyt, przedstawiony na rysunku 5.18, który pozwalał na nastawę kierunku skrawania oraz możliwość pochylenia badanej próbki w celu uzyskania przyrastającej wartości naddatku na poszczególne operacje skrawania ziarna.



Rys. 5.18. Przyrząd do mocowania próbek w czasie eksperymentów

Próbki wykonano ze stali narzędziowej, stopowej – NC6 oraz stali węglowej, konstrukcyjnej wyższej jakości – 45. Po obróbce cieplnej próbki poddawano obróbce wykańczającej, której celem było uzyskanie chropowatości badanej powierzchni $R_a=0,5\mu\text{m}$.

Do pomiarów mikroskopowych zaprojektowano i wykonano uchwyty, przestawione na rysunku 5.19. Do mocowania próbek stosowano uchwyt 5.19a oraz do mocowania oprawy ziarna uchwyt 5.19b. Konstrukcja uchwytu oprawy ziarna pozwalała na obserwację ostrza skrawającego z zakresie 120° w płaszczyźnie mocowania w mikroskopie i 180° w płaszczyźnie do niej prostopadłej. Gwintowane mocowanie oprawy ziarna pozwalało na ustalenie kierunku obserwacji zgodnie z kierunkiem pracy ostrza w czasie eksperymentów.



Rys. 5.19. Przyrządy mocowania próbek do badań mikroskopowych: a) mocowanie próbki badanego materiału, b) mocowanie oprawy badanego ziarna

ROZDZIAŁ 6

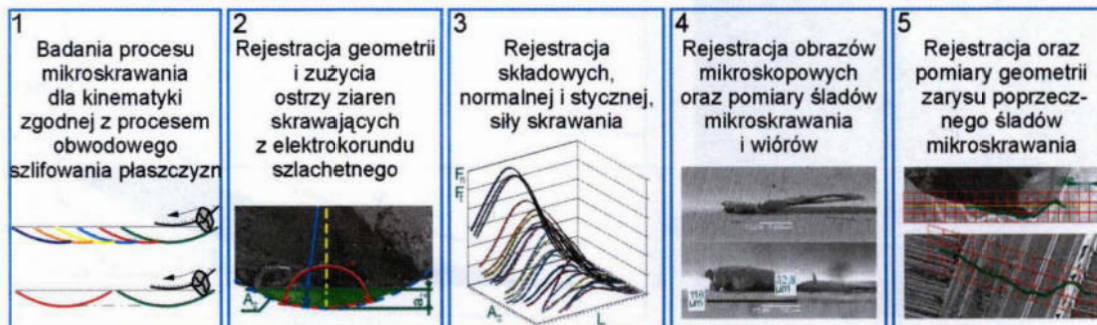
BADANIA PROCESU MIKROSKRAWANIA I ZUŻYCIA ZIAREN ŚCIERNYCH

6.1. Cel i zakres badań eksperymentalnych

Głównym celem badań eksperymentalnych procesu mikroskrawania była weryfikacja założeń do probabilistycznego modelu obciążenia ziaren ściernych. Zgodnie z założeniami zarówno obciążenie jak i właściwości ziaren z elektrokorundu szlachetnego, a także rozmieszczenie ziaren na powierzchni czynnej ściernicy oraz parametry obrabianej powierzchni po szlifowaniu mają charakter losowy. Badania eksperymentalne szlifowania pozwalają wyznaczyć jedynie zmianę globalną cech powierzchni czynnej z upływem czasu lub zmianę chwilową cechy globalnej. W celu określenia wpływu zjawisk zachodzących w strefie mikroskrawania na poziom i zmiany obciążenia ziarna przeprowadzono badania procesu skrawania pojedynczym ziarnem o zbadanej geometrii ostrza. Analizie poddano proces tworzenia wiórów, odkształceń plastycznych materiału oraz wpływ zużycia ziarna ściernego na jego obciążenie. Rejestrowano także obraz strefy mikroskrawania po wykruszeniu ziarna i zużycie ostrza ziarna ściernego po skrawaniu.

Zakres badań eksperymentalnych procesu mikroskrawania obejmował (rys. 6.1):

1. Badania procesu mikroskrawania dla kinematyki zgodnej z procesem obwodowego szlifowania płaszczyzn, dla prędkości skrawania $v_s=26,8\text{m/s}$, prędkości posuwu $v_p=0,001\div 0,008\text{ m/s}$ i $v_p=0,32\text{ m/s}$, grubości warstwy skrawanej przypadającej na jedno ziarno ściernie $a_z=0\div 20\text{ }\mu\text{m}$.
2. Rejestrację geometrii i zużycia ostrzy ziaren skrawających z elektrokorundu szlachetnego o wymiarze charakterystycznym $r_z=1,4\div 2,0\text{ mm}$ – mikroziarna F12 i F14 zgodnie z normą PN-ISO 8486-1.
3. Rejestrację składowej normalnej siły skrawania w zakresie pomiarowym $F_n=0\div 150\text{ N}$ i składowej stycznej $F_t=0\div 75\text{ N}$ z częstotliwością pomiaru 150 kHz.
4. Rejestrację obrazów mikroskopowych oraz pomiary śladów mikroskrawania i wiórów
5. Rejestrację profili śladów mikroskrawania oraz pomiary głębokości skrawania i powierzchni przekroju poprzecznego rysy.



Rys. 6.1. Główne elementy procedury badawczej procesu mikroskrawania

6.2. Metodyka badań

Losowe rozmieszczenie ziaren na powierzchni czynnej ściernicy, a także zróżnicowanie promieni działania ostrzy skrawających jest główną przyczyną zmian wartości grubości warstwy skrawanej oraz objętości usuwanego materiału przez pojedyncze ostrze skrawające.

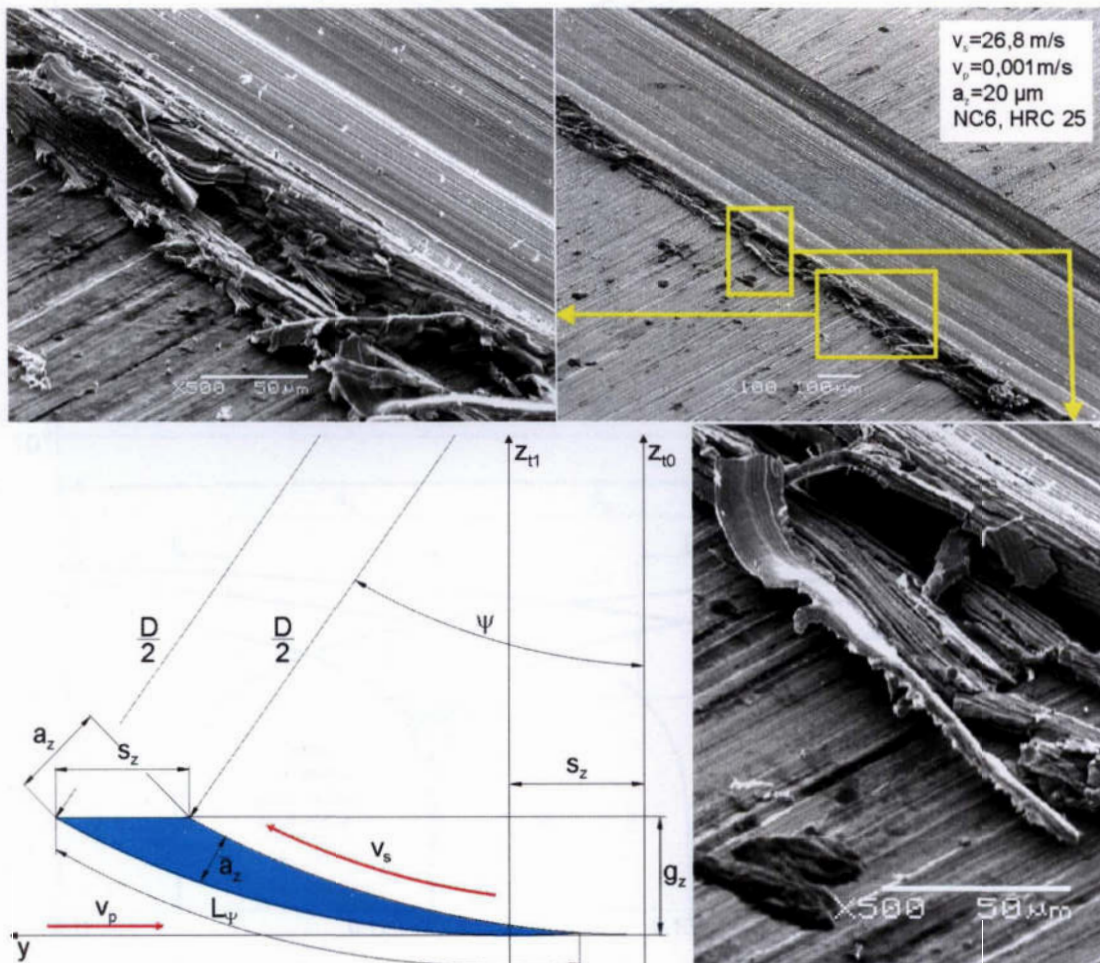
Przyjęta metoda badania procesów mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym z kinematyką typową dla szlifowania obwodowego płaszczyzn pozwala na zmianę obciążenia ziarna przez dobór grubości warstwy skrawanej.

6.2.1. Metoda obróbki pojedynczym ziarnem ściernym

Uzyskanie pojedynczych śladów pracy ziarna w postaci rysy, takich dla których kolejny kontakt z materiałem obrabianym rozpoczyna się poza końcem poprzedniego śladu wymaga odpowiedniego doboru prędkości posuwu $v_{p \min}$, przy czym wartość minimalnej prędkości posuwu jest funkcją głębokości skrawania, prędkości skrawania i średnicy ruchu obrotowego narzędzia

$$v_{p \min} = f(g_z, v_s, D), \quad (6.1)$$

Prowadzono również badania dla $v_p < v_{p \min}$ co zapewniło uzyskanie wraz ze zmniejszaniem v_p coraz bardziej regularnych rys ciągłych. Tor pracy ostrza skrawającego oraz schemat metody obróbki pojedynczym ziarnem ściernym dla prędkości posuwu $v_p < v_{p \min}$ przedstawiono na rysunku 6.2.



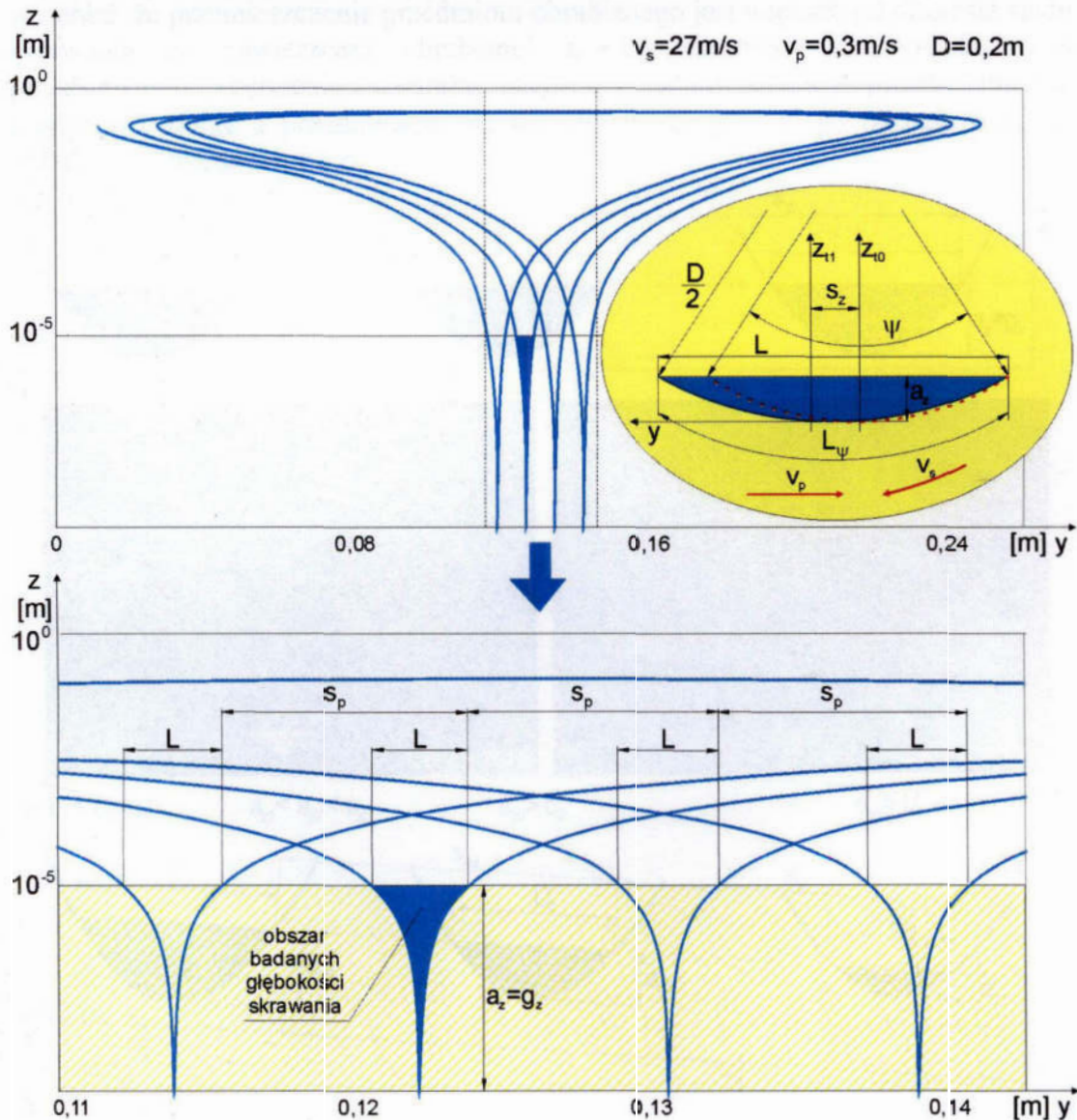
Rys. 6.2. Schemat metody obróbki pojedynczym ziarnem ściernym dla prędkości posuwu $v_p < v_{p \min}$

Przedstawione warunki pracy ostrza odpowiadają sytuacji, w której kolejne ziarno na czynnej powierzchni ściernicy nie jest przesunięte w kierunku tworzącej, a promień działania ziarna jest zbliżony do ziarna poprzedzającego. W tym przypadku grubość warstwy skrawanej zależy głównie od promienia działania ostrza oraz odległości pomiędzy ostrzami skrawającymi i stosunku prędkości v_p/v_s .

Podstawę wyznaczenia wielkości opisujących ślady skrawania oraz nastawy parametrów kinematycznych procesu skrawania stanowią matematyczne równania opisujące trajektorię ruchu pojedynczego ziarna na drodze skrawania. Po uwzględnieniu ruchu obrotowego narzędzia i ruchu posuwowego obrabianego materiału, wypadkowy ruch narzędzia odbywa się po torze będącym hipocykloidą (rys. 6.3). Równania ruchu opisujące przemieszczenie ziarna dla obrotu o kąt Ψ w układzie współrzędnych związanych z przedmiotem obrabianym wynoszą:

$$y = \frac{D}{2} \sin \psi \pm \frac{D}{2} \frac{v_p}{v_s} \psi, \quad z = \frac{D}{2} (1 - \cos \psi), \quad (6.2)$$

znak plus występuje dla odmiany przeciwbieżnej, natomiast minus dla współbieżnej.



Rys. 6.3. Wypadkowy ruch narzędzia po torze będącym hipocykloidą (w logarytmicznej skali z)

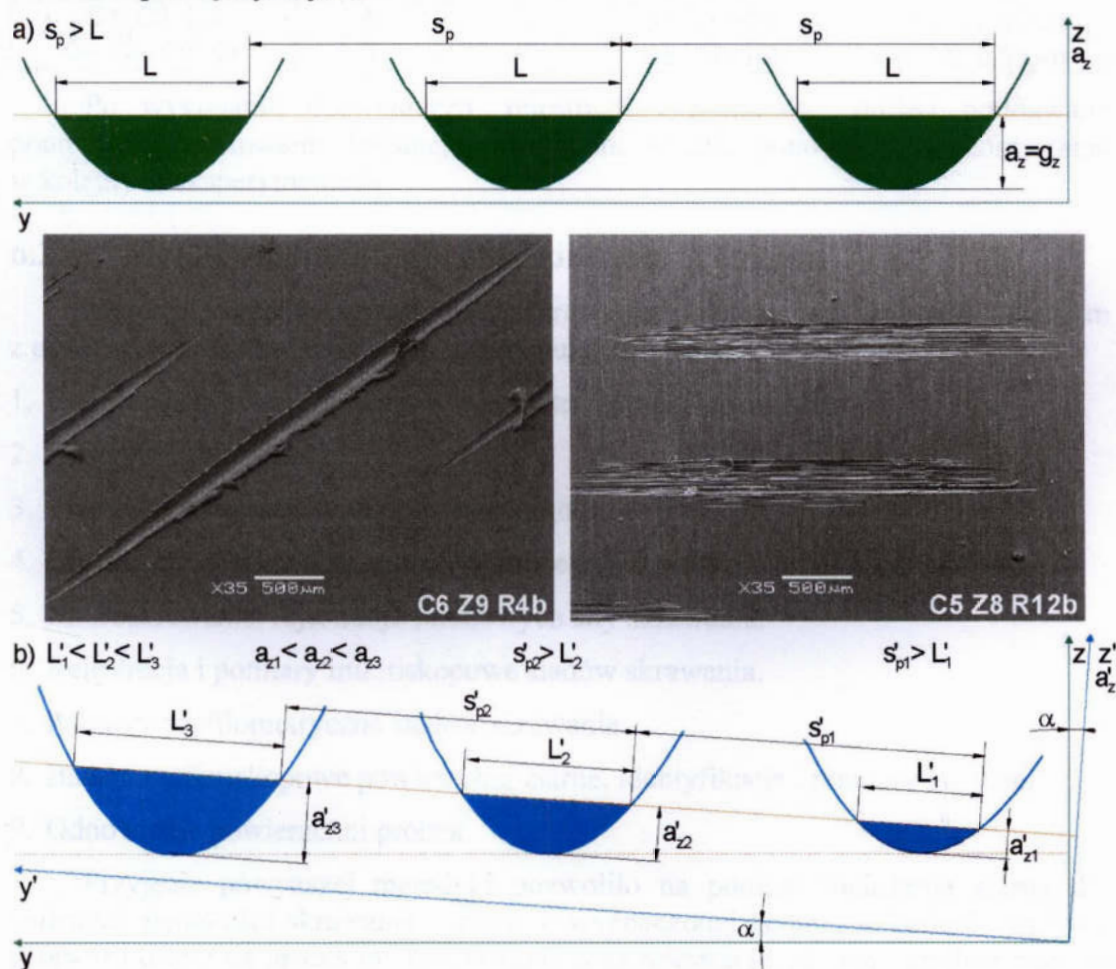
Po spełnieniu warunku $v_p > v_{p\min}$ dla zadanej głębokości skrawania g_z uzyskano warunki pracy ostrza odpowiadające maksymalnemu obciążeniu ziarna skrawającego w procesie szlifowania (rys. 6.4). Pochylenie próbki o kąt α pozwoliło na nastawę zadanego naddatku przypadającego na jedno ostrze skrawające.

Po pochyleniu obrabianej powierzchni pomiary i analiza geometrii rysy wymagała transformacji równań ruchu opisujących przemieszczenie ziarna polegającej na obrocie współrzędnych y i z wokół osi Ox o kąt α . Równania wektorowe y' i z' po obrocie wynoszą:

$$y' = \left(\frac{D}{2} \sin \psi \pm \frac{D}{2} \frac{v_p}{v_s} \psi \right) \cos \alpha + \left(\frac{D}{2} (1 - \cos \psi) \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right)$$

$$z' = \left(\frac{D}{2} \sin \psi \pm \frac{D}{2} \frac{v_p}{v_s} \psi \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \frac{D}{2} (1 - \cos \psi) \cos \alpha$$
(6.3)

Rysunek 6.5a przedstawia tor skrawania ostrza ziarna dla powierzchni próbki równoległej do kierunku ruchu posuwowego skrawanego materiału, po spełnieniu warunku, że przemieszczenie przedmiotu obrabianego jest większe od długości śladu skrawania na powierzchni obrabianej $s_p > L$. Natomiast na rysunku 6.5b przedstawiono spełnienie warunku $s'_{p2} > L'_2$ odpowiadające przedostatniemu kontaktowi ziarna z przedmiotem we współrzędnych y' i z' po obrocie o kąt α układu współrzędnych y i z .



Rys. 6.4. Tor skrawania ostrza ziarna: a) dla powierzchni próbki równoległej do kierunku ruchu posuwowego skrawanego materiału, b) w warunkach pochylenia próbki o kąt α

6.2.2. Przygotowanie próbek

W badaniach procesu mikroskrawania i obciążenia ziaren zastosowano dwa rodzaje próbek, wykonanych ze stali:

- narzędziowej, stopowej – NC6
- węglowej, konstrukcyjnej wyższej jakości – 45.

Po obróbce kształtującej próbki poddano obróbce cieplnej, a następnie wykańczającej obróbce powierzchni do uzyskania chropowatości $R_a=0,5 \mu\text{m}$. Badaną powierzchnię próbek szlifowano na szlifierce do płaszczyzn, ściernicą o oznaczeniu 38A–60–K5VBE. Prędkość szlifowania wynosiła $v_s=28 \text{ m/s}$, prędkość posuwu $v_p=0,4 \text{ m/s}$ oraz posuw poprzeczny $p_p=0,5 \text{ mm/skok}$. Wszystkie próbki szlifowano jednocześnie w celu zapewnienia tej samej wysokości. Po szlifowaniu próbki poddano pomiarowi chropowatości powierzchni w trzech losowo wybranych obszarach badanej powierzchni. W celu zapewnienia lepszej identyfikacji śladów skrawania, kierunek ruchu posuwowego podczas przygotowania próbek wyznaczono prostopadłe do kierunku ruchu posuwowego w czasie eksperymentów. Zestawienie zastosowanych w badaniach próbek przedstawia tablica 6.1.

Tablica 6.1. Zestawienie próbek zastosowanych w badaniach eksperymentalnych

Oznaczenie próbki	Typ próbki	Materiał próbki	Twardość próbki	Chropowatość powierzchni
J1, J2, J3	A	NC6	23÷26 HRC	$R_a=0,44\pm 0,49 \mu\text{m}$
C1, C2, C3	A	NC6	50÷52 HRC	$R_a=0,44\pm 0,47 \mu\text{m}$
C4, C5, C6, C7	B	45	65÷76 HRA	$R_a=0,45\pm 0,50 \mu\text{m}$

Po wykonaniu doświadczeń, rejestracji i pomiarów, próbki poddawano ponownemu szlifowaniu badanej powierzchni w celu ponownego wykorzystania w kolejnych eksperymentach.

6.2.3. Metodyka badań obróbki ziarnem ściernym

Metodyka badań procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym z elektrokorundu szlachetnego była następująca:

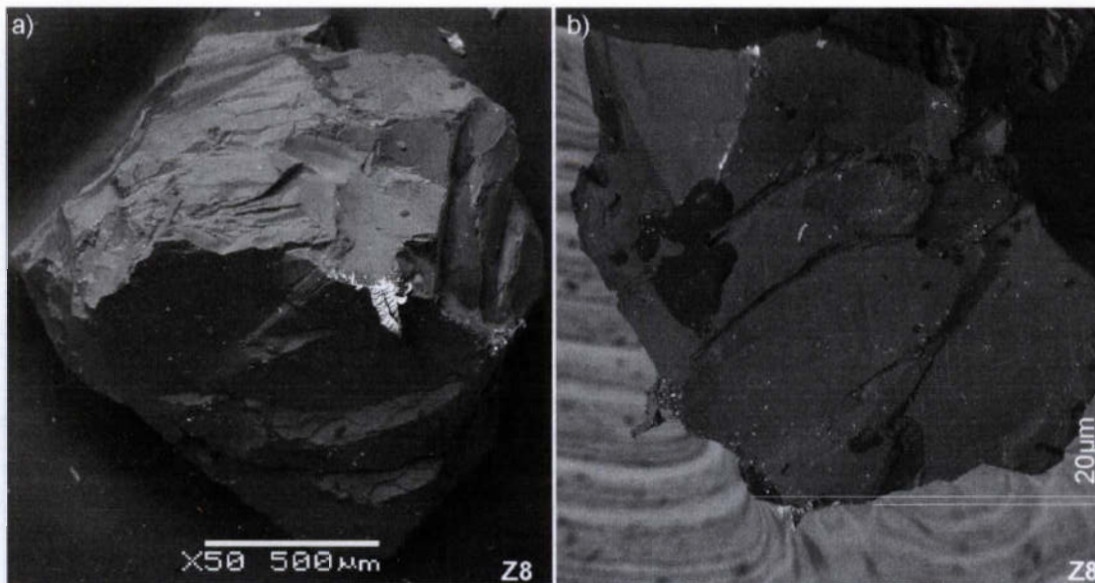
1. Rejestracja powierzchni ziarna i geometrii ostrza skrawającego.
2. Przygotowanie próbek.
3. Przygotowanie stanowiska obróbkowego.
4. Dosunięcie wierzchołka ziarna do powierzchni próbki w ustalonym miejscu.
5. Mikroskrawanie, rejestracja składowych siły skrawania.
6. Rejestracja i pomiary mikroskopowe śladów skrawania.
7. Pomiary profilometryczne śladów skrawania.
8. Badania mikroskopowe powierzchni ziarna, identyfikacja i pomiary zużycia.
9. Odnowienie powierzchni próbek.

Przyjęcie powyższej metodyki pozwoliło na pomiar obciążenia ziarna dla zmiennej głębokości skrawania ostrzem o wyznaczonej geometrii, badanie wpływu geometrii ostrza na proces mikroskrawania oraz rejestrację, pomiar i analizę zużycia ziarna skrawającego.

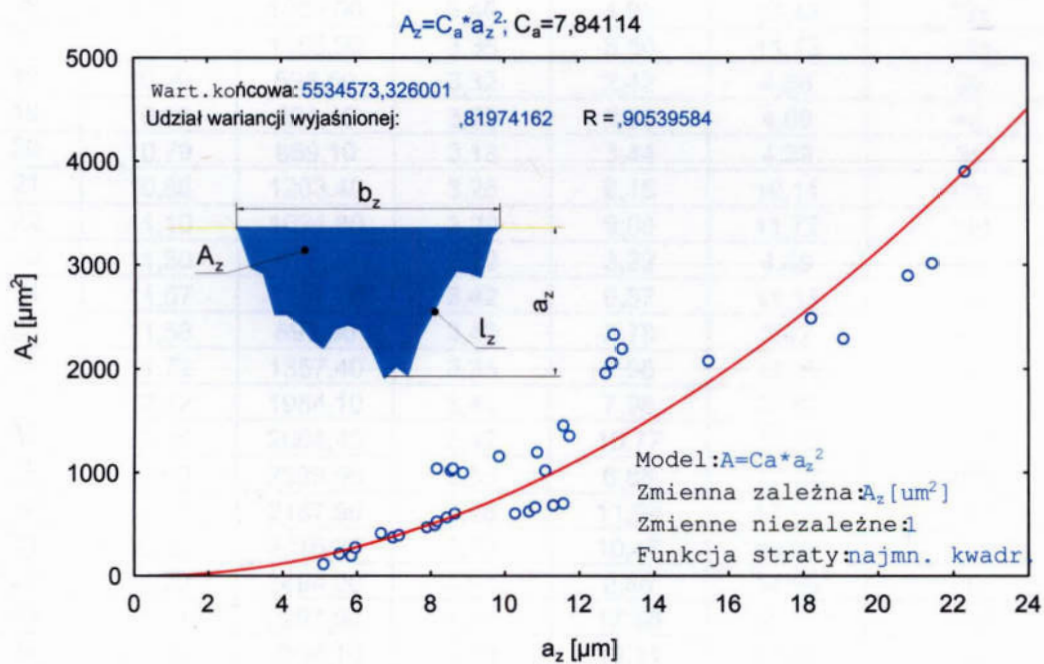
6.3. Wyniki badań

6.3.1. Badania obciążenia ziaren w procesie mikroskrawania

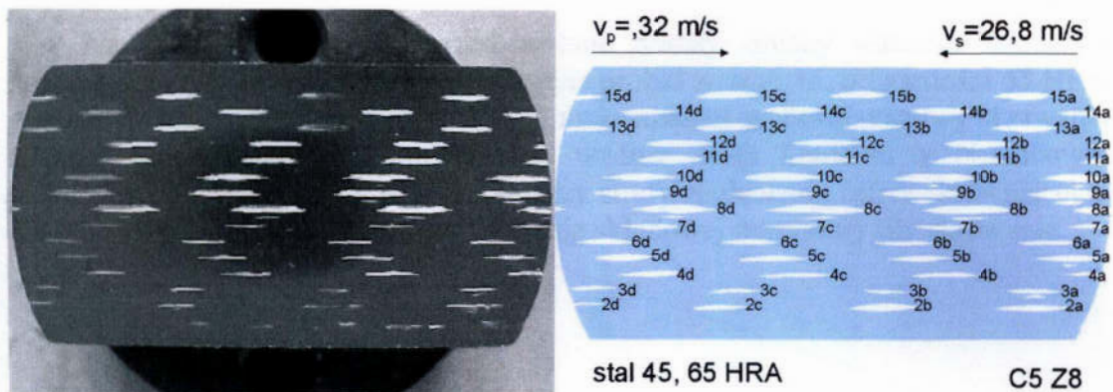
Wyniki pomiarów składowych F_n i F_t siły w procesie mikroskrawania, ziarnem oznaczonym Z8 o geometrii przedstawionej na rysunku 6.5, próbki o oznaczeniu C5 wykonanej ze stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości – 45 o twardości 65 HRA zestawiono w tabelicy 6.2. Proces mikroskrawania prowadzono dla prędkości skrawania $v_s=26,80$ m/s, prędkości posuwu przedmiotu $v_p=0,32$ m/s i głębokości skrawania $g_z=5\div 20$ μm . Zależność pola przekroju warstwy skrawanej A_z do grubości warstwy skrawanej a_z przedstawiono na rysunku 6.6, a powierzchnię próbki C5 wraz ze śladami pojedynczych skrawań przedstawia na rysunek 6.7.



Rys. 6.5. Geometria ostrza ziarna z elektrokorundu szlachetnego oznaczonego Z8



Rys. 6.6. Pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w funkcji grubości warstwy skrawanej a_z dla ziarna o oznaczeniu Z8

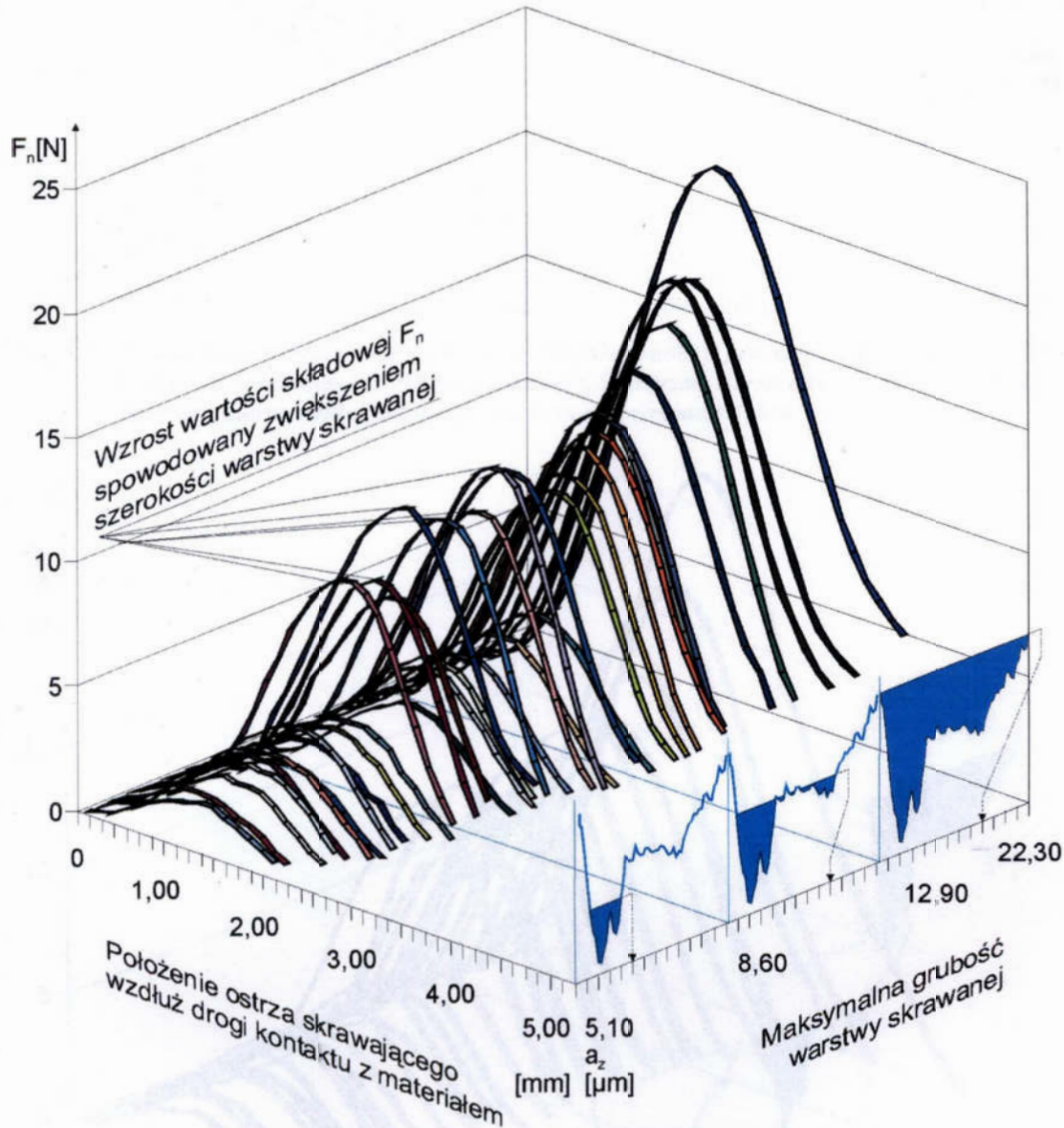


Rys. 6.7. Powierzchnia próbki C5 z widocznymi śladami skrawania ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8

Tablica 6.2. Zestawienie pomiarów dla próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5)

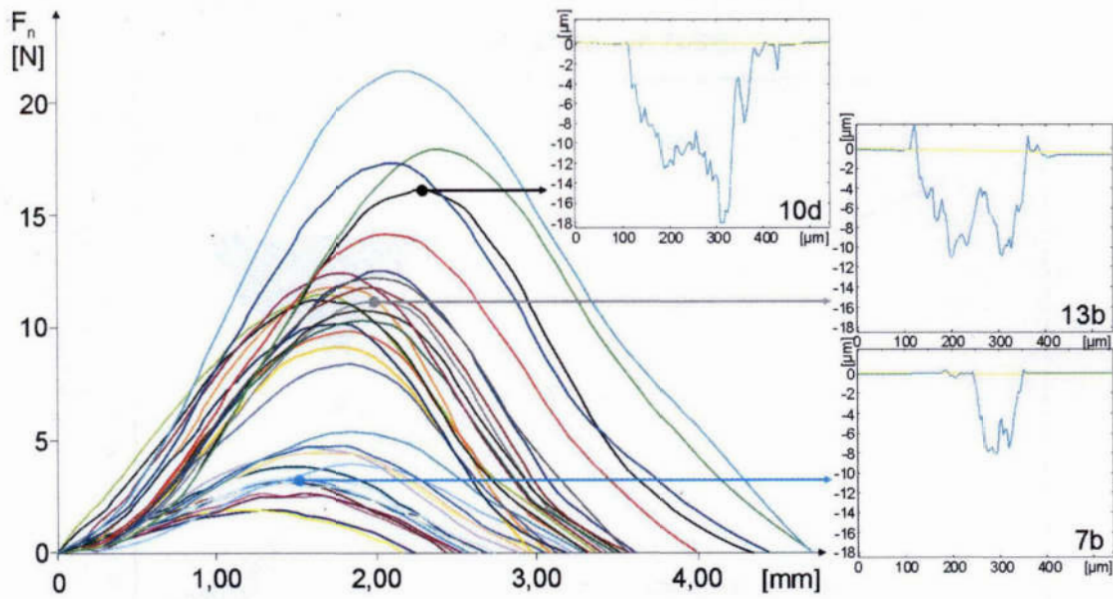
Lp	a_z [μm]	A_z [μm^2]	L [mm]	$F_t \text{ MAX}$ [N]	$F_n \text{ MAX}$ [N]	Oznaczenie rysy
1	5,10	109,80	2,22	1,25	1,90	3c
2	5,54	219,10	2,28	0,88	1,90	3b
3	5,86	188,60	2,49	1,46	2,64	2c
4	5,94	268,50	2,60	0,95	3,08	3a
5	6,67	414,00	2,65	2,42	3,08	6d
6	6,95	381,90	2,76	2,86	3,08	7d
7	7,12	398,80	2,64	1,83	2,64	7c
8	7,92	472,40	2,87	3,22	3,81	5d
9	8,14	486,10	2,85	1,83	3,08	7b
10	8,16	1040,90	2,23	2,49	9,81	15a
11	8,18	523,30	2,81	2,34	3,22	6c
12	8,42	563,60	2,89	1,83	3,37	6b
13	8,55	1014,50	2,04	5,49	9,08	15c
14	8,59	1050,30	2,16	4,10	8,35	15b
15	8,65	600,00	2,98	1,17	3,96	6a
16	8,86	1003,00	3,46	4,98	11,43	13a
17	9,85	1156,90	3,35	8,50	11,13	13c
18	10,29	598,50	3,32	2,42	4,54	5b
19	10,66	621,40	3,22	3,96	4,69	4d
20	10,79	669,10	3,13	3,44	4,39	5c
21	10,86	1203,40	3,28	6,15	10,11	14c
22	11,10	1024,80	3,29	9,08	11,72	14d
23	11,30	678,50	3,20	3,22	4,69	4c
24	11,57	1457,70	3,42	6,37	11,13	13b
25	11,58	697,90	3,43	2,78	5,42	4b
26	11,72	1357,40	3,35	4,98	10,25	14b
27	12,72	1964,10	3,44	7,98	10,69	12c
28	12,89	2064,40	3,42	10,77	11,72	12d
29	12,90	2328,50	3,53	6,88	12,16	12b
30	13,16	2187,90	3,58	11,94	12,45	11d
31	15,45	2076,30	3,72	10,47	12,30	11c
32	18,22	2494,00	4,05	8,86	14,06	11b
33	19,11	2291,90	4,21	17,36	16,11	10d
34	20,81	2896,10	4,59	13,11	17,87	10b
35	21,45	3017,00	4,55	16,99	17,29	10c
36	22,30	3907,80	4,71	17,36	21,39	9b

Na rysunkach 6.8 i 6.9 przedstawione zostały zmiany wartości składowej normalnej F_n siły w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8 w funkcji maksymalnej grubości warstwy skrawanej a_z oraz położenia ostrza skrawającego wzdłuż drogi kontaktu z obrabianym materiałem. Na rysunku 6.8 wyróżniono trzy strefy zagłębienia ostrza skrawającego, dla których otrzymano znaczące zwiększenie składowej normalnej siły skrawania.

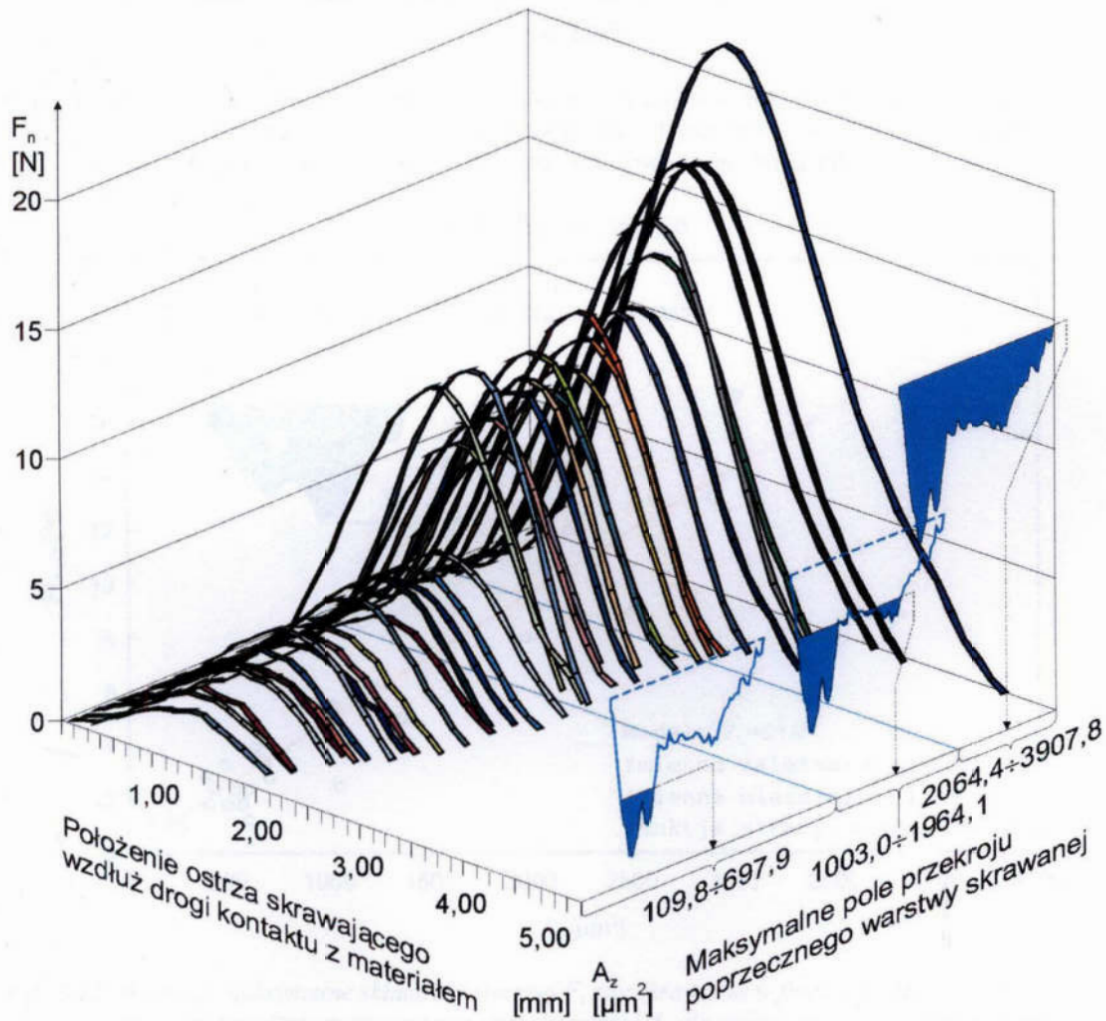


Rys. 6.8. Zmiany wartości składowej normalnej F_n siły skrawania w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8 w funkcji maksymalnej grubości warstwy skrawanej a_z oraz położenia ostrza skrawającego wzdłuż drogi kontaktu z materiałem obrabianym

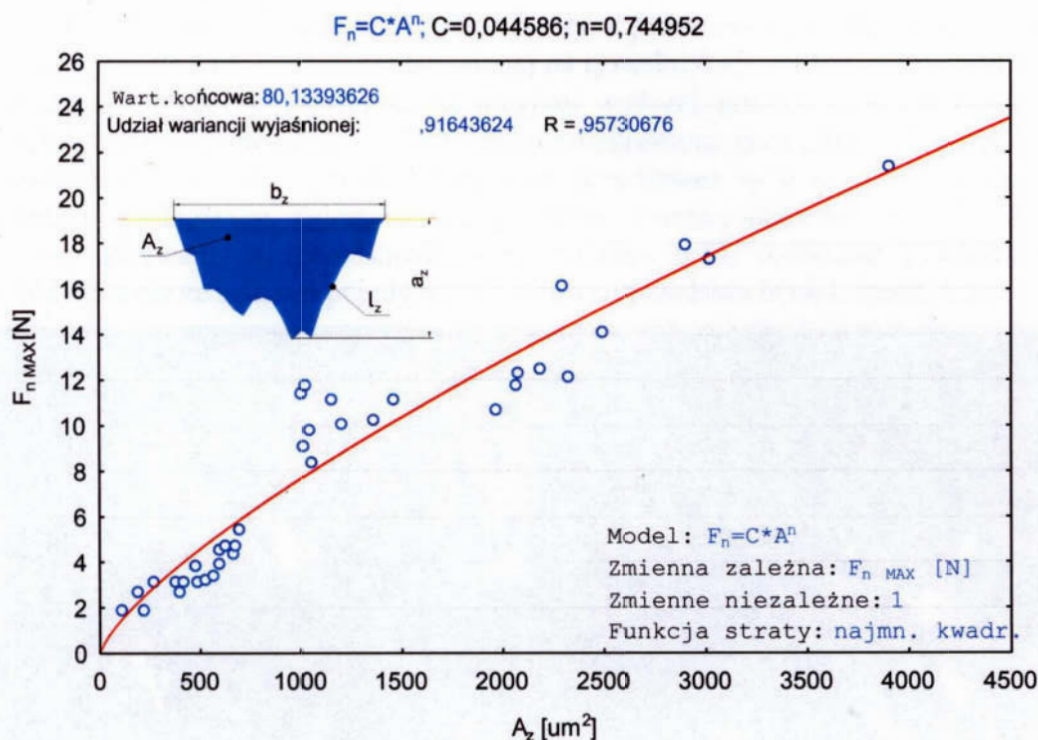
Na rysunku 6.10 przedstawione zostały zmiany wartości składowej normalnej F_n siły w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8 w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego śladu skrawania A_z w trzech obszarach zagłębienia ostrza. Rysunki 6.11 i 6.12 przedstawiają odpowiednio wartości maksymalne składowej normalnej F_n i stycznej F_t siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45 skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8.



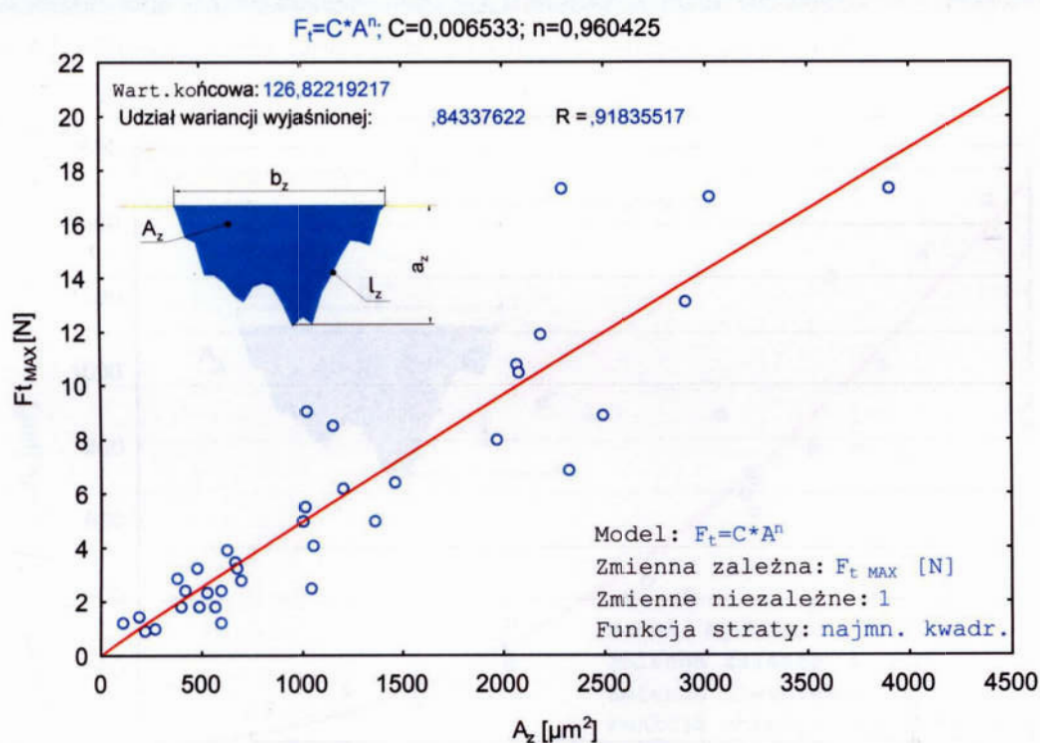
Rys. 6.9. Zmiany wartości składowej normalnej F_n siły skrawania w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8 w funkcji położenia ziarna wzdłuż drogi kontaktu z obrabianym materiałem



Rys. 6.10. Zmiany wartości składowej normalnej F_n siły skrawania w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8 w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z oraz położenia ostrza skrawającego wzdłuż drogi kontaktu z obrabianym materiałem

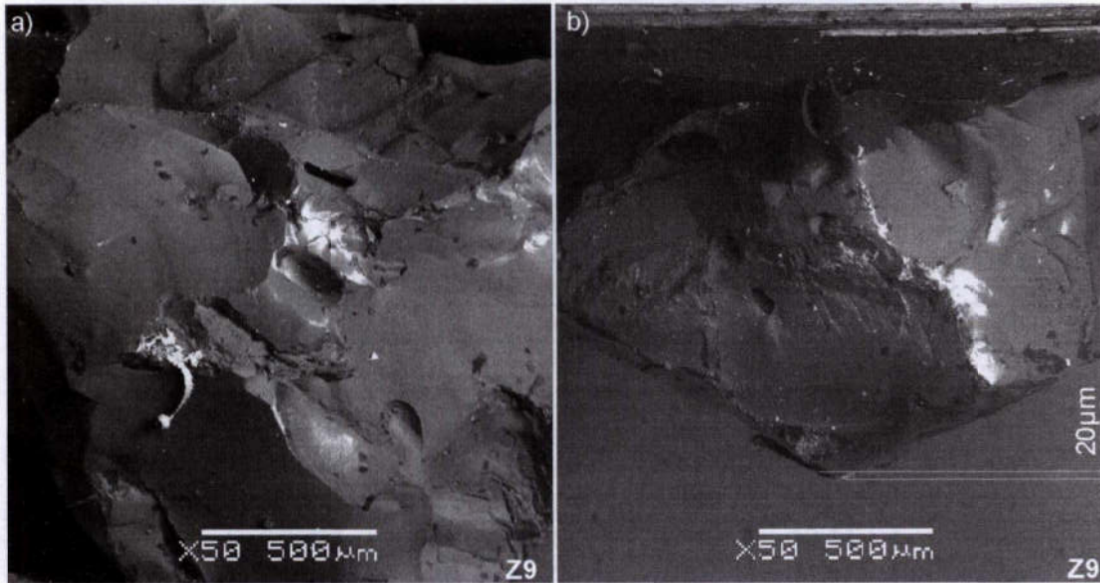


Rys. 6.11. Wartości maksymalne składowej normalnej F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5) skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8

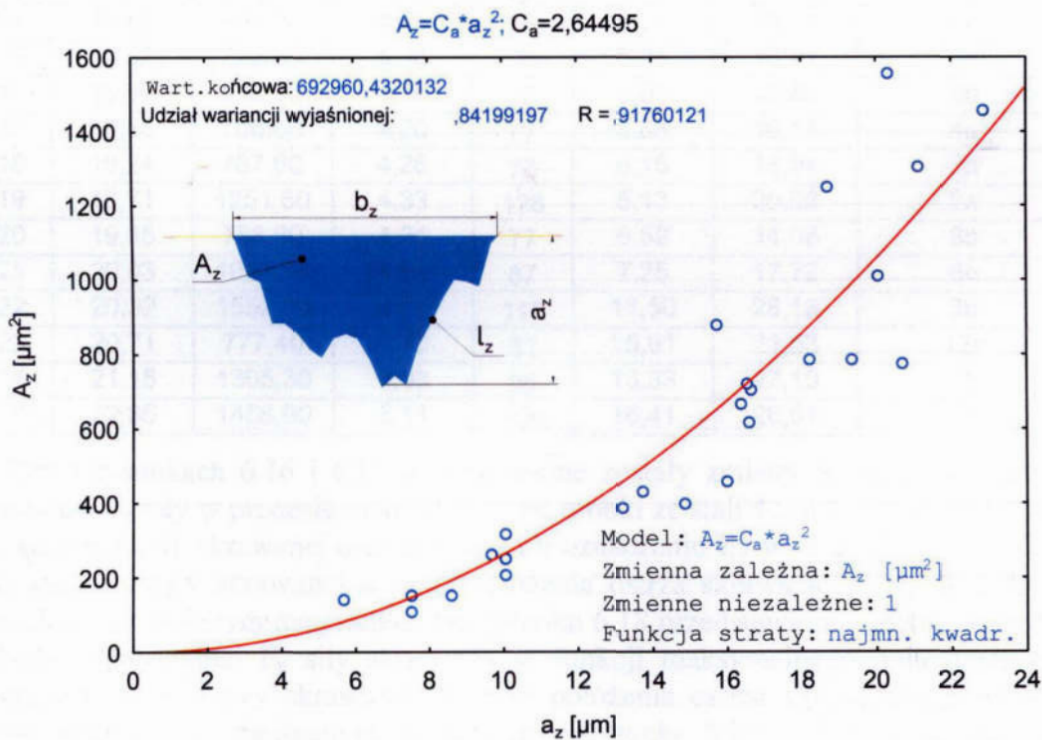


Rys. 6.12. Wartości maksymalne składowej stycznej F_t siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5) skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8

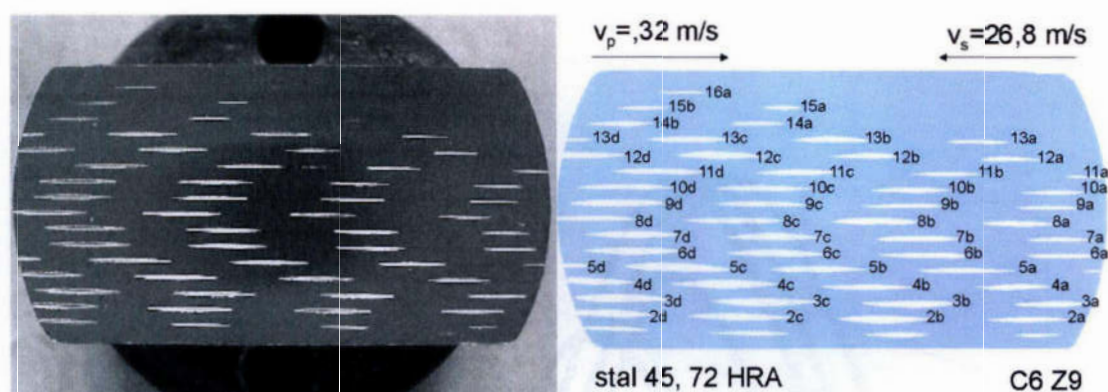
Wyniki pomiarów składowych F_n i F_t siły w procesie mikroskrawania, ziarnem oznaczonym Z9 o geometrii przedstawionej na rysunku 6.13, próbki o oznaczeniu C6 wykonanej ze stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości – 45, o twardości 72 HRA zestawiono w tablicy 6.3. Proces mikroskrawania prowadzono dla prędkości skrawania $v_s=26,80$ m/s, prędkości posuwu przedmiotu $v_p=0,32$ m/s i głębokości skrawania $g_z=5\div 20$ μm . Zależność pola przekroju warstwy skrawanej A_z do grubości warstwy skrawanej a_z przedstawiono na rysunku 6.14, natomiast powierzchnię próbki C5 wraz ze śladami pojedynczych skrawań przedstawia na rysunek 6.15.



Rys. 6.13. Geometria ostrza ziarna z elektrokorundu szlachetnego oznaczonego Z9



Rys. 6.14. Pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w funkcji grubości warstwy skrawanej a_z dla ziarna o oznaczeniu Z9

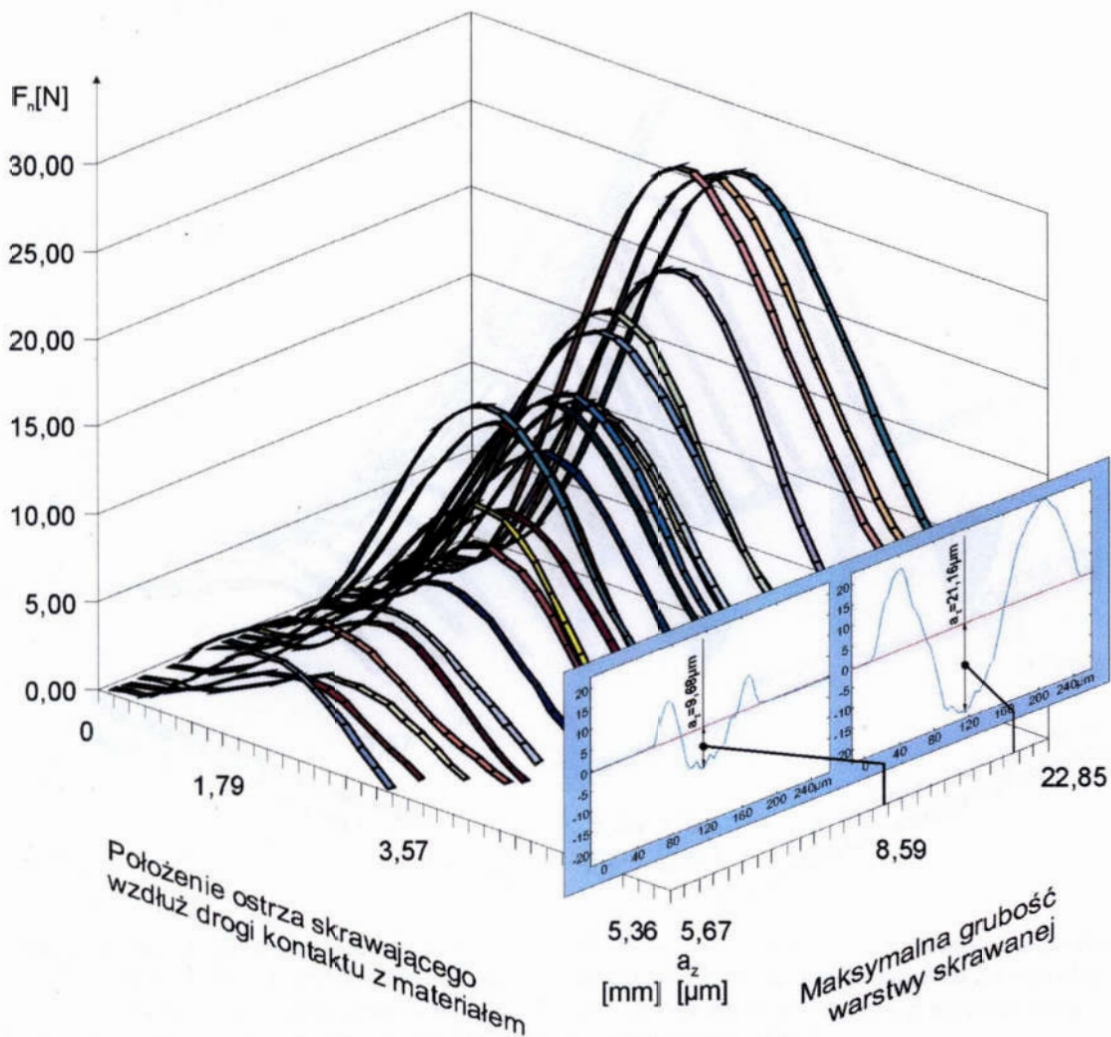


Rys. 6.15. Powierzchnia próbki C6 z widocznymi śladami skrawania ostrza ziarna o oznaczeniu Z9

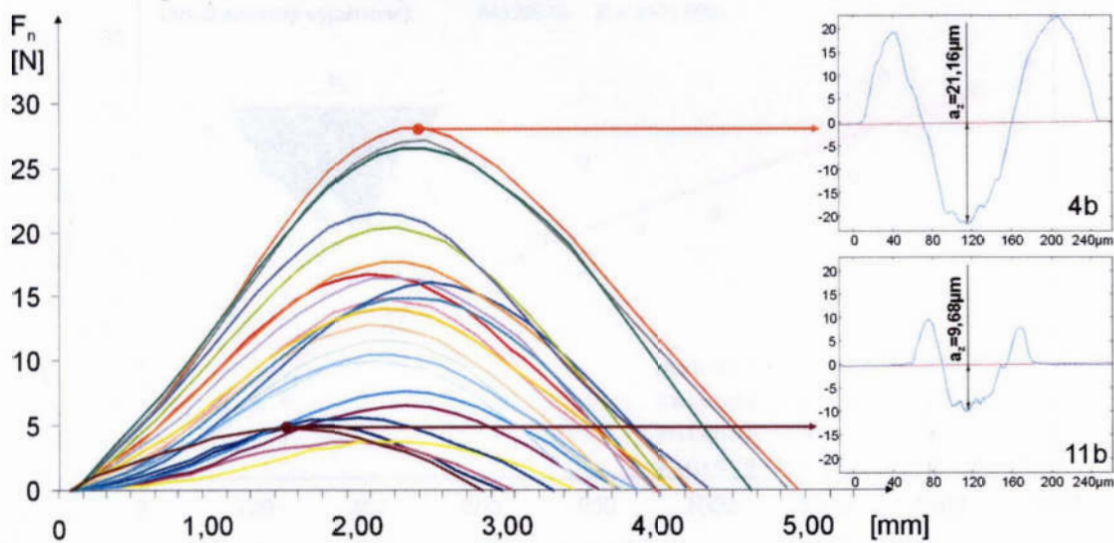
Tablica 6.3. Zestawienie pomiarów dla próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej ziarnem o oznaczeniu Z9

Lp	a_z [μm]	A_z [μm^2]	L [mm]	b_z [μm]	$F_t \text{ MAX}$ [N]	$F_n \text{ MAX}$ [N]	Oznaczenie rysy
1	5,67	139,70	2,87	72	2,56	4,98	14a
2	7,54	110,30	2,91	48	0,73	3,81	13a
3	7,54	152,80	2,90	40	0,51	3,81	12a
5	9,68	263,10	3,48	51	1,98	6,59	11b
6	10,03	205,30	3,29	42	1,68	4,83	10a
8	10,08	250,90	3,30	51	1,76	5,71	9a
9	13,20	387,30	3,59	57	1,68	7,62	8a
10	13,72	432,90	3,91	69	3,74	10,11	12b
11	14,88	397,30	3,91	75	5,20	11,57	13b
12	15,74	877,50	4,00	106	5,57	16,85	3a
13	15,99	460,20	4,02	55	4,25	10,55	10b
14	16,38	667,00	4,44	75	8,57	14,94	11c
15	16,57	722,80	4,38	76	5,05	16,41	5a
16	16,57	618,90	4,16	73	5,05	12,89	9b
17	16,66	706,60	4,20	77	3,88	16,11	4a
18	18,24	787,60	4,25	76	6,15	14,94	7b
19	18,71	1251,60	4,33	128	5,13	20,36	2a
20	19,35	788,90	4,31	77	6,59	14,06	8b
21	20,03	1007,70	4,55	87	7,25	17,72	6b
22	20,32	1559,00	4,77	118	11,50	28,13	3b
23	20,71	777,40	4,76	81	15,01	21,53	12c
24	21,16	1305,30	4,93	98	13,33	27,10	4b
26	22,85	1458,90	5,11	104	16,41	26,51	5b

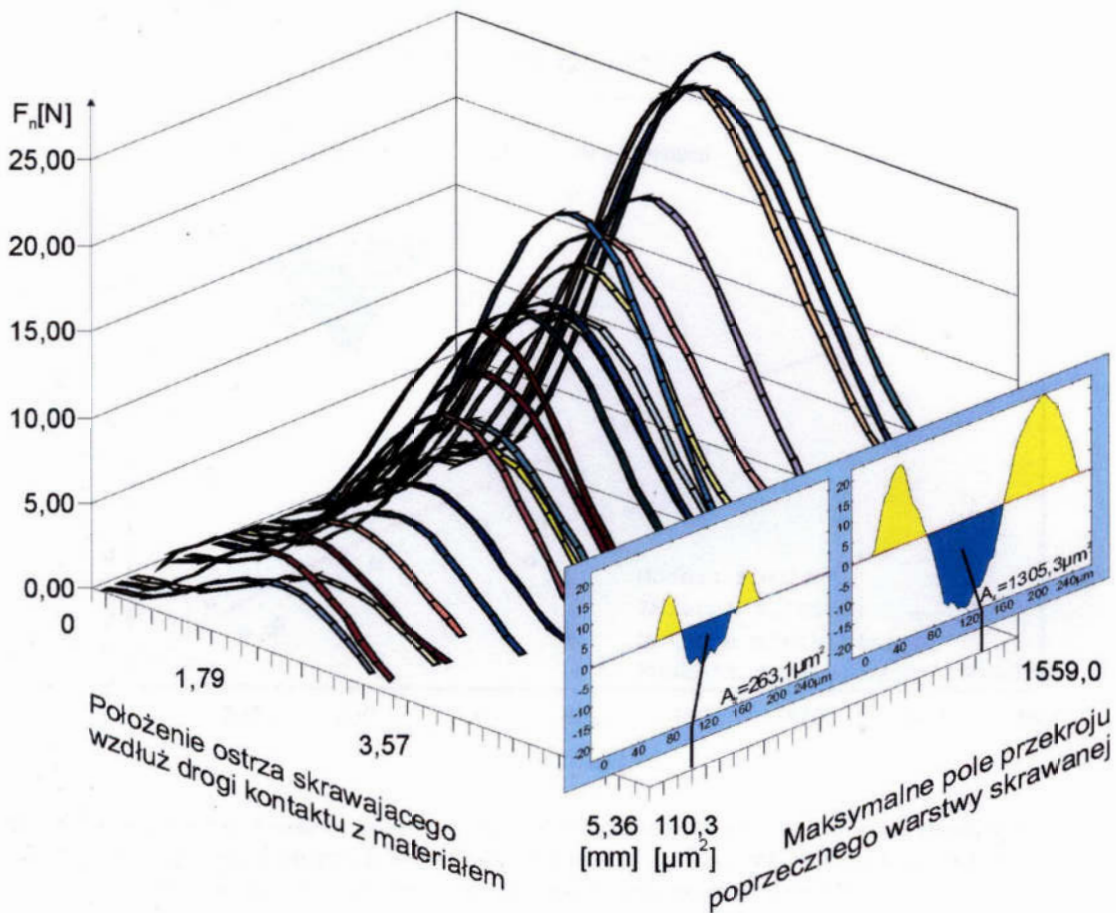
Na rysunkach 6.16 i 6.17 przedstawione zostały zmiany wartości składowej normalnej F_n siły w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9 w funkcji maksymalnej grubości warstwy skrawanej a_z oraz położenia ostrza skrawającego wzdłuż drogi kontaktu z obrabianym materiałem. Na rysunku 6.18 przedstawiono zmiany wartości składowej normalnej F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z oraz położenia ostrza skrawającego wzdłuż drogi kontaktu z obrabianym materiałem. Rysunki 6.19 i 6.20 przedstawiają odpowiednio wartości maksymalne składowej normalnej F_n i stycznej F_t siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA, skrawanej ostrzem ziarna Z9.



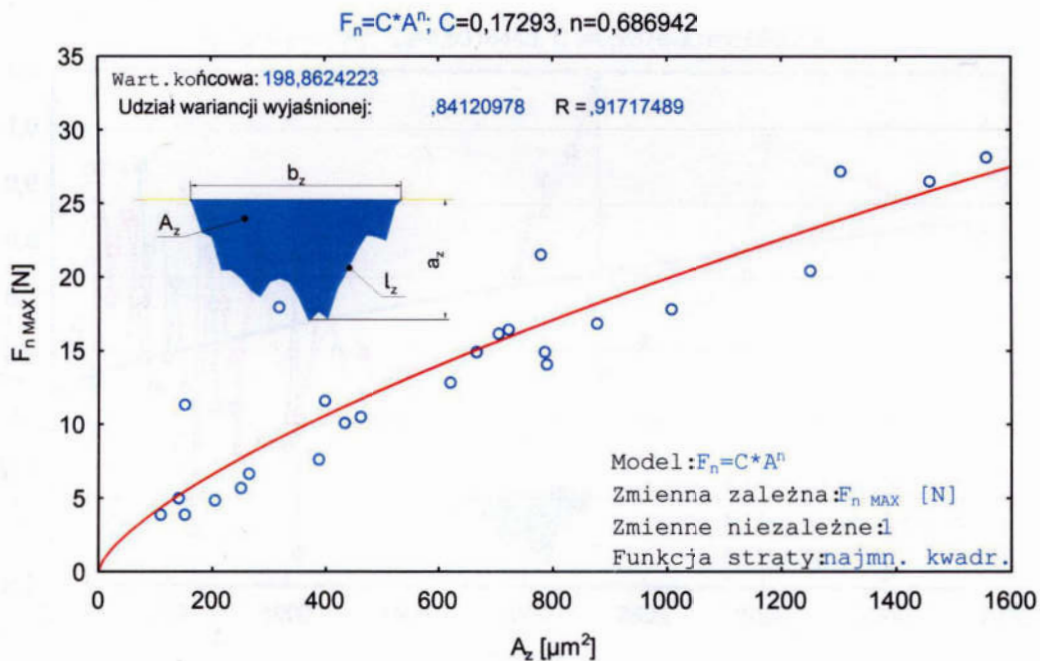
Rys. 6.16. Zmiany wartości składowej normalnej F_n siły skrawania w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9 w funkcji maksymalnej grubości warstwy skrawanej a_z oraz położenia ostrza skrawającego wzdłuż drogi kontaktu z obrabianym materiałem



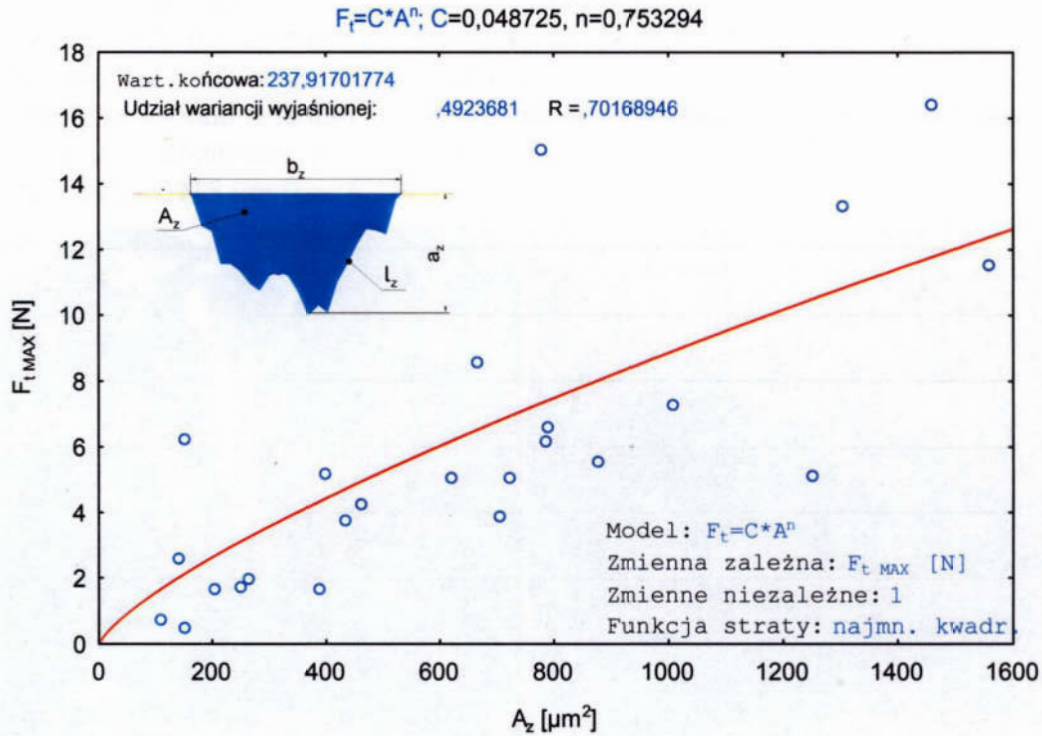
Rys. 6.17. Zmiany wartości składowej normalnej F_n siły skrawania w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9 w funkcji położenia ziarna wzdłuż drogi kontaktu z materiałem



Rys. 6.18. Zmiany wartości składowej normalnej F_n siły skrawania w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9 w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z oraz położenia ostrza skrawającego wzdłuż drogi kontaktu z obrabianym materiałem L



Rys. 6.19. Wartości maksymalne składowej normalnej F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, ulepszonej cieplnie do twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9



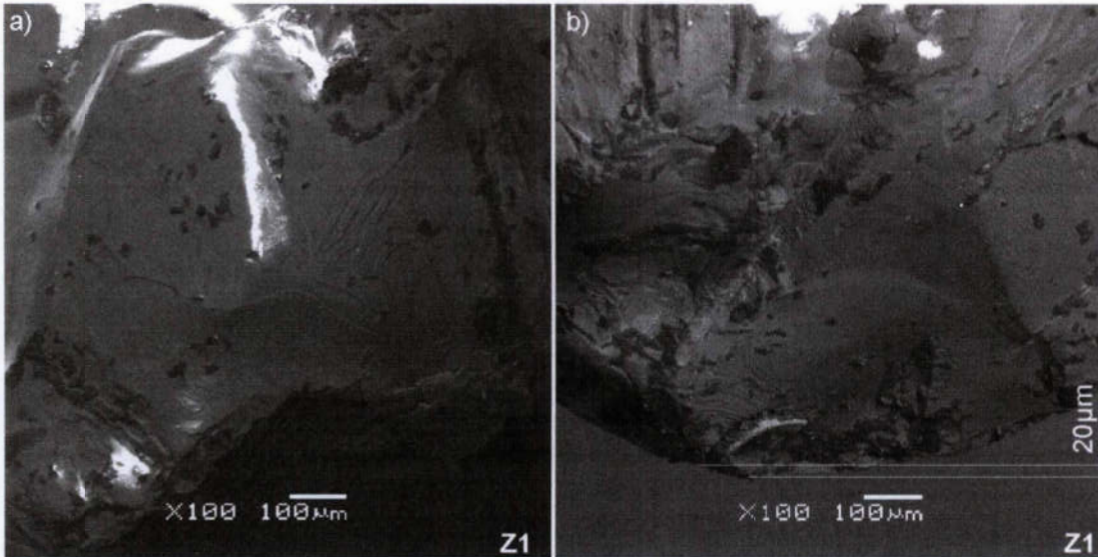
Rys. 6.20. Wartości maksymalne składowej stycznej F_t siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9

Stosunek wartości składowej stycznej do składowej normalnej F_t / F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbek C5, skrawanej ziarnem o oznaczeniu Z8 oraz próbki C6, skrawanej ziarnem Z9.

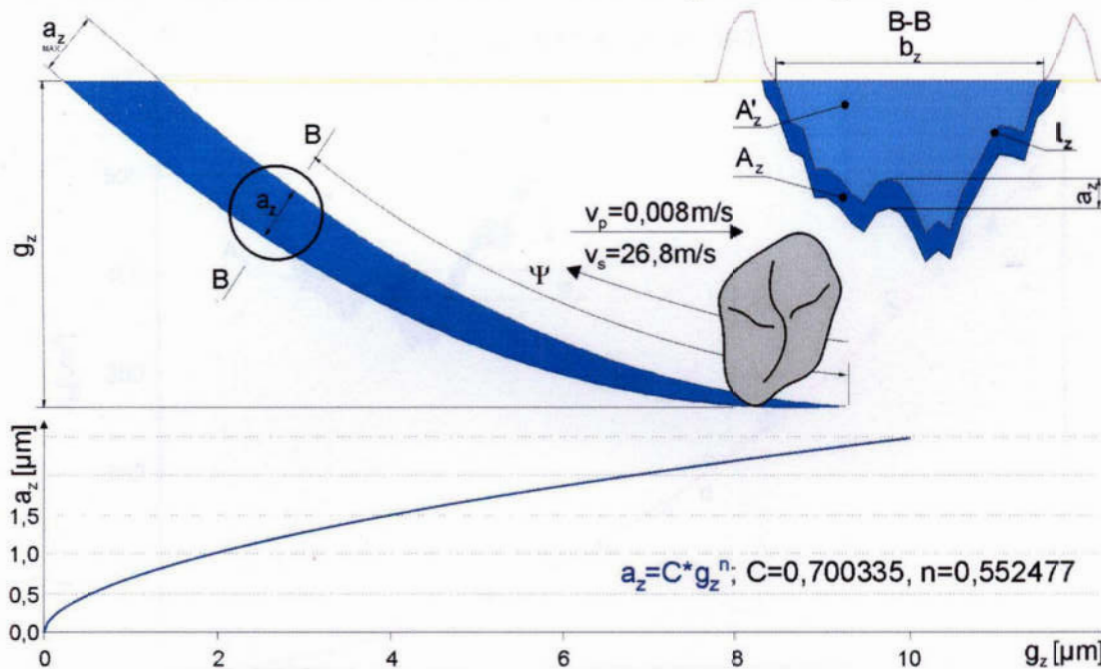


Rys. 6.21. Stosunek wartości składowej stycznej do składowej normalnej F_t / F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbek C5 i C6, skrawanych ziarnami oznaczonymi Z8 i Z9

Wyniki pomiarów składowych F_n i F_t siły w procesie mikroskrawania, ziarnem oznaczonym Z1 o geometrii przedstawionej na rysunku 6.22, próbki o oznaczeniu C4 wykonanej ze stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości – 45, o twardości 76 HRA zestawiono w tablicy 6.4. Proces mikroskrawania prowadzono dla prędkości skrawania $v_s=26,80$ m/s, prędkości posuwu przedmiotu $v_p=0,008$ m/s i głębokości skrawania $g_z=0\div 15$ μm (rys. 6.23).

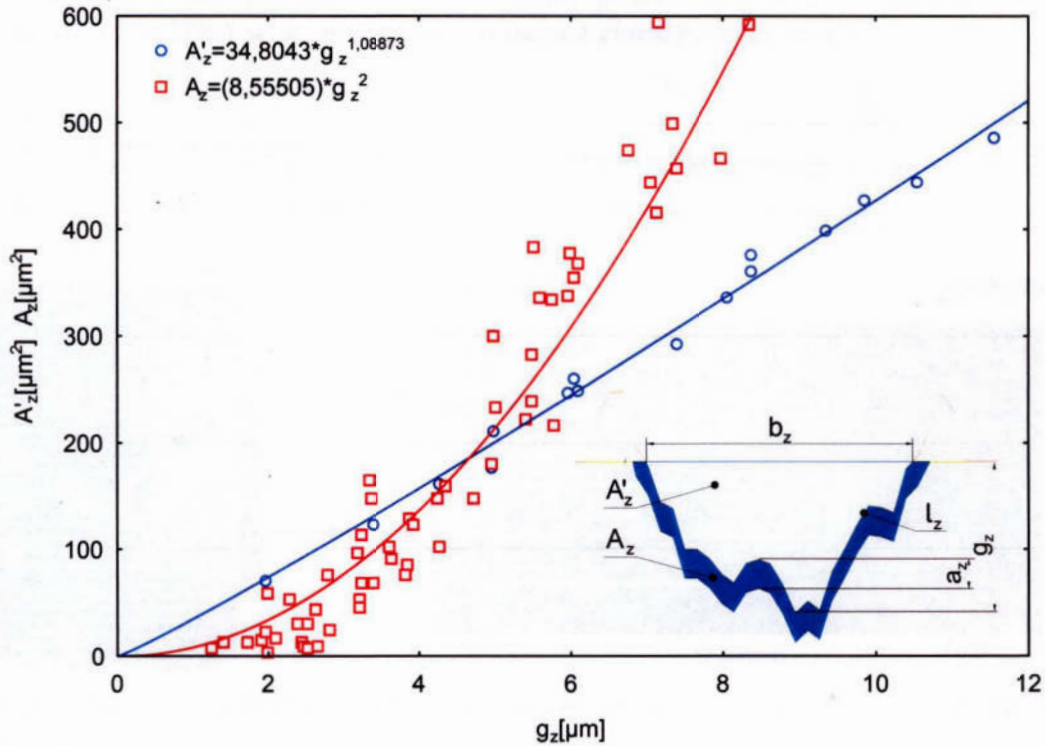


Rys. 6.22. Geometria ostrza ziarna z elektrokorundu szlachetnego oznaczonego Z1

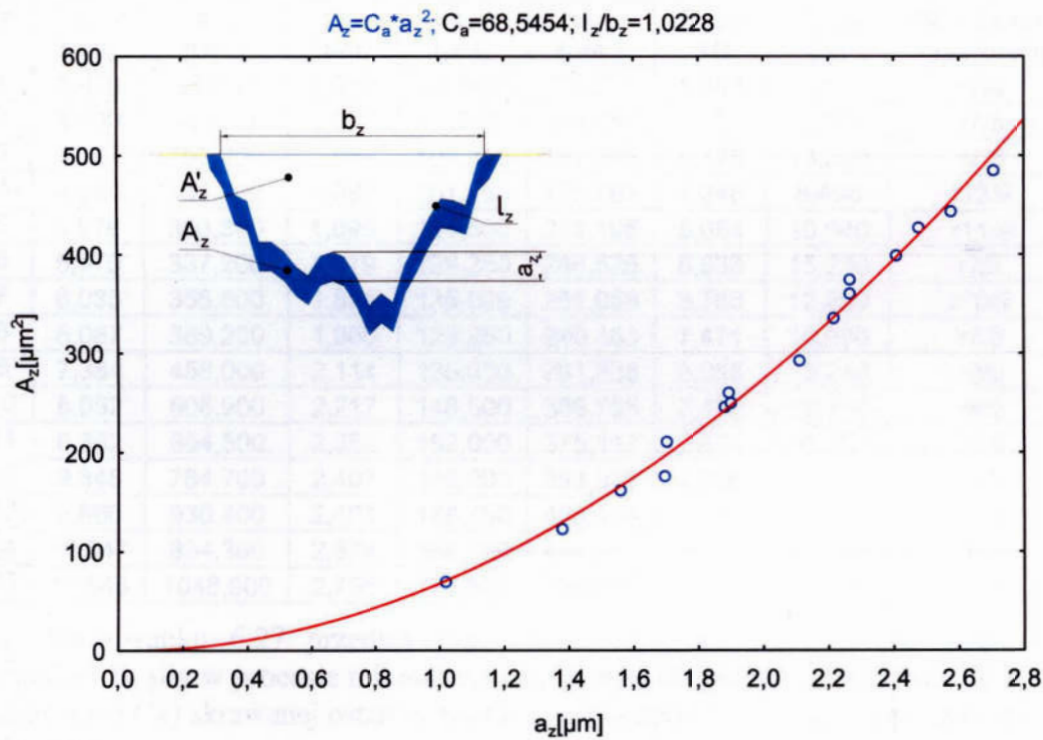


Rys. 6.23. Schemat do analizy zależności pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z i pola przekroju poprzecznego śladu skrawania A'_z oraz zależność grubości warstwy skrawanej a_z ziarnem Z1 w funkcji głębokości śladu skrawania g_z dla przyjętych warunków procesu mikroskrawania: prędkości skrawania $v_s=26,80$ m/s i prędkości posuwu $v_p=0,008$ m/s

Zależność pola przekroju poprzecznego śladu skrawania A'_z oraz pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w funkcji głębokości śladu skrawania g_z dla ziarna o oznaczeniu Z1 przedstawiono na rysunku 6.24, natomiast zależność pola przekroju warstwy skrawanej A_z do grubości warstwy skrawanej a_z przedstawiono na rysunku 6.25.

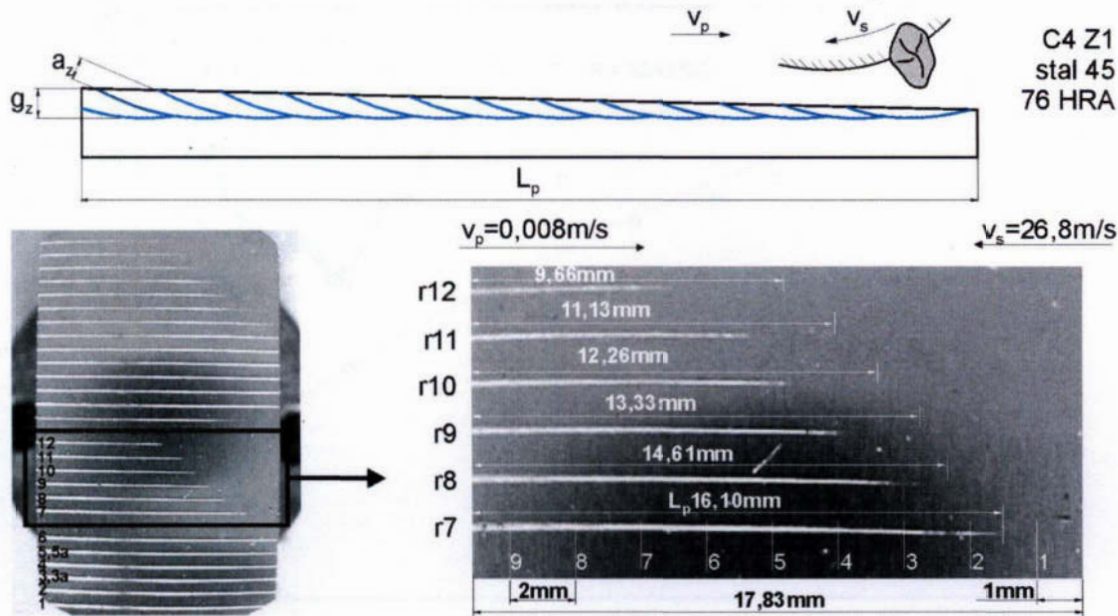


Rys. 6.24. Pole przekroju poprzecznego śladu skrawania A'_z oraz pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w funkcji głębokości śladu skrawania g_z dla ziarna o oznaczeniu Z1



Rys. 6.25. Pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w funkcji grubości warstwy skrawanej a_z dla ziarna o oznaczeniu Z1

Rysunek 6.26 przedstawia powierzchnię próbki ze stali 45 (oznaczonej C4), o twardości 76 HRA wraz ze śladami skrawania ziarnem oznaczonym Z1.

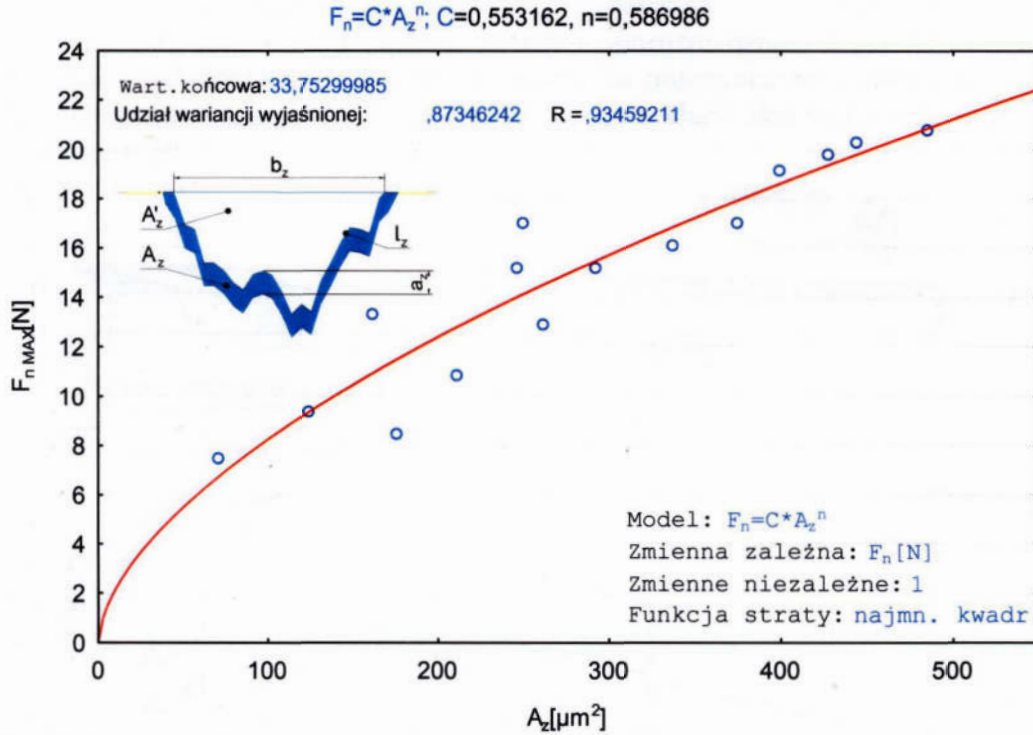


Rys. 6.26. Powierzchnia próbki C4 z widocznymi śladami skrawania ostrzem ziarna o oznaczeniu Z1

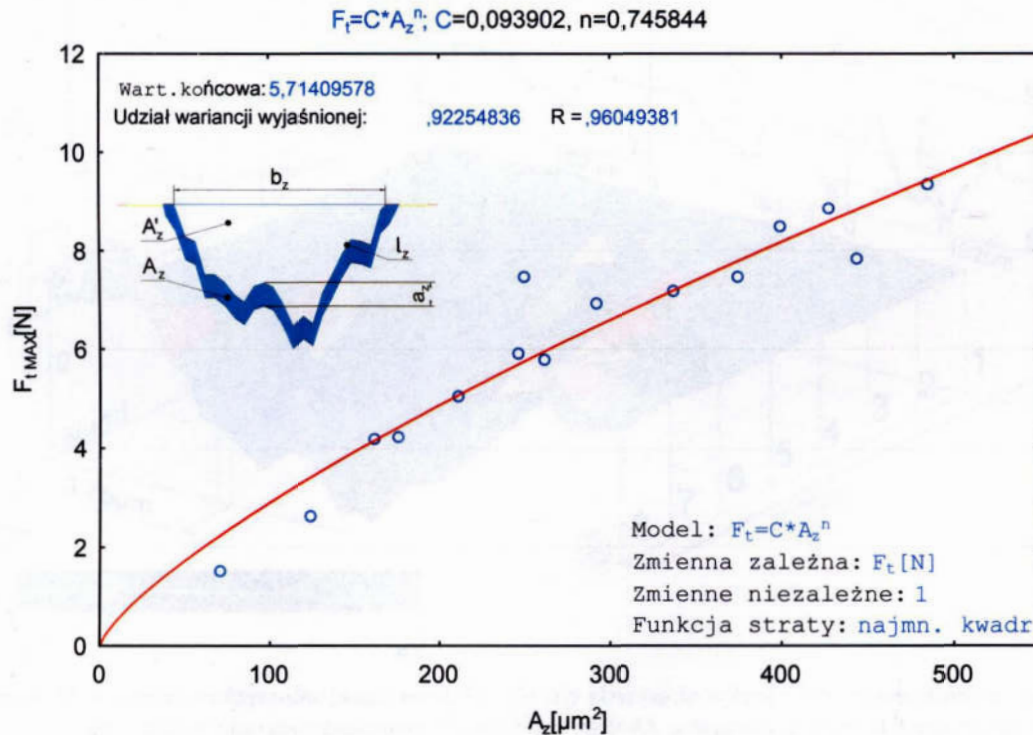
Tablica 6.4. Zestawienie pomiarów dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ziarnem o oznaczeniu Z1

Lp	gz [μm]	A'z [μm ²]	az [μm]	bz [μm]	Az [μm ²]	Ft MAX [N]	Fn MAX [N]	Oznaczenie ręsy/profil
1	1,970	23,000	1,019	67,500	70,321	1,538	7,471	r7/4
2	3,400	68,000	1,377	87,750	123,587	2,637	9,375	r7/5
3	4,267	103,200	1,561	101,250	161,666	4,175	13,330	r7/6
4	4,964	181,200	1,697	101,250	175,761	4,248	8,496	r12/9
5	4,976	300,300	1,699	121,500	211,195	5,054	10,840	r11/9
6	5,970	337,200	1,879	128,250	246,526	5,933	15,230	r7/7
7	6,035	355,600	1,891	135,000	261,058	5,786	12,890	r10/9
8	6,087	369,200	1,900	128,250	249,183	7,471	16,990	r7/8
9	7,384	458,000	2,114	135,000	291,838	6,958	15,230	r9/9
10	8,052	606,900	2,217	148,500	336,755	7,178	16,110	r8/9
11	8,362	654,500	2,264	162,000	375,117	7,471	16,990	r7/9
12	9,345	784,700	2,407	162,000	398,873	8,496	19,190	r5/9
13	9,866	930,400	2,481	168,750	428,135	8,862	19,780	r4/9
14	10,547	834,300	2,574	168,750	444,217	7,837	20,340	r6/9
15	11,543	1048,900	2,705	175,500	485,602	9,375	20,800	r3/9

Na rysunku 6.27 przedstawione zostały wartości maksymalne składowej normalnej F_n siły w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4) skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z1 w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z . Natomiast na rysunku 6.28 przedstawiono wartości maksymalne składowej stycznej F_t siły w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4) skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z1 w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z .

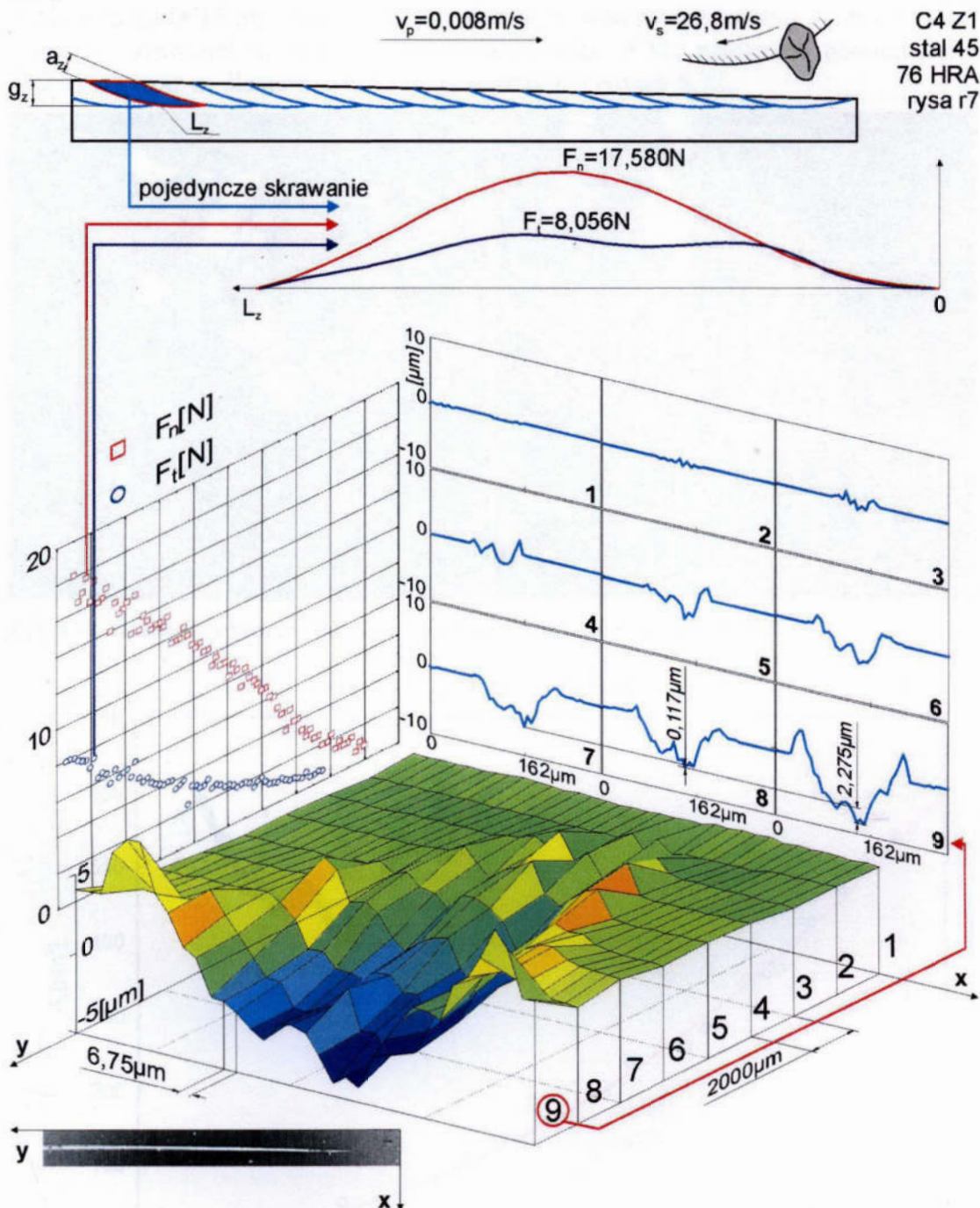


Rys. 6.27. Wartości maksymalne składowej normalnej F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z1



Rys. 6.28. Wartości maksymalne składowej stycznej F_t siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z1

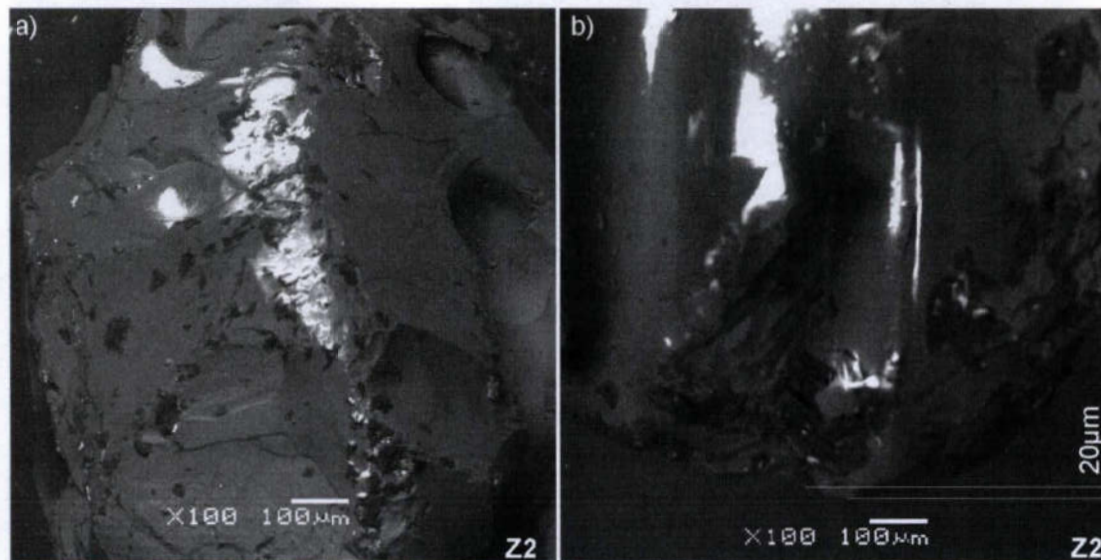
Szczegółowej analizie poddano rysę oznaczoną r7 uzyskaną w procesie mikroskrawania stali 45, o twardości 76 HRA, ziarnem oznaczonym Z1. Wartości maksymalne składowych F_t i F_n siły skrawania dla pojedynczych skrawań w funkcji drogi przemieszczenia przedmiotu wraz z profilami śladu skrawania przedstawiono na rysunku 6.29.



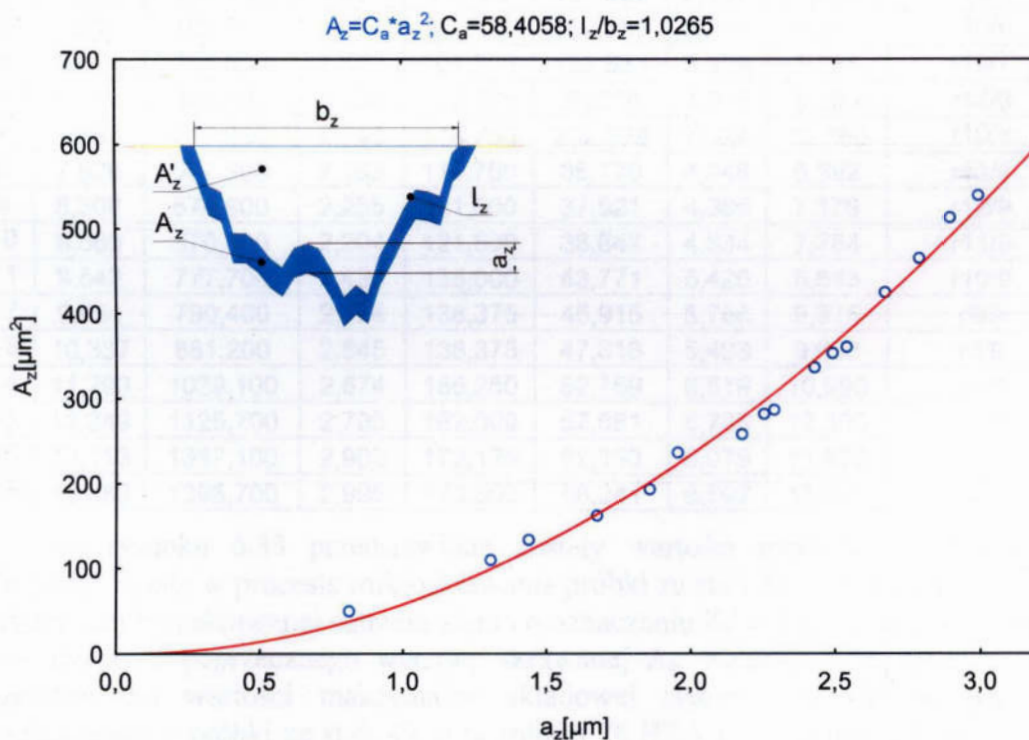
Rys. 6.29. Wartości maksymalne składowych F_t i F_n siły skrawania w funkcji drogi przemieszczenia przedmiotu dla rysy oznaczonej r7, próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4) skrawanej ziarnem oznaczonym Z1

Po przeanalizowaniu różnic pomiędzy oczekiwaną wartością głębokości skrawania, wynikającą z pochylenia próbki, a wartościami uzyskanymi z pomiarów profilometrem zaobserwowano znaczne zużycie ostrza skrawającego na drodze skrawania pomiędzy profilem 7 i 8.

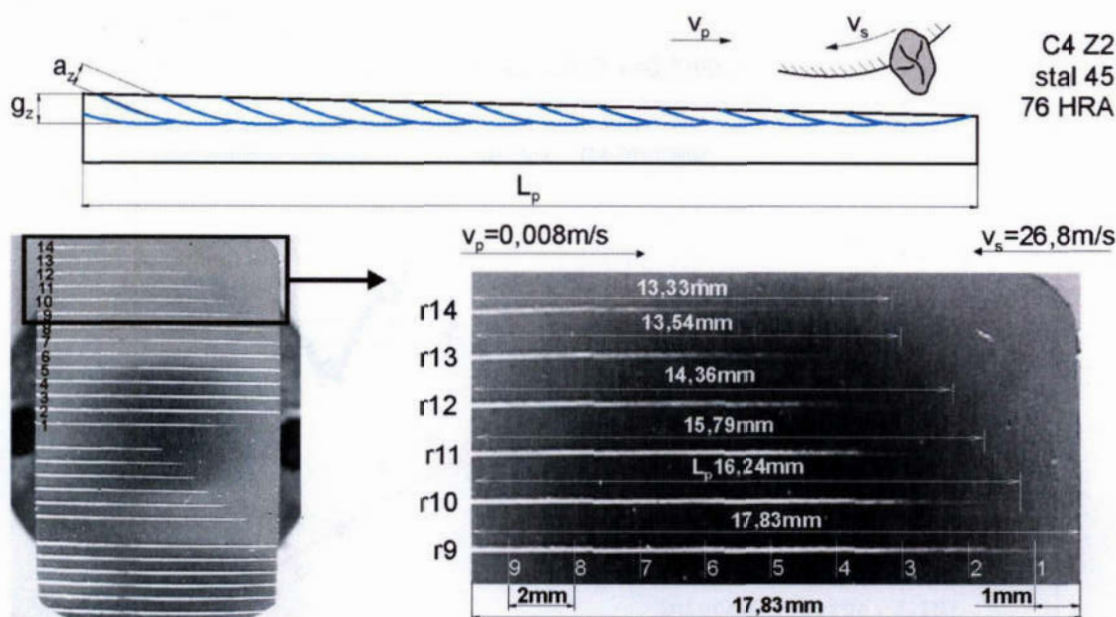
Wyniki pomiarów składowych F_n i F_t siły w procesie mikroskrawania, ziarnem oznaczonym Z1 o geometrii przedstawionej na rysunku 6.30, próbki o oznaczeniu C4 wykonanej ze stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości – 45, o twardości 76 HRA zestawiono w tabelicy 6.5. Proces mikroskrawania prowadzono dla prędkości skrawania $v_s=26,80$ m/s, prędkości posuwu przedmiotu $v_p=0,008$ m/s i głębokości skrawania $g_z=0\div 15$ μm . Zależność pola przekroju warstwy skrawanej A_z do grubości warstwy skrawanej a_z przedstawiono na rysunku 6.31, natomiast powierzchnię próbki C4 wraz ze śladami skrawania przedstawia rysunek 6.32.



Rys. 6.30. Geometria ostrza ziarna z elektrokorundu szlachetnego oznaczonego Z2



Rys. 6.31. Pole powierzchni przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w funkcji grubości warstwy skrawanej a_z dla ziarna o oznaczeniu Z2

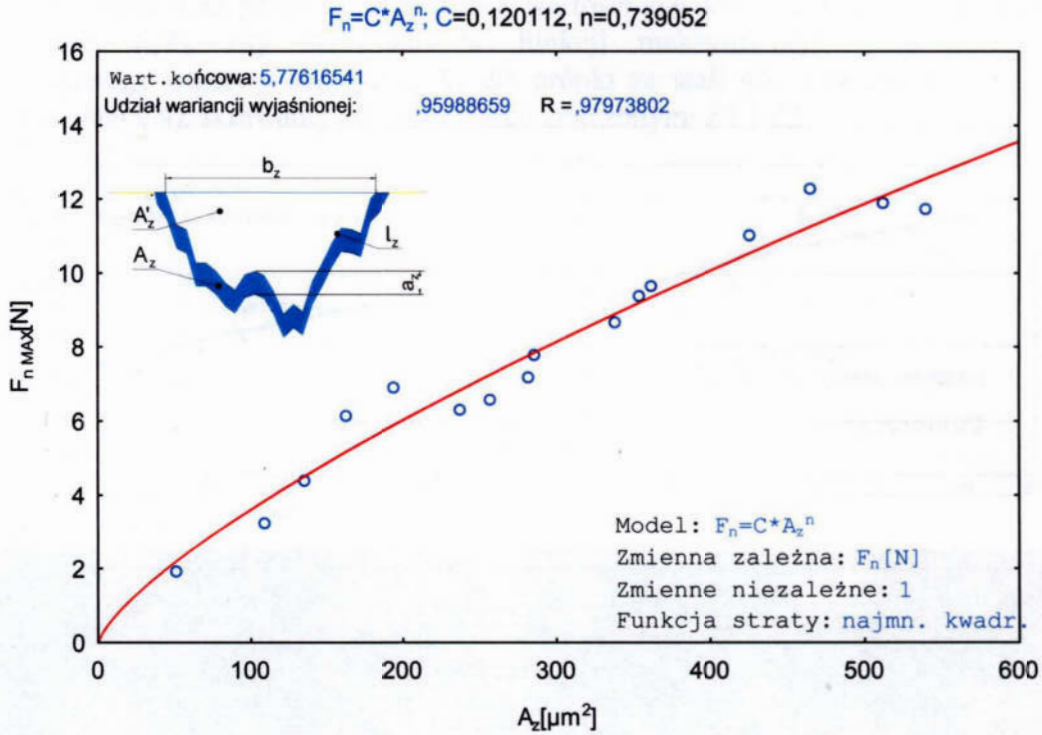


Rys. 6.32. Powierzchnia próbki C4 z widocznymi śladami skrawania ostrzem ziarna o oznaczeniu Z2

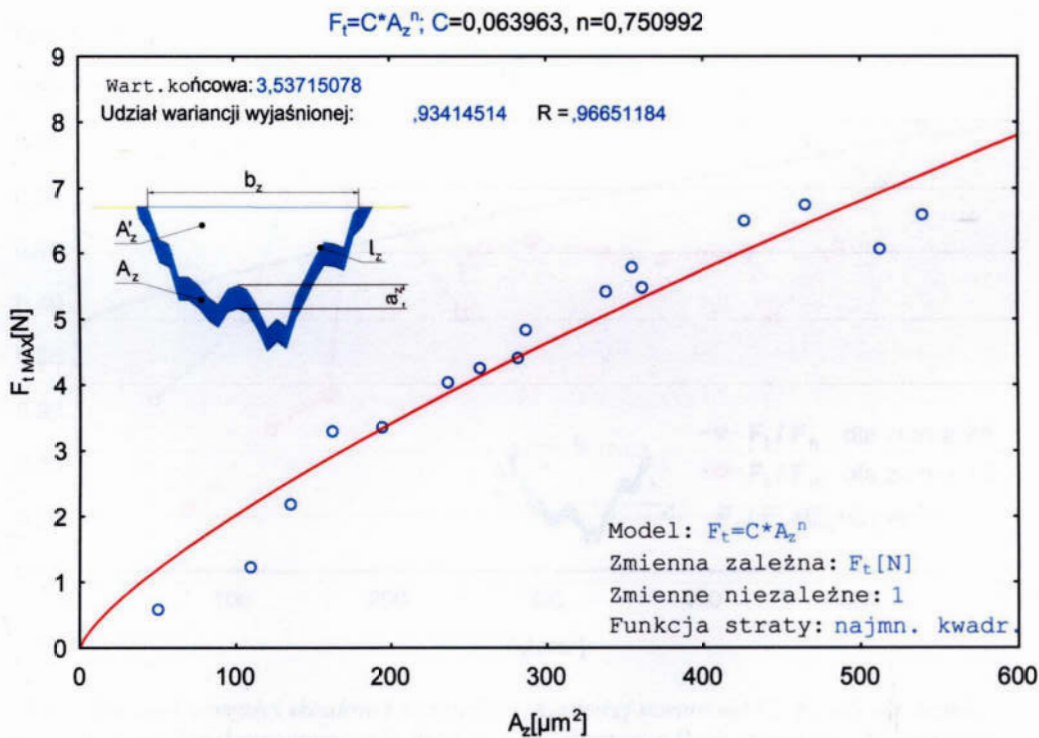
Tablica 6.5. Zestawienie pomiarów dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ostrzem o oznaczeniu Z1

Lp	g _z [μm]	A' _{z,z} [μm ²]	a _z [μm]	b _z [μm]	A _{z,z} [μm ²]	F _t MAX [N]	F _n MAX [N]	Oznaczenie rysy/profil
1	1,300	21,600	0,810	60,750	50,485	0,586	1,904	r10/3
2	3,108	41,100	1,310	81,000	108,952	1,245	3,223	r10/4
3	3,682	154,300	1,439	91,125	134,602	2,197	4,395	r10/5
4	4,842	168,900	1,674	94,500	162,389	3,296	6,152	r10/6
5	5,871	254,500	1,862	101,250	193,533	3,369	6,885	r10/7
6	6,413	340,100	1,955	118,125	28,216	4,028	6,299	r14/9
7	7,593	517,200	2,146	114,750	252,828	7,324	12,760	r10/8
8	7,828	507,900	2,183	114,750	35,170	4,248	6,592	r13/9
9	8,300	574,800	2,255	121,500	37,521	4,395	7,178	r12/9
10	8,565	570,300	2,294	121,500	38,847	4,834	7,764	r11/9
11	9,542	777,700	2,435	135,000	43,771	5,420	8,643	r10/9
12	9,964	790,400	2,494	138,375	45,915	5,786	9,375	r9/9
13	10,337	881,200	2,545	138,375	47,818	5,493	9,668	r8/9
14	11,299	1039,100	2,674	155,250	52,759	6,519	10,990	r7/9
15	12,249	1125,700	2,795	162,000	57,681	6,738	12,300	r6/9
16	13,113	1317,100	2,903	172,125	62,193	6,079	11,870	r5/9
17	13,883	1398,700	2,996	175,500	66,241	6,592	11,720	r4/9

Na rysunku 6.33 przedstawione zostały wartości maksymalne składowej normalnej F_n siły w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4) skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z2 w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z . Natomiast na rysunku 6.34 przedstawiono wartości maksymalne składowej stycznej F_t siły w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4) skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z2 w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z .

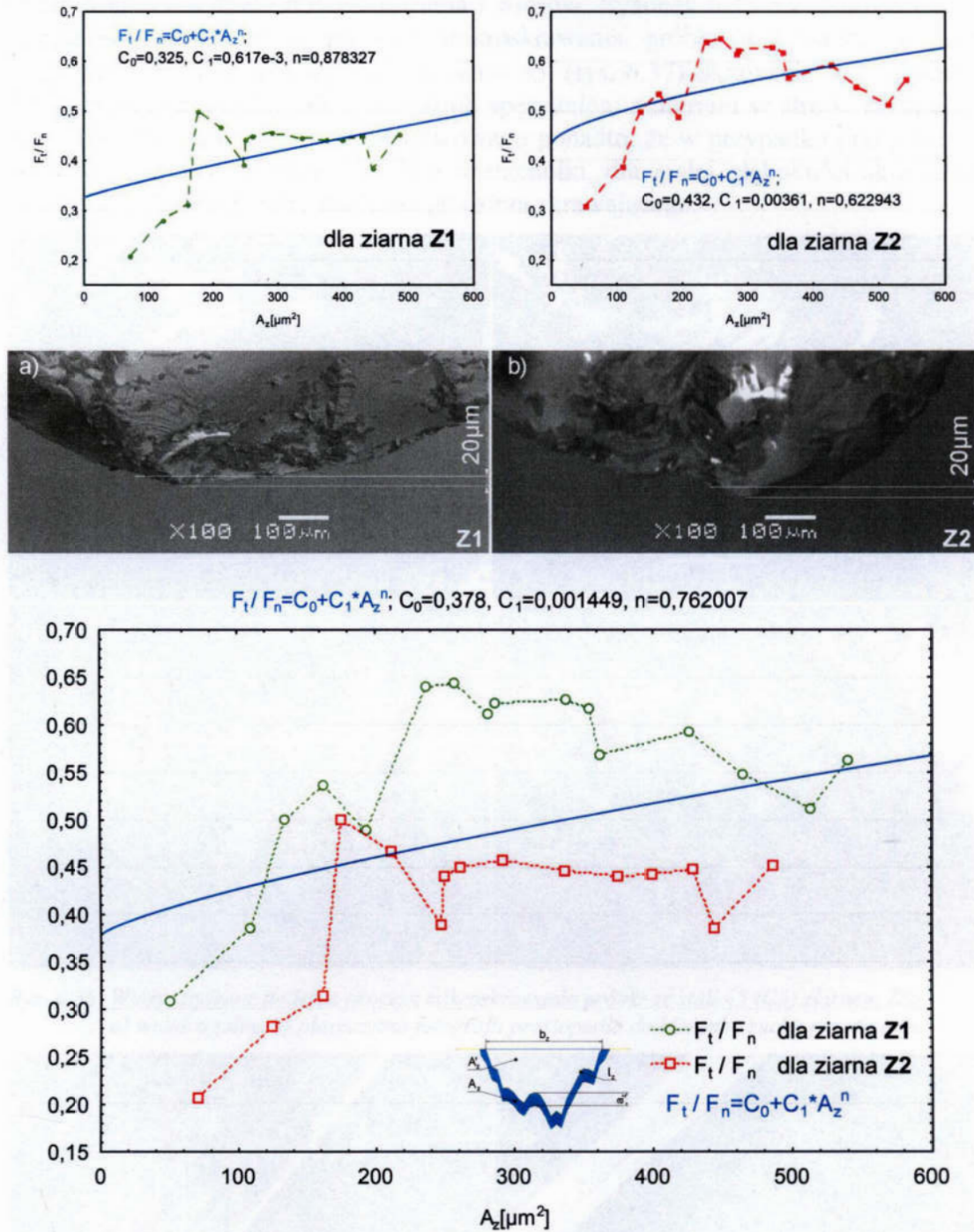


Rys. 6.33. Wartości maksymalne składowej normalnej F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z2



Rys. 6.34. Wartości maksymalne składowej stycznej F_t siły skrawania w funkcji pola maksymalnego przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z2

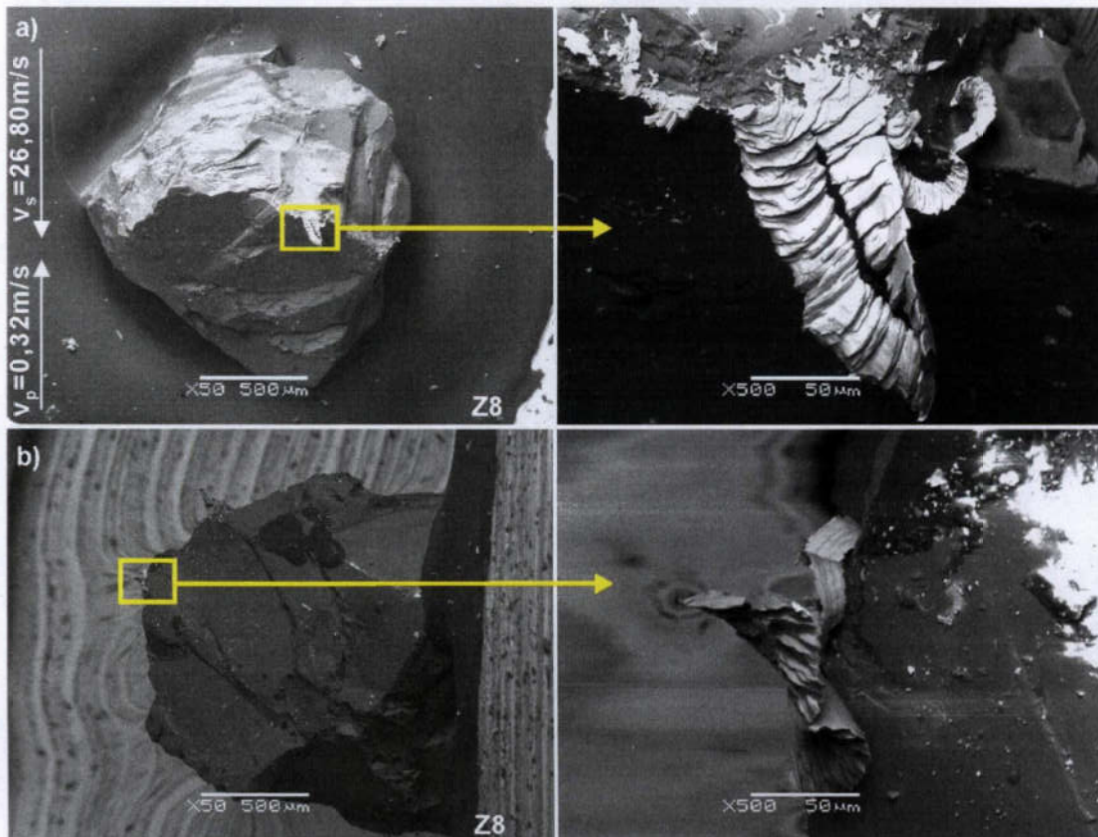
Rysunek 6.35 przedstawia stosunek wartości składowej stycznej do składowej normalnej F_t/F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ostrzami ziaren znaczoneymi Z1 i Z2.



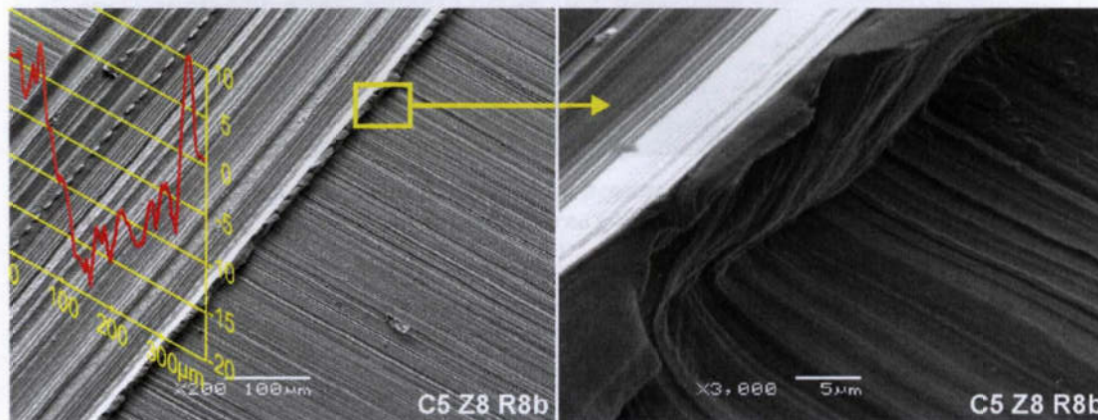
Rys. 6.35. Stosunek wartości składowej stycznej do składowej normalnej F_t/F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego śladu skrawania A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ostrzami ziaren Z1 i Z2

6.3.2. Badania procesu tworzenia wiórów i wpływek

W celu wyjaśnienia zjawisk zachodzących w strefie mikroskrawania oraz ich wpływu na zużycie ziaren prowadzono rejestrację i analizę obrazów mikroskopowych strefy mikroskrawania i wiórów. Rysunek 6.36 przedstawia wióry schodkowe, uzyskane w procesie mikroskrawania próbki wykonanej ze stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości – 45, (rys. 6.37) Skrawanie stali w stanie nieutwardzonym skutkowało przeważnie spęczaniem materiału w strefie skrawania przed ostrzem skrawającym. Zaobserwowano ponadto, że w przypadku pracy ziaren posiadających w strefie obróbki dwa wierzchołki, dla małej głębokości skrawania tworzą się oddzielne wióry dla każdego ostrza skrawającego.

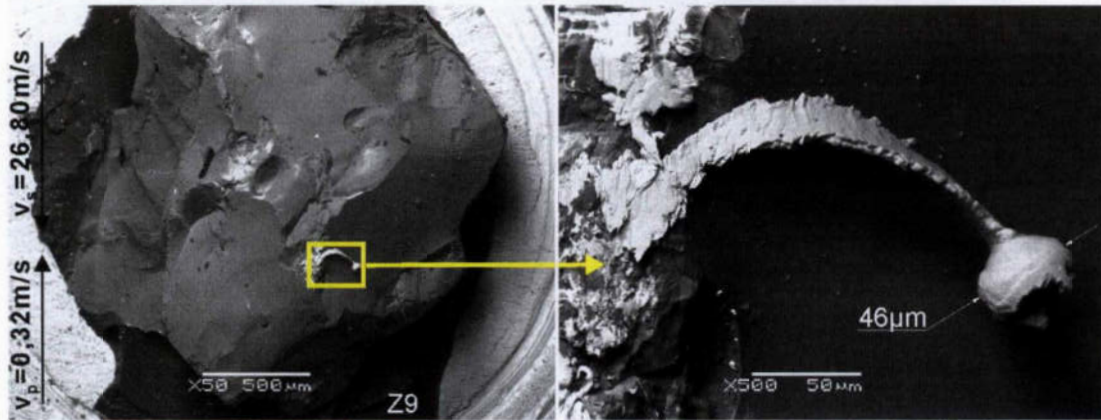


Rys. 6.36. Wióry uzyskane podczas procesu mikroskrawania próbki ze stali 45 (C5) ziarnem Z8:
a) widok ogólny, b) płaszczyzna fotografii prostopadła do kierunku ruchu przedmiotu

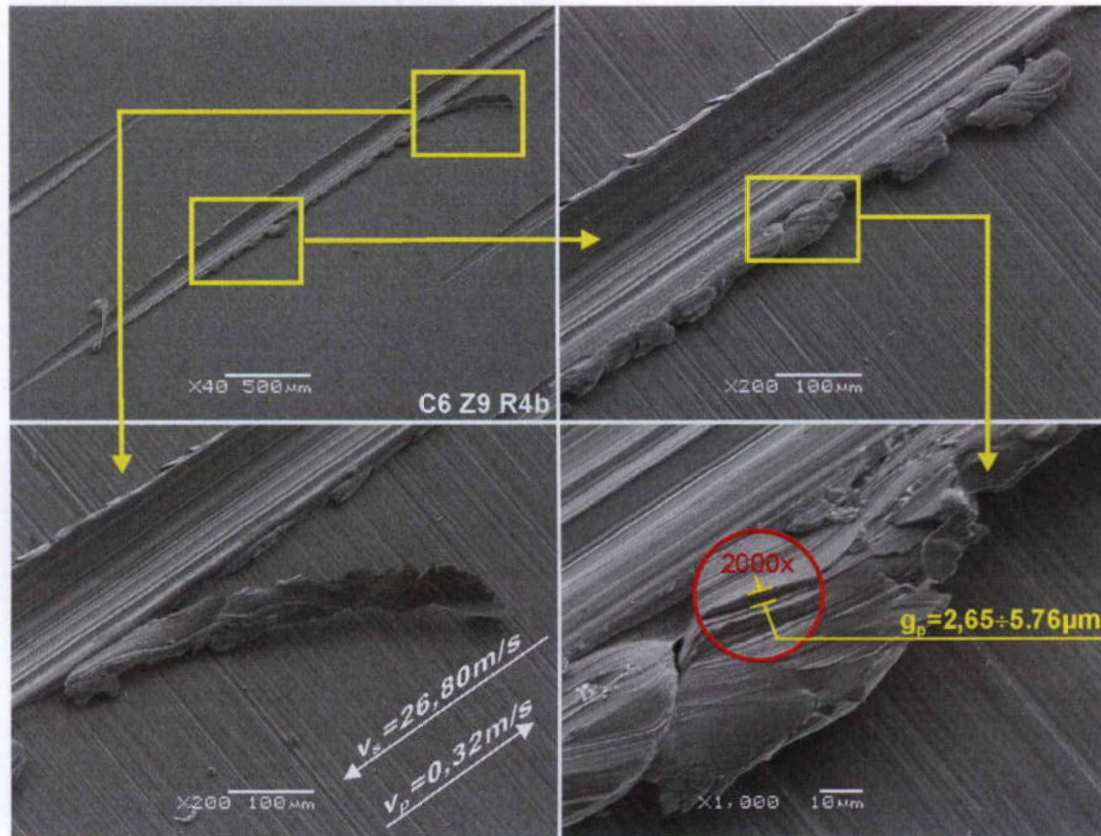


Rys. 6.37. Wpływki rysy oznaczonej 8b uzyskanej w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45 (oznaczonej C5), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8

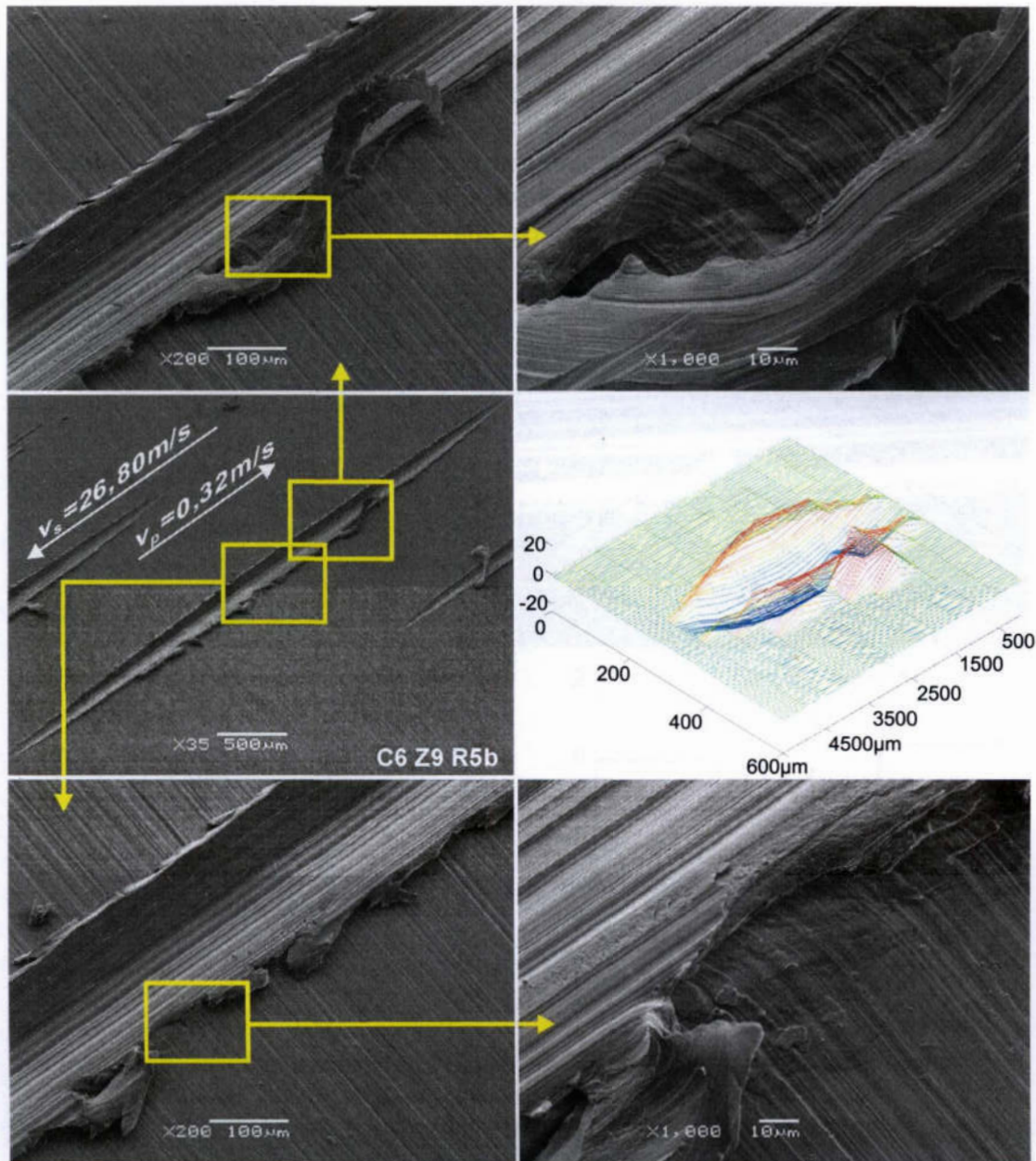
Rysunek 6.38 przedstawia wiór wstęgowy, uzyskany w procesie mikroskrawania próbki wykonanej ze stali 45 (rys. 6.39 i 6.40) prowadzonym dla prędkości skrawania $v_s=26,80$ m/s, prędkości posuwu przedmiotu $v_p=0,32$ m/s. Zaobserwowano nadtapianie wiórów w części oddalonej od ostrza skrawającego.



Rys. 6.38. Wióry uzyskane podczas procesu mikroskrawania próbki ze stali 45 (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9



Rys. 6.39. Wyłytki rysy oznaczonej 4b uzyskanej w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9

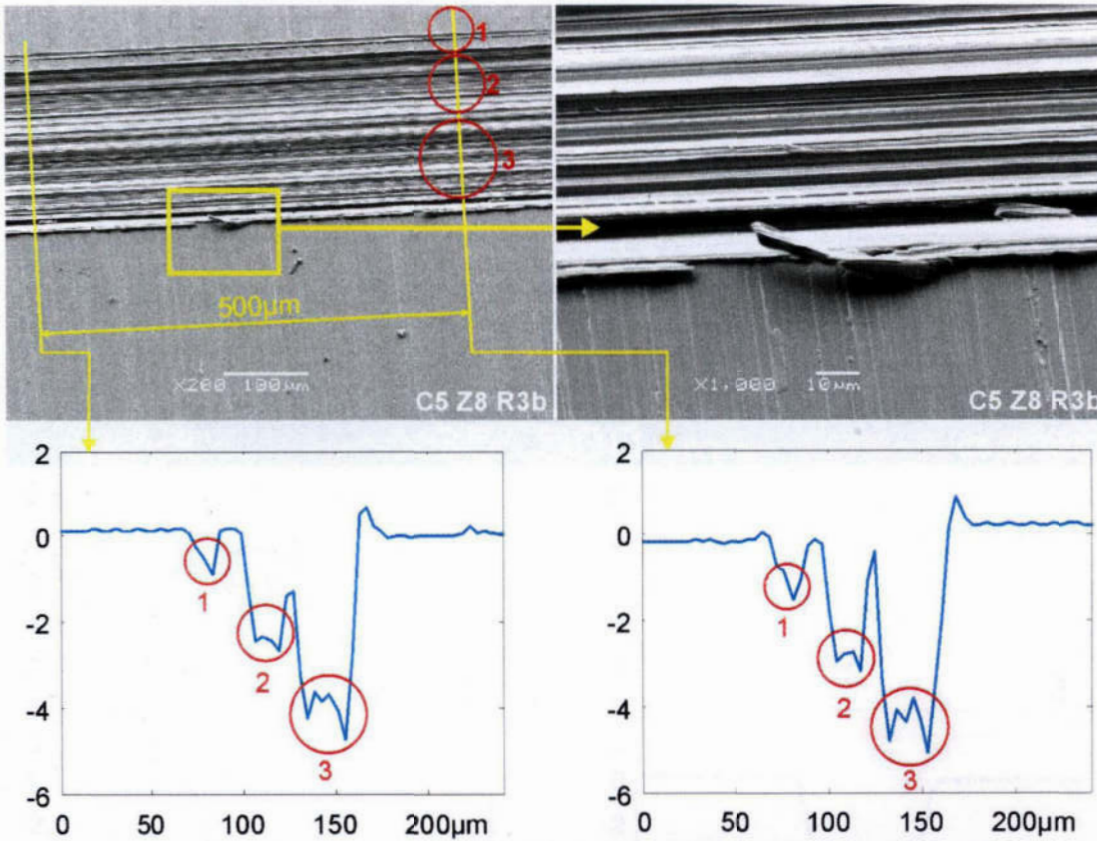


Rys. 6.40. Wyplwyki rysy oznaczonej 5b uzyskanej w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9

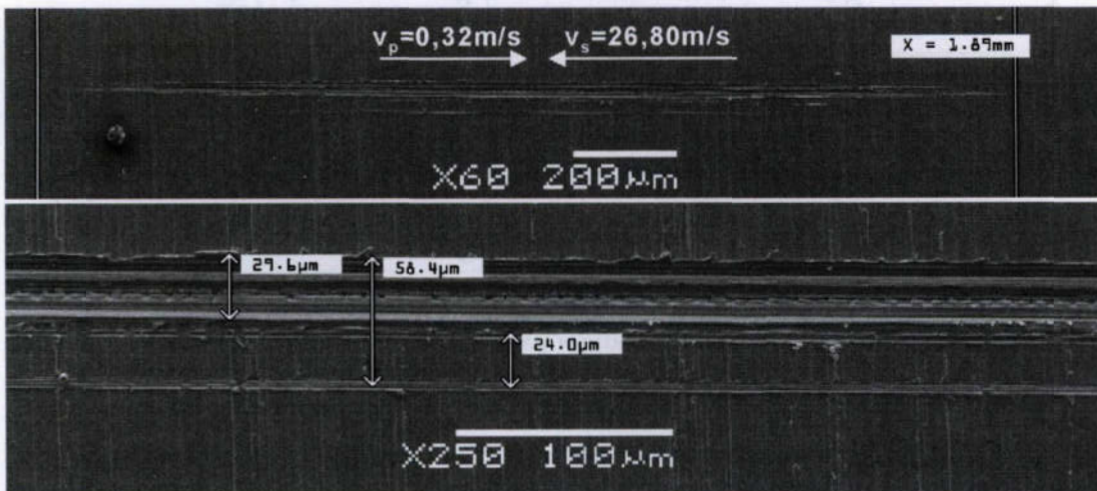
Zaobserwowano wywinięte wióry boczne, umiejscowione nad strefą odkształceń plastycznych obrabianego materiału o wysokości większej niż głębokość skrawania. Elementarne grubości warstw, z których tworzyły się wióry o budowie elementowej, obserwowane w strefie wyplwyków bocznych, wynosiły $g_p = 2,65 \div 5,76 \mu\text{m}$ (rys. 6.39). Obliczono, że dla średnich wartości współczynnika spęczania wióra $k_{sp} = 5$, podczas procesu mikroskrawania z prędkością $v_s = 26,8 \text{ m/s}$, okresowe narastanie naprężeń i odkształceń podczas tworzenia wióra zachodziło z częstotliwością $0,93 \div 2,02 \text{ MHz}$.

Przedstawione powyżej obrazy strefy mikroskrawania wskazują również na możliwość popełnienia znacznych błędów oszacowania wyplwyków, jeżeli w badaniach prowadzi się analizę jedynie na podstawie badań profilometrycznych.

Podczas analizy wyników procesu mikroskrawania zaobserwowano zmiany mikrogeometrii ziarna skrawającego. Procesy zużycia ziarna prowadziły do zmian geometrii powodujących skrawanie kilku nowych wierzchołków ziarna. Strefa mikroskrawania dla ziarna oznaczonego Z8, w którym wyodrębniły się trzy wierzchołki skrawające została przedstawiona na rysunku 6.41, natomiast ślad skrawania ostrzem oznaczonym Z9 z dwoma wierzchołkami wraz z pomiarami odległości pomiędzy tymi wierzchołkami przedstawia rysunek 6.42.

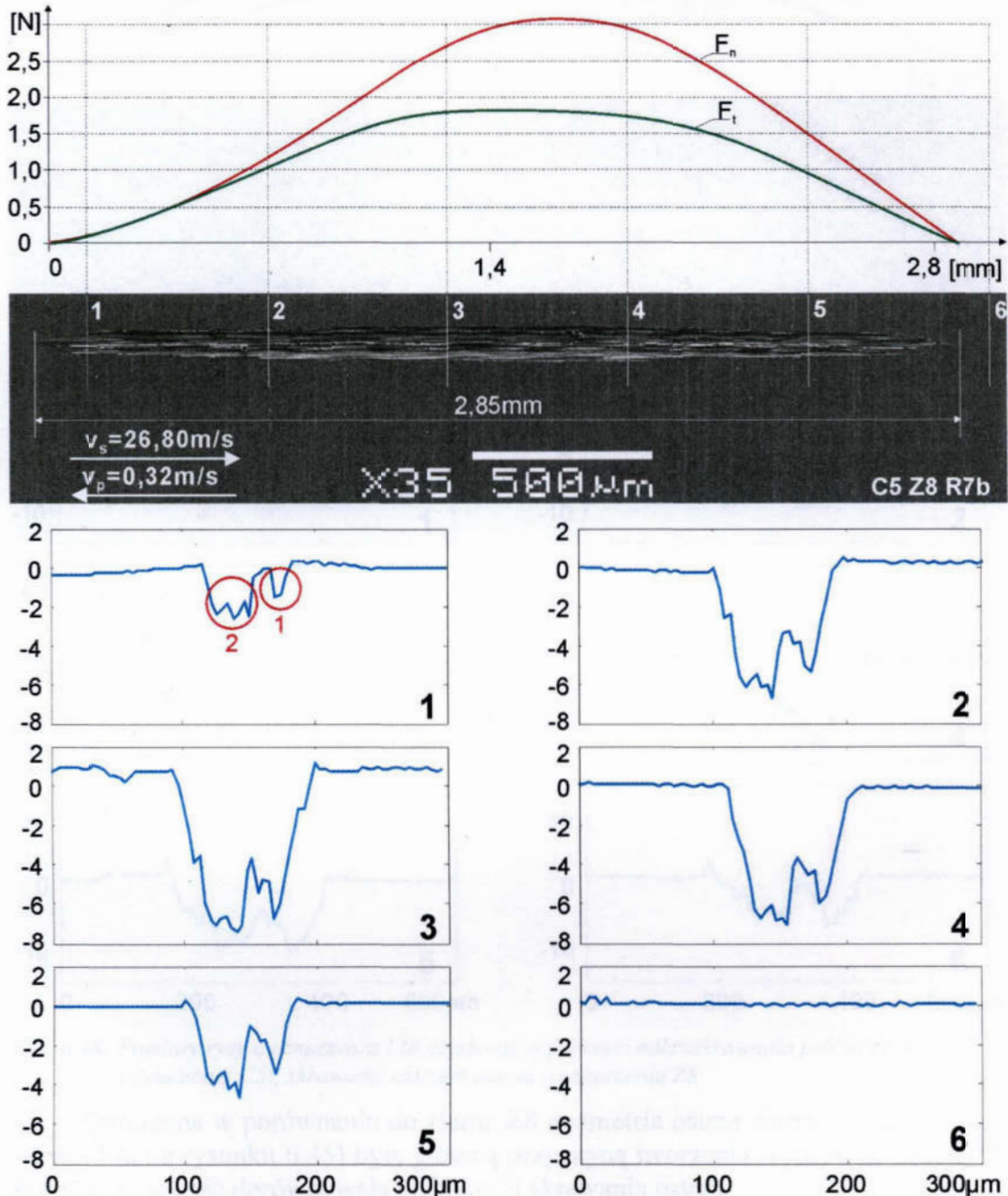


Rys. 6.41. Pomiary rysy oznaczonej 3b uzyskanej w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45 (oznaczonej C5), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8



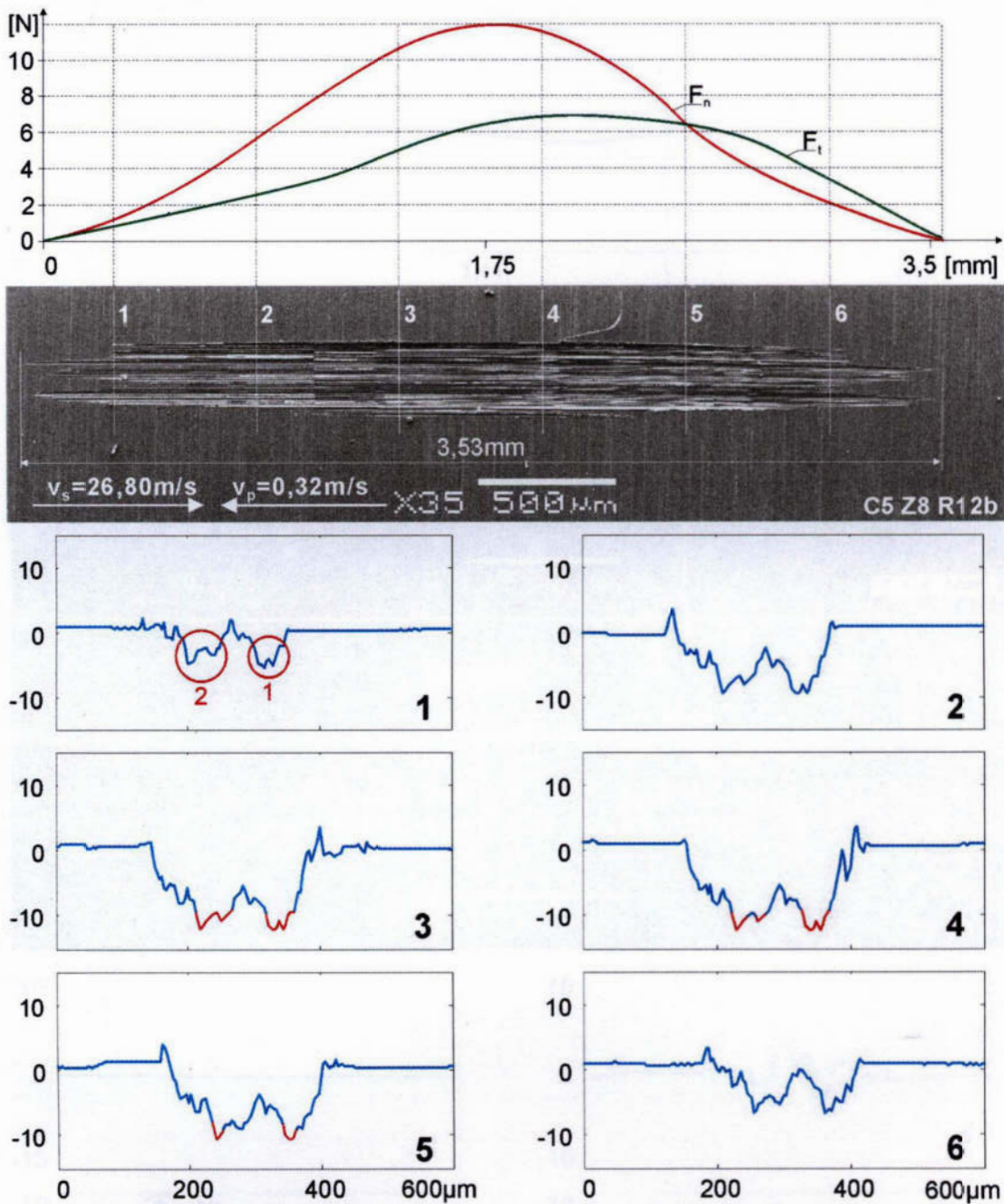
Rys. 6.42. Pomiary rysy oznaczonej 15a uzyskanej w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9

Szczegółowej analizie zmian geometrii przekroju śladu skrawania poddano rysy oznaczone r7 (rys. 6.43) oraz r12 (rys. 6.44) uzyskane w procesie mikroskrawania stali 45, ziarnem oznaczonym Z8. Na rysunkach przedstawiono zmiany wartości składowych F_t i F_n siły skrawania dla pojedynczych rys w funkcji drogi ziarna w procesie skrawania wraz z profilami zarysami rysy.



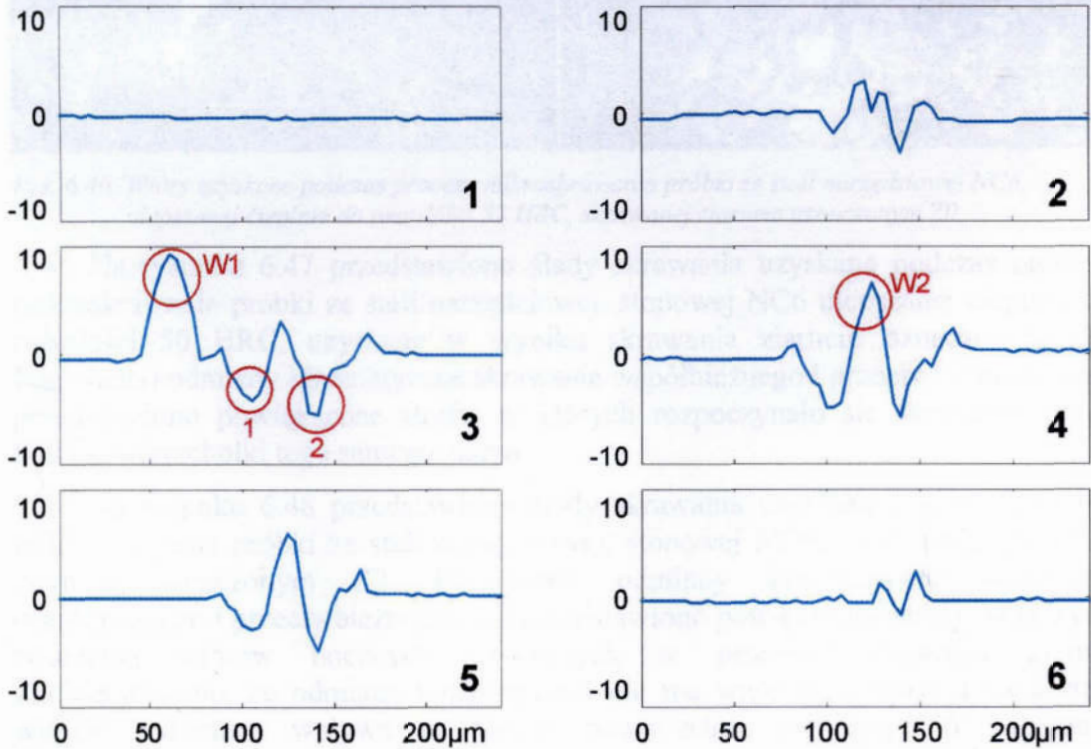
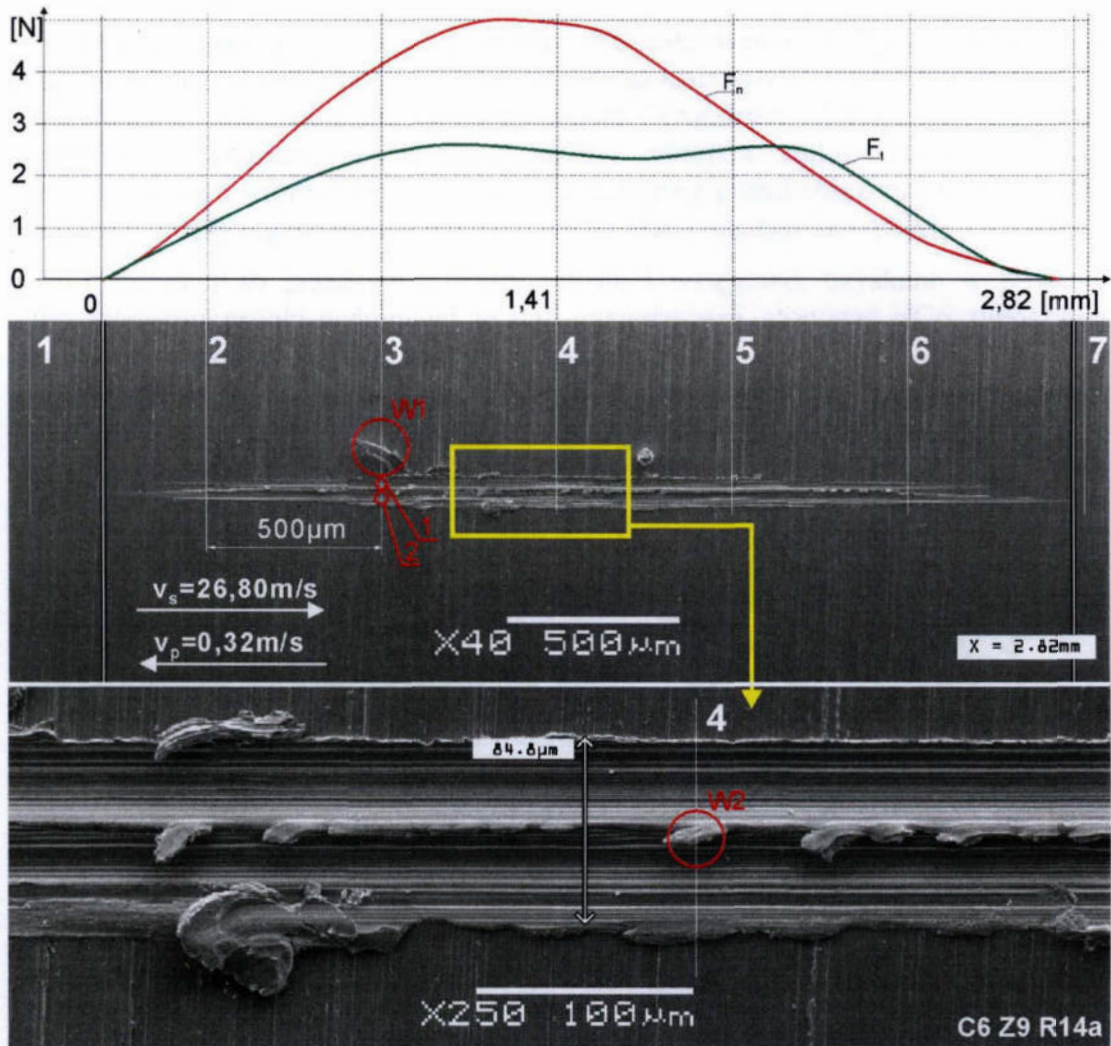
Rys. 6.43. Pomiary rysy o oznaczeniu 7b uzyskanej w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45 (oznaczonej C5), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8 (zmiana zarysu w stosunku do rys. 4.41 wynika z wykruszenia najwyższego wierzchołka)

Zaobserwowano znaczny wzrost szerokości warstwy skrawanej b_z dla porównywalnej głębokości skrawania g_z spowodowane zużyciem ostrza skrawającego ziarna Z8. Dwa wierzchołki skrawające i duża szerokość warstwy skrawanej (rys. 6.43 i 6.44) były główną przyczyną tworzenia niewielkich wypływek – wiórów bocznych, powodując przemieszczanie większości usuwanego materiału przed ostrzem na drodze skrawania.



Rys. 6.44. Pomiary rysy o oznaczeniu 12b uzyskanej w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45 (oznaczonej C5), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8

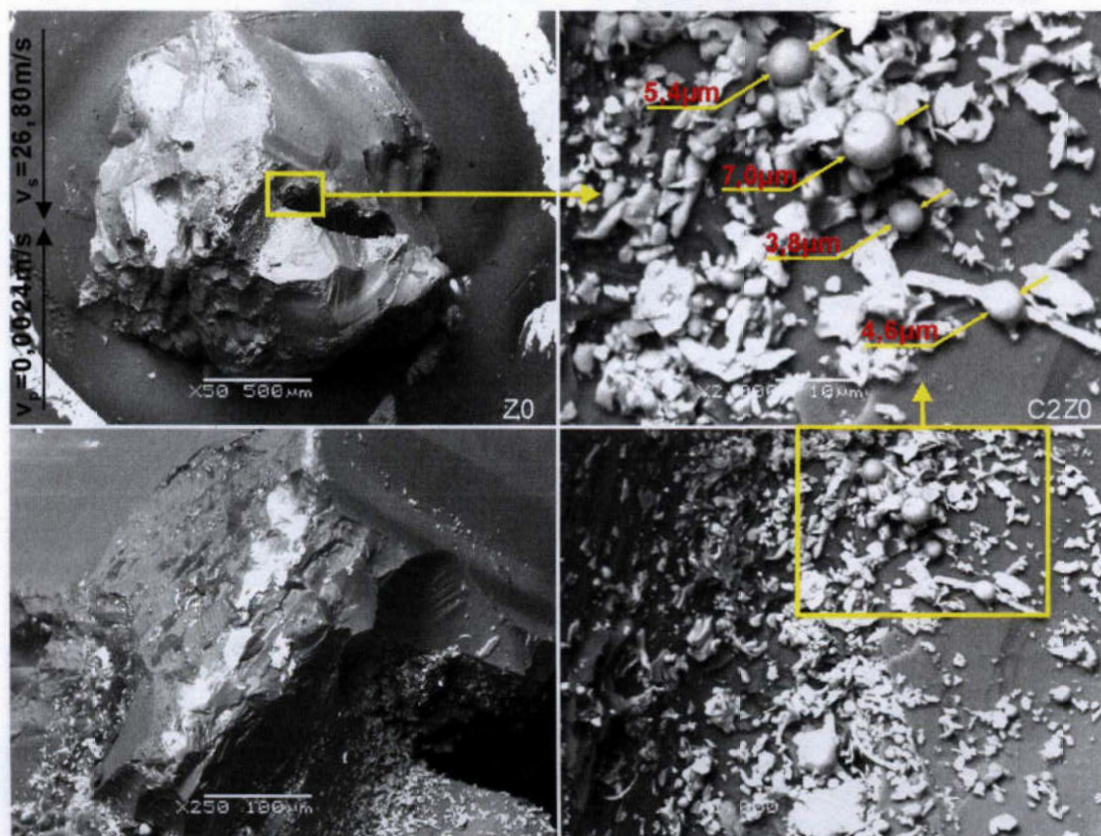
Odmienna w porównaniu do ziarna Z8 geometria ostrza ziarna Z9 (po zużyciu – rysa 14a na rysunku 6.45) była główną przyczyną tworzenia wypływek bocznych, których wysokość dorównywała głębokości skrawania ostrza.



Rys. 6.45. Pomiary rysy oznaczonej 14a uzyskanej w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna Z9

Dla pełniejszej analizy procesu mikroskrawania różnych materiałów przeprowadzono również badania mikroskrawania stali narzędziowej, stopowej NC6, o twardości 25 HRC w stanie nieutwardzonym i twardości 52 HRC po ulepszeniu cieplnym. Prowadzono rejestrację i analizę obrazów mikroskopowych strefy mikroskrawania i wiórów dla odmiany kinematycznej przeciwbieżnej i współbieżnej oraz badano wpływ geometrii i orientacji ostrza skrawającego na wyniki.

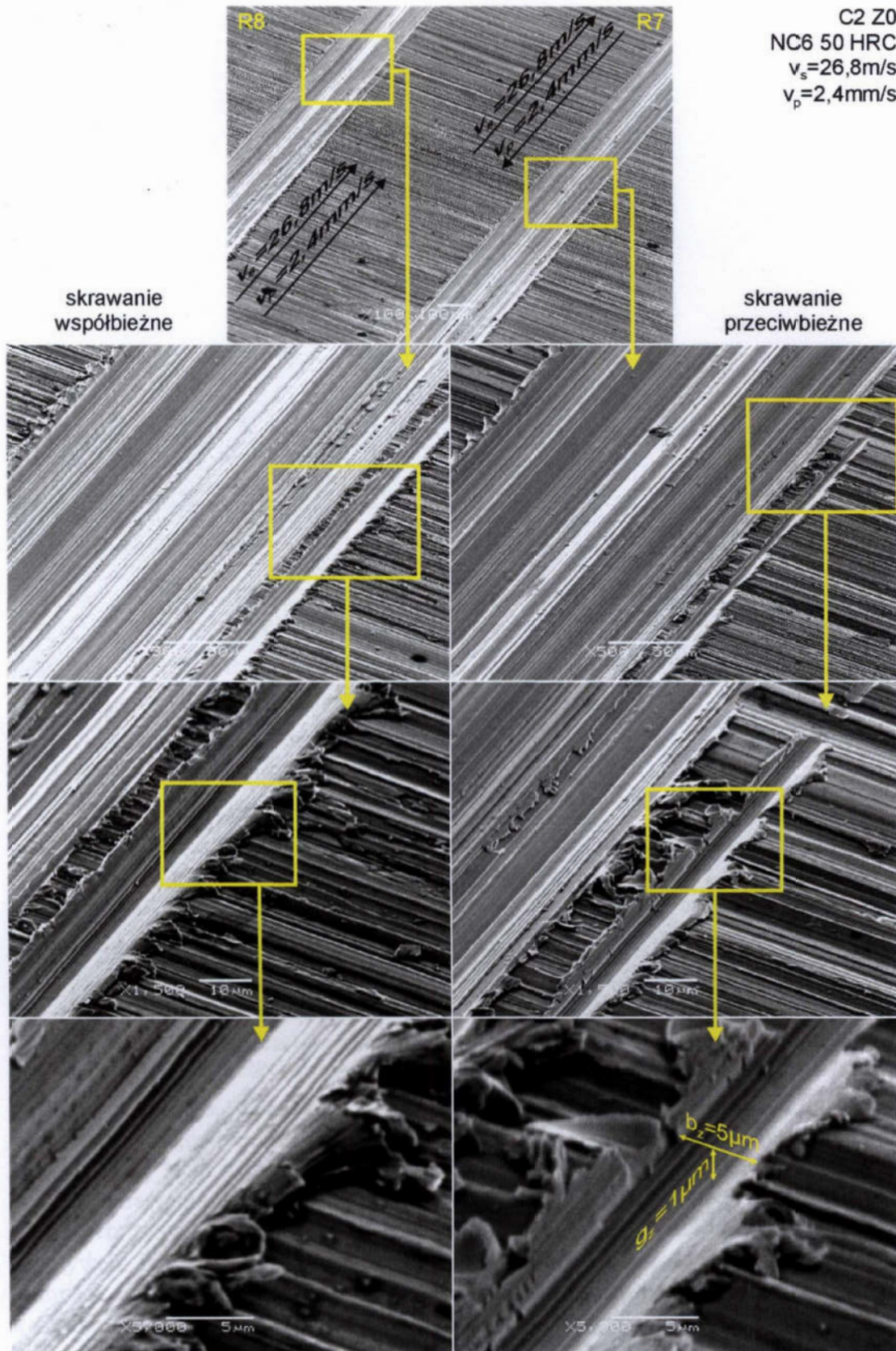
Rysunek 6.46 przedstawia wióry kuliste i wstęgowe, uzyskane w procesie mikroskrawania próbki wykonanej ze stali narzędziowej, stopowej NC6, ulepszonej cieplnie do twardości 52 HRC ziarnem oznaczonym Z0.



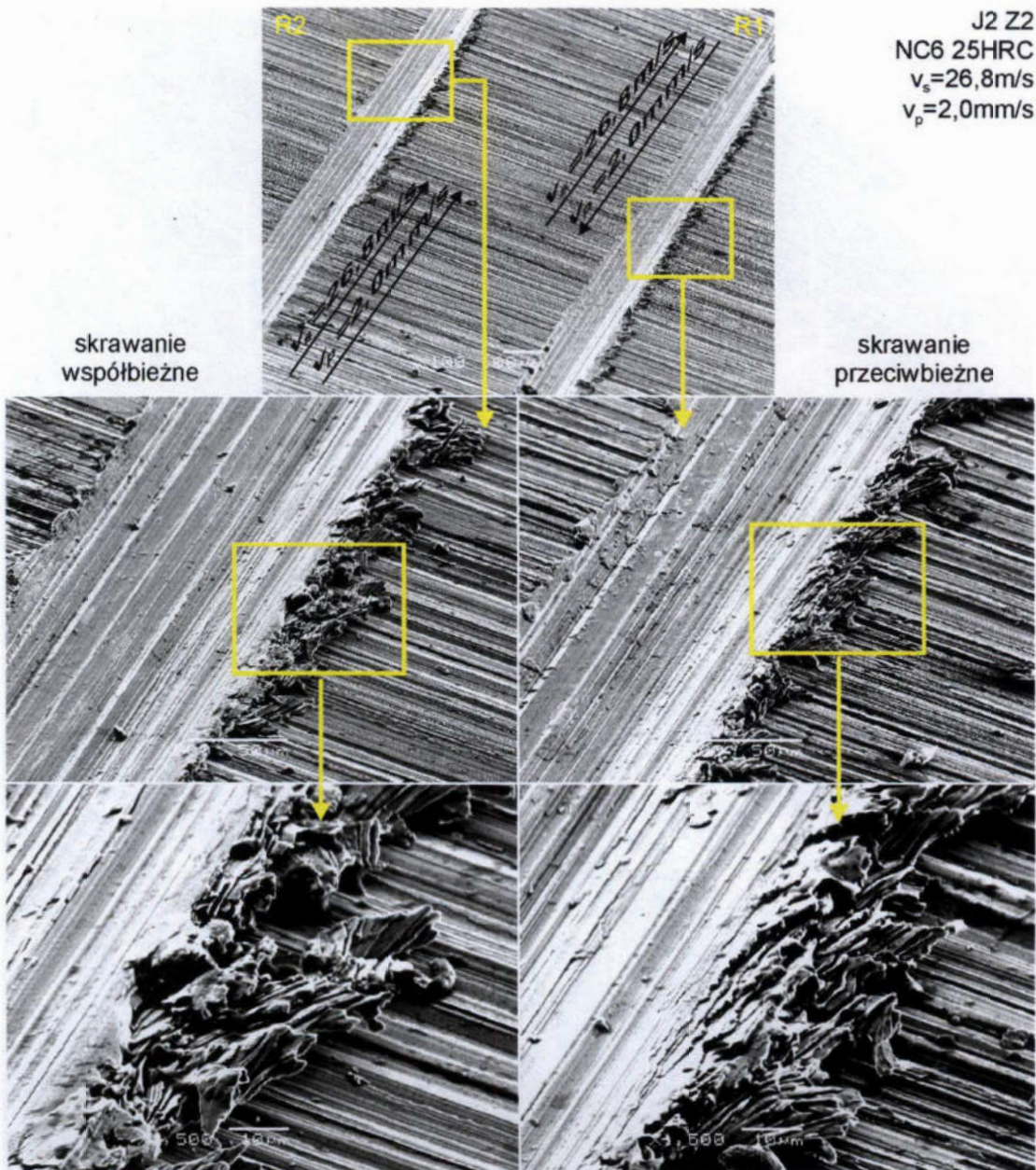
Rys. 6.46. Wióry uzyskane podczas procesu mikroskrawania próbki ze stali narzędziowej NC6, ulepszonej cieplnie do twardości 52 HRC, skrawanej ziarnem oznaczonym Z0

Na rysunku 6.47 przedstawiono ślady skrawania uzyskane podczas procesu mikroskrawania próbki ze stali narzędziowej, stopowej NC6 ulepszonej cieplnie do twardości 50 HRC, uzyskane w wyniku skrawania ziarnem oznaczonym Z0. Porównano odmiany kinematyczne skrawania współbieżnego i przeciwbieżnego oraz przedstawiono powiększone strefy, w których rozpoczynało się skrawanie przez kolejną wierzchołki tego samego ziarna.

Na rysunku 6.48 przedstawiono ślady skrawania uzyskane podczas procesu mikroskrawania próbki ze stali narzędziowej, stopowej NC6, o twardości 25 HRC ziarnem oznaczonym Z2. Porównano odmiany kinematyczne skrawania współbieżnego i przeciwbieżnego oraz przedstawiono powiększone strefy, w których tworzenia wiórów bocznych uzyskanych w procesie skrawania ziarna. Zaobserwowano, że odmiana kinematyczna nie ma większego wpływu na kształt wiórów natomiast wpływa na jakość powierzchni dna rysy. W odmianie przeciwbieżnej powierzchnia rysy zawierała więcej śladów świadczących o przylepieniu się skrawanego materiału do ostrza skrawającego (rys. 6.48 i 6.49).



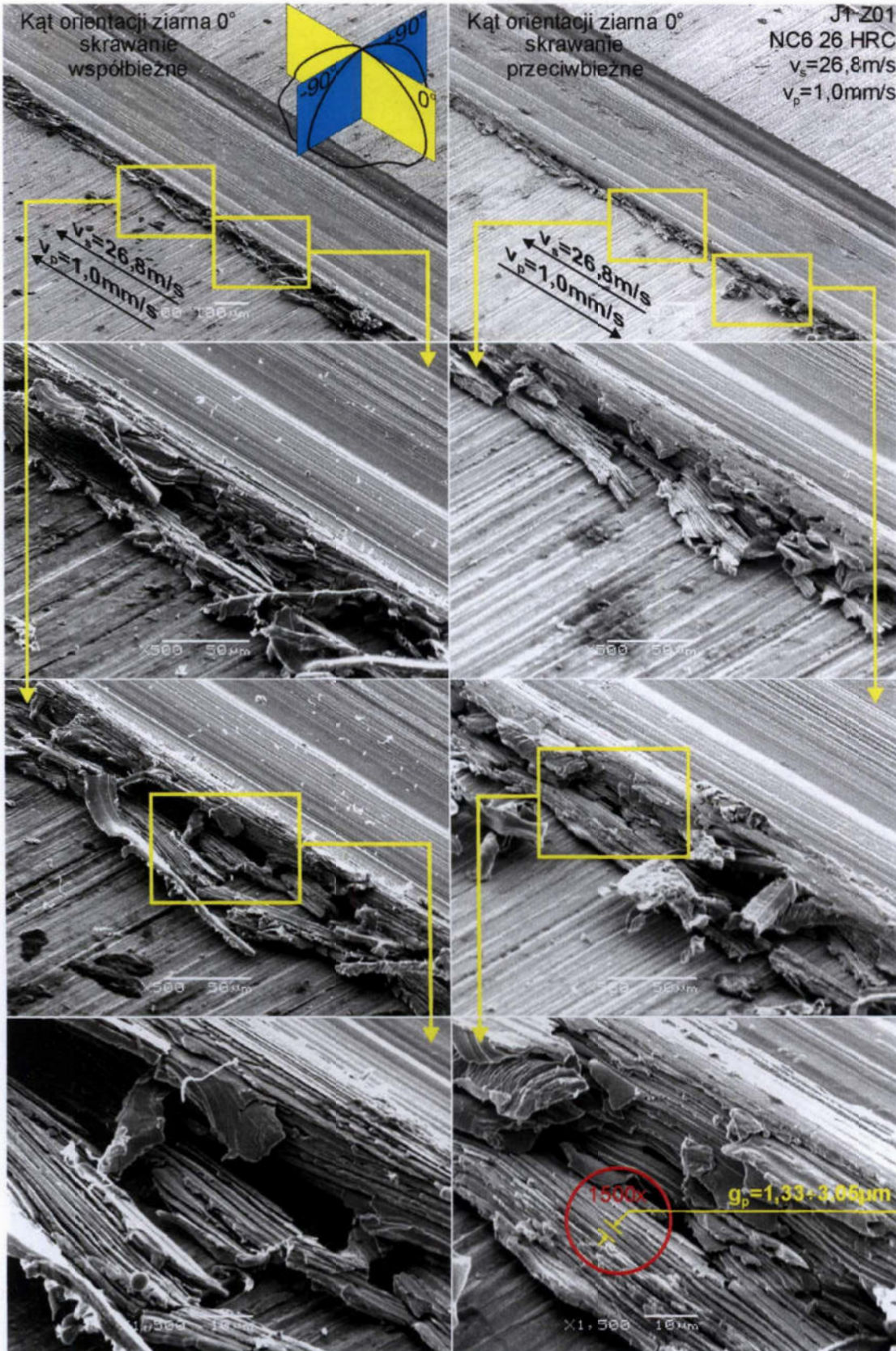
Rys. 6.47. Ślady skrawania uzyskane podczas procesu mikroskrawania próbki ze stali narzędzowej, stopowej NC6, ulepszonej cieplnie do twardości 50 HRC, skrawanej ziarnem oznaczonym Z0 dla skrawania współbieżnego i przeciwbieżnego



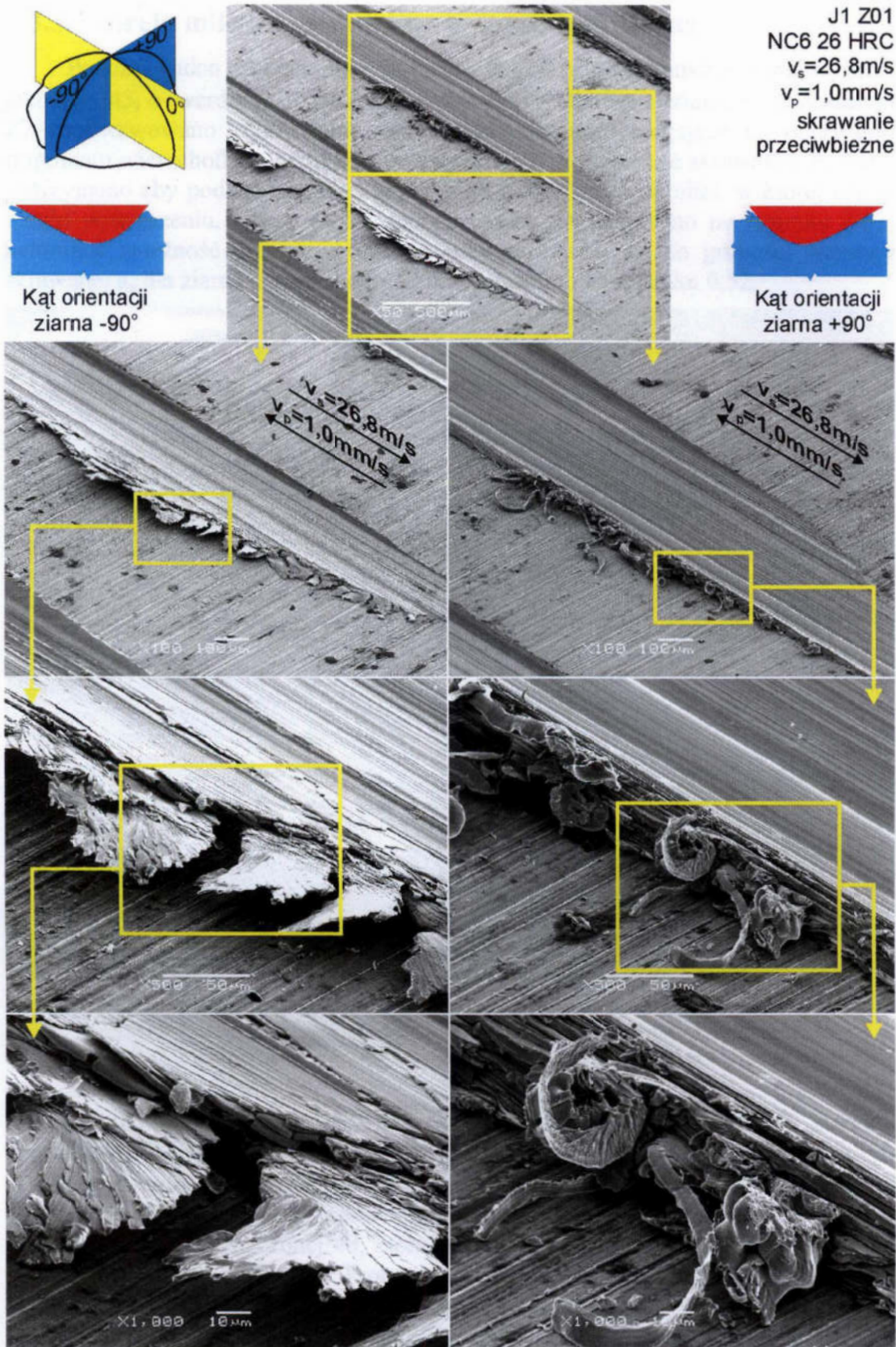
Rys. 6.48. Ślady skrawania uzyskane podczas procesu mikroskrawania próbki ze stali narzędziowej NC6, o twardości 25 HRC, skrawanej ziarnem Z2 dla skrawania współbieżnego i przeciwbieżnego

Na rysunku 6.49 przedstawiono wpływ orientacji ziarna ściernego i kinematyki obróbki na proces tworzenia wypływek i wiórów w procesie mikroskrawania stali narzędziowej NC6, o twardości 26 HRC podczas skrawania ziarnem oznaczonym Z01 dla skrawania współbieżnego i przeciwbieżnego. Elementarne grubości warstw, z których tworzyły się wióry o budowie elementowej, obserwowane w strefie wypływek bocznych, wynosiły $g_p=1,33\div 3,05\ \mu\text{m}$. Obliczono, że dla średnich wartości współczynnika spęczania wióra $k_{sp}=5$, podczas procesu mikroskrawania z prędkością $v_s=26,8\text{m/s}$, okresowe narastanie naprężeń i odkształceń podczas tworzenia wióra zachodziło z częstotliwością $1,76\div 4,03\ \text{MHz}$.

Dokonano zmiany orientacji ziarna przez obroty w osi prostopadłej do obrabianej powierzchni próbki o kąt $+90^\circ$ i -90° i obserwowano kształt wiórów bocznych w strefie wyjścia ostrza dla odmiany kinematycznej skrawania przeciwbieżnego. Wyniki obserwacji przedstawiono na rysunku 6.50.



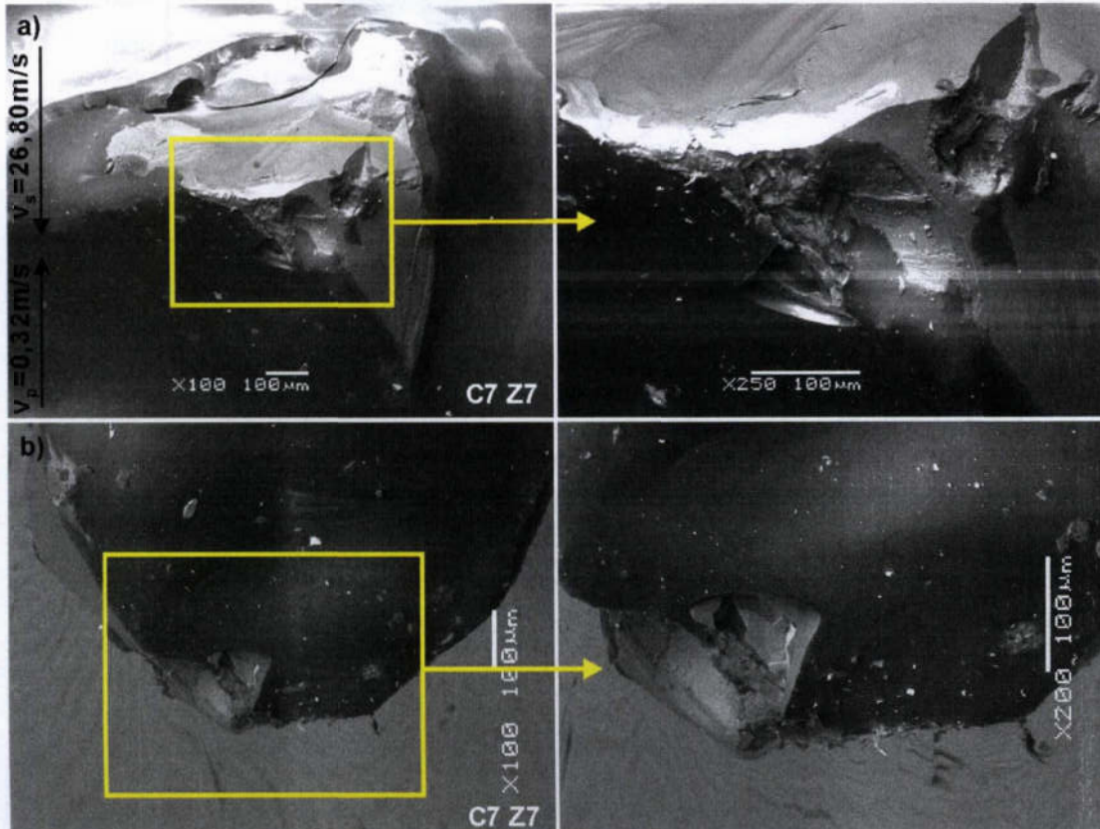
Rys. 6.49. Wpływ ustawienia ziarna ściernego i kinematyki na proces tworzenia wyływek i wiórów podczas mikroskrawania stali narzędziowej NC6, o twardości 26 HRC, skrawanej ziarnem oznaczonym Z01 dla skrawania współbieżnego i przeciwbieżnego



Rys. 6.50. Strefa wyjścia ziarna w procesie mikroskrawania oraz wpływ ustawienia ziarna ściernego i kinematyki na proces tworzenia wypływek i wiórów podczas mikroskrawania stali narzędziowej NC6, o twardości 26 HRC, skrawanej ziarnem oznaczonym Z01 dla skrawania przeciwbieżnego

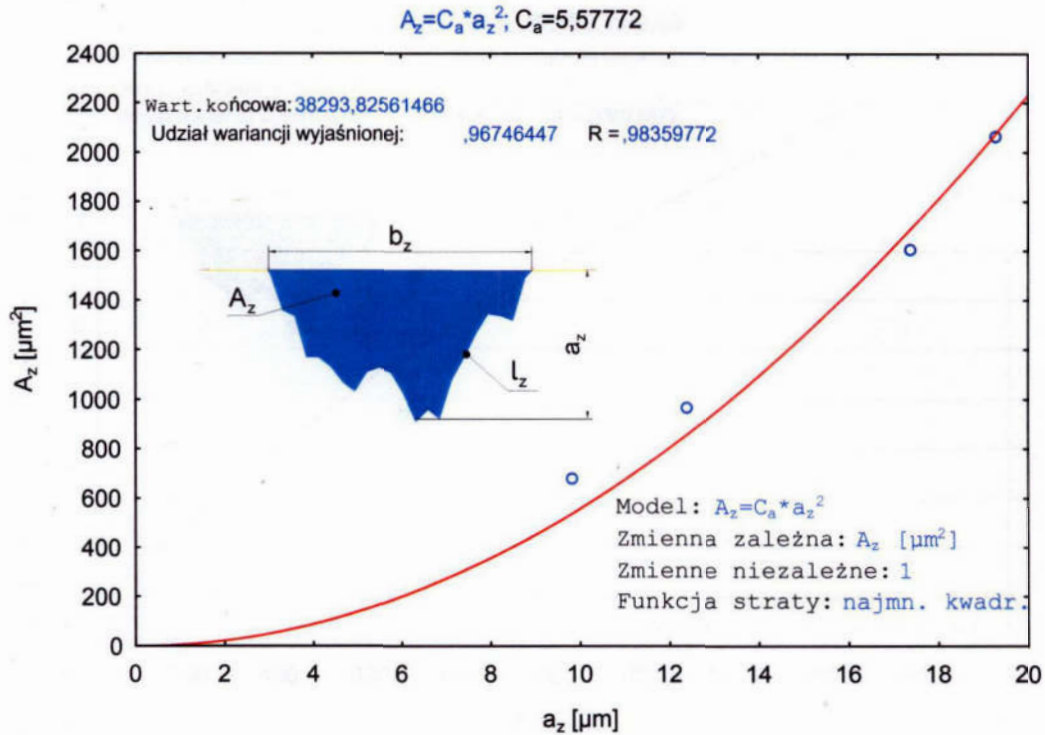
6.3.3. Strefa mikroskrawania po wykruszeniu ziarna

Podczas badań procesu mikroskrawania stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości – 45, o twardości 71 HRA (oznaczonej C7), skrawanej ziarnem oznaczonym Z7 zaobserwowano wykruszenie ostrza skrawającego, polegające na oderwaniu fragmentu wierzchołka o rozmiarze przewyższającym głębokość skrawania. Badania wstrzymano aby poddać analizie zużycie ziarna oraz strefę obróbki, w której ostrze uległo wykruszeniu. Obraz wykruszonego ostrza przedstawiono na rysunku 6.51, natomiast zależność pola przekroju warstwy skrawanej A_z do grubości warstwy skrawanej a_z dla ziarna oznaczonego Z7 przedstawiono na rysunku 6.52.

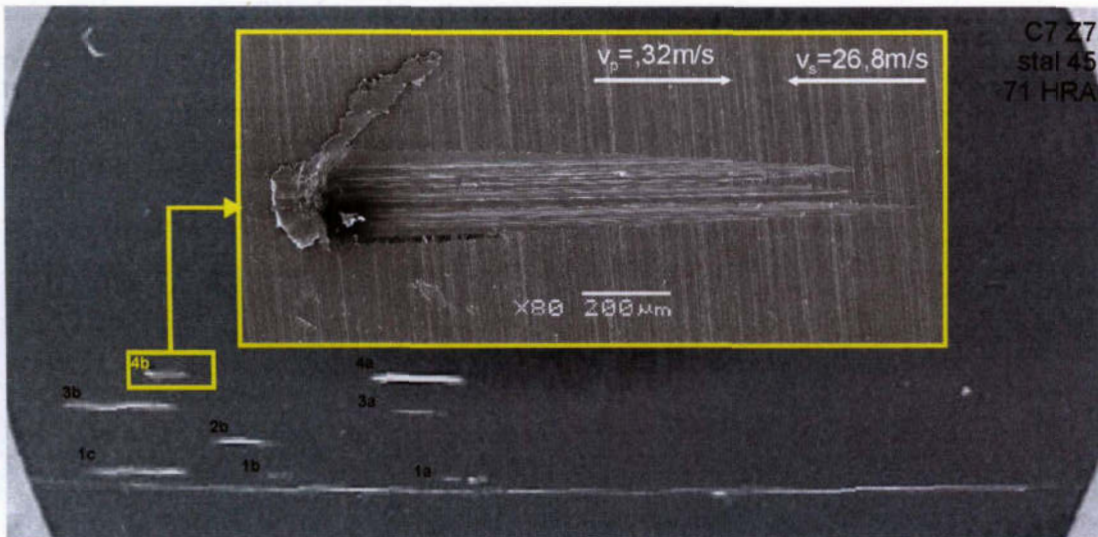


Rys. 6.51. Geometria ostrza ziarna z elektrokorundu szlachetnego oznaczonego Z7 wraz ze strefą zarejestrowanego wykruszenia wierzchołka ziarna podczas mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 71 HRA (oznaczonej C7): a) widok ogólny, b) płaszczyzna fotografii prostopadła do kierunku ruchu przedmiotu

Wyniki pomiarów składowych F_n i F_t siły w procesie mikroskrawania, ziarnem oznaczonym Z7 próbki wykonanej ze stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości – 45, o twardości 71 HRA (rys. 6.53), na której zaobserwowano wykruszenie wierzchołka ostrza ziarna Z7 zestawiono w tabelicy 6.6. Wartości pozycji 4 tabelicy odpowiadają rysie oznaczonej 4b, która jest strefą mikroskrawania po wykruszeniu wierzchołka ostrza ziarna Z7. Proces mikroskrawania prowadzono dla prędkości skrawania $v_s=26,80$ m/s, prędkości posuwu przedmiotu $v_p=0,32$ m/s i głębokości skrawania $g_z=0\div 20$ μm . Na rysunkach 6.54 i 6.55 przedstawione zostały odpowiednio wartości maksymalne składowych normalnej F_n i stycznej F_t siły w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45 (oznaczonej C7 – 71 HRA) skrawanej ziarnem oznaczonym Z7 (bez uwzględnienia niepełnej rysy, w której nastąpiło wykruszenie wierzchołka).



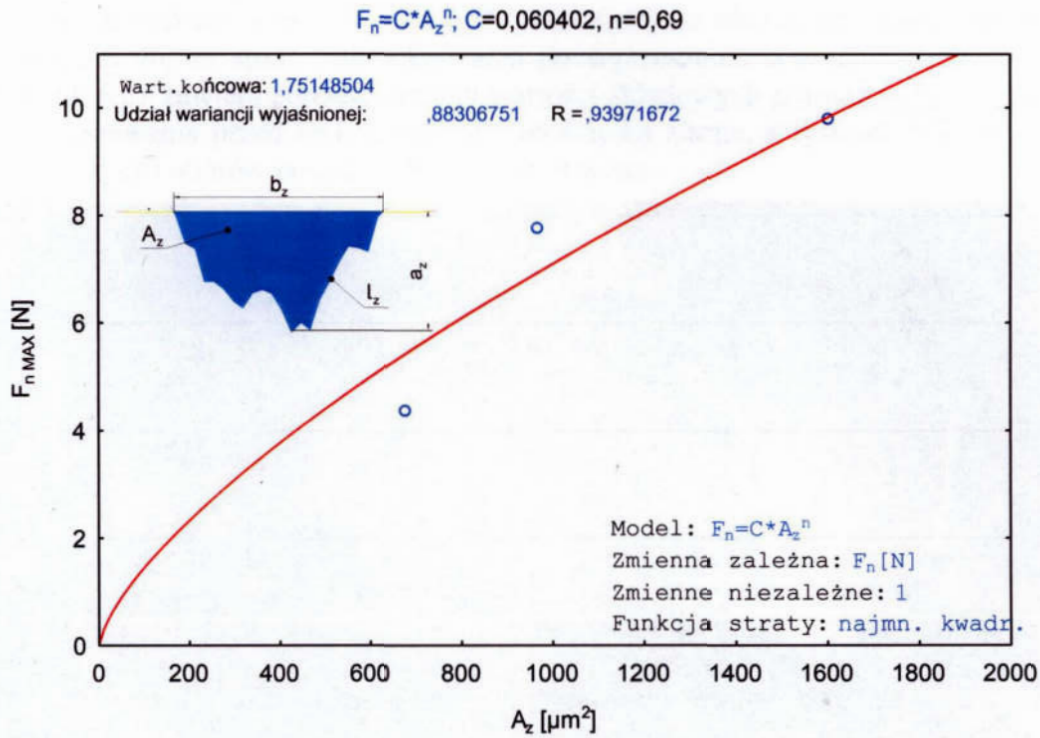
Rys. 6.52. Pole powierzchni przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w funkcji grubości warstwy skrawanej a_z dla ziarna o oznaczeniu Z7



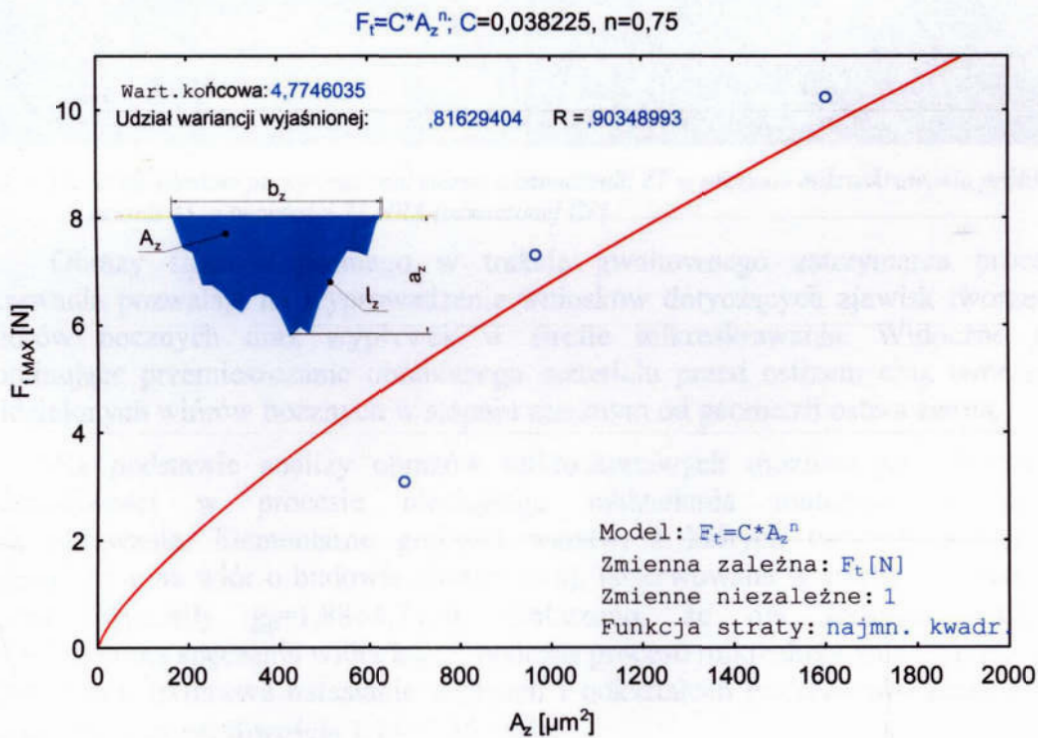
Rys. 6.53. Powierzchnia próbki C7 z widocznymi śladami skrawania ostrza ziarna o oznaczeniu Z7, które uległo wykruszeniu wierzchołka ostrza, co było przyczyną zatrzymania procesu mikroskrawania tym ostrzem

Tablica 6.6. Zestawienie pomiarów dla próbki ze stali 45, o twardości 71 HRA (oznaczonej C7 (oznaczonej C7) skrawanej ziarnem o oznaczeniu Z7

Lp	a_z [µm]	A_z [µm ²]	L [mm]	b_z [µm]	F_t MAX [N]	F_n MAX [N]	Oznaczenie rysy
1	12,401	966,2	3,57	157,0	7,32	7,76	1c
2	17,405	1602,7	3,97	180,0	10,25	9,81	3b
3	9,834	676,8	3,11	149,0	3,08	4,39	4a
4	19,297	2067,3	(1,44)	196,0	4,10	6,03	4b

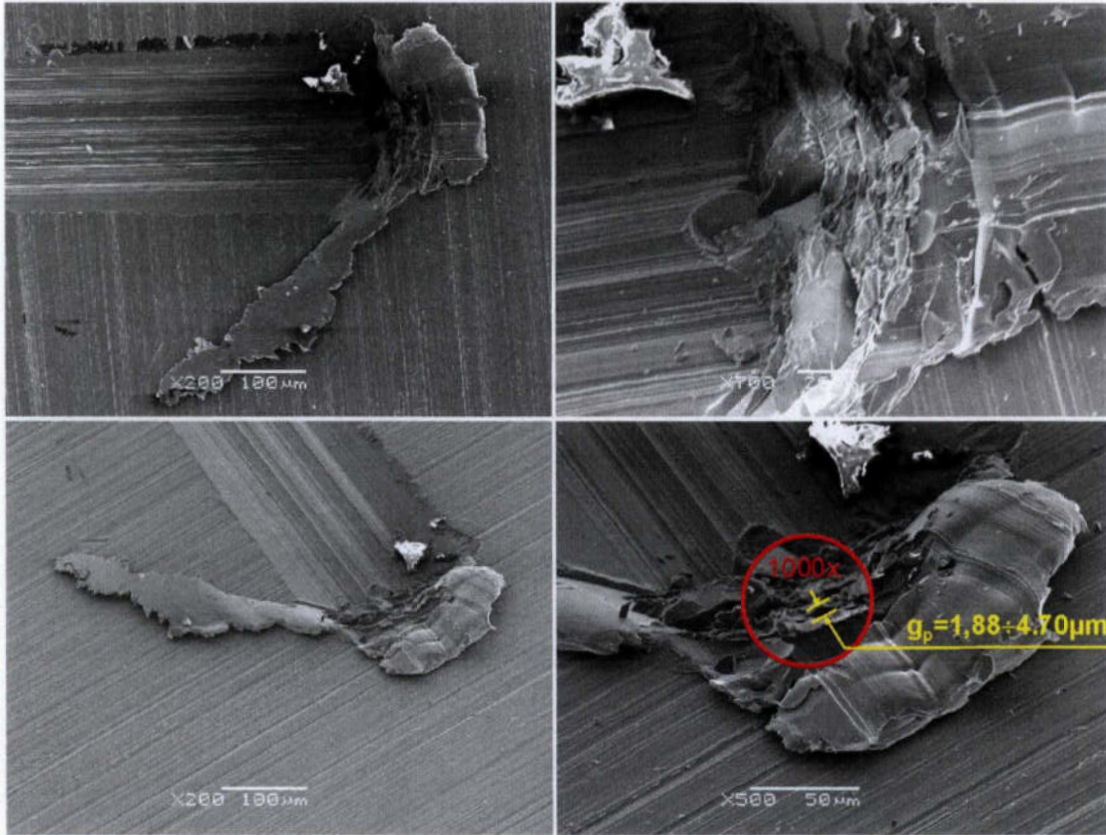


Rys. 6.54. Wartości maksymalne składowej normalnej F_n siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 71 HRA (oznaczonej C7), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z7



Rys. 6.55. Wartości maksymalne składowej stycznej F_t siły skrawania w funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla próbki ze stali 45, o twardości 71 HRA (oznaczonej C7), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z7

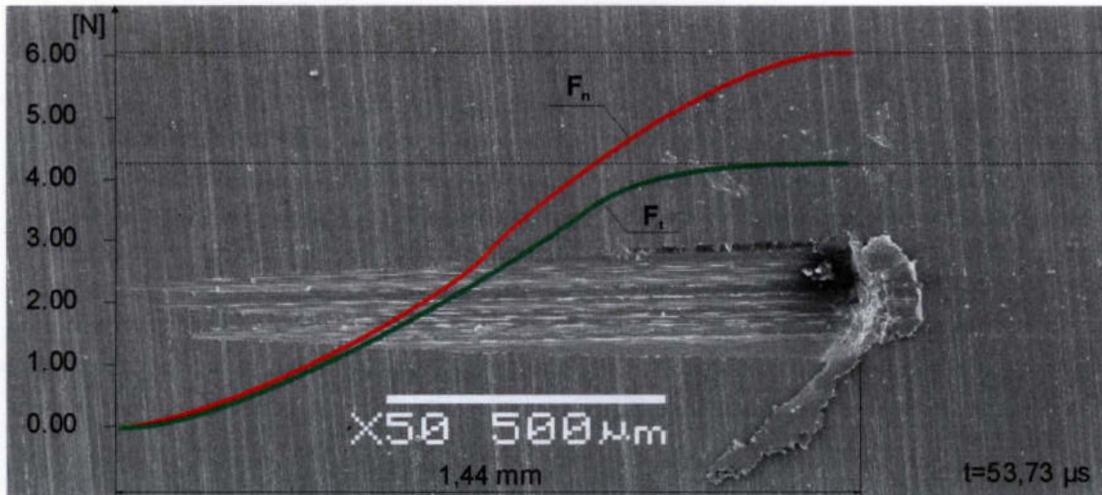
Na rysunkach 6.56, i 6.57 i 6.58 przedstawiono obrazy mikroskopowe rysy oznaczonej 4b, ze strefą mikroskrawania po wykruszeniu wierzchołka ziarna Z8. Rysunek 6.57 zawiera ponadto zmiany wartości składowych normalnej F_n i stycznej F_t siły skrawania przed wykruszeniem wierzchołka ziarna, a rysunek 6.58 zawiera pomiary rysy i wiórów powstałych w czasie procesu.



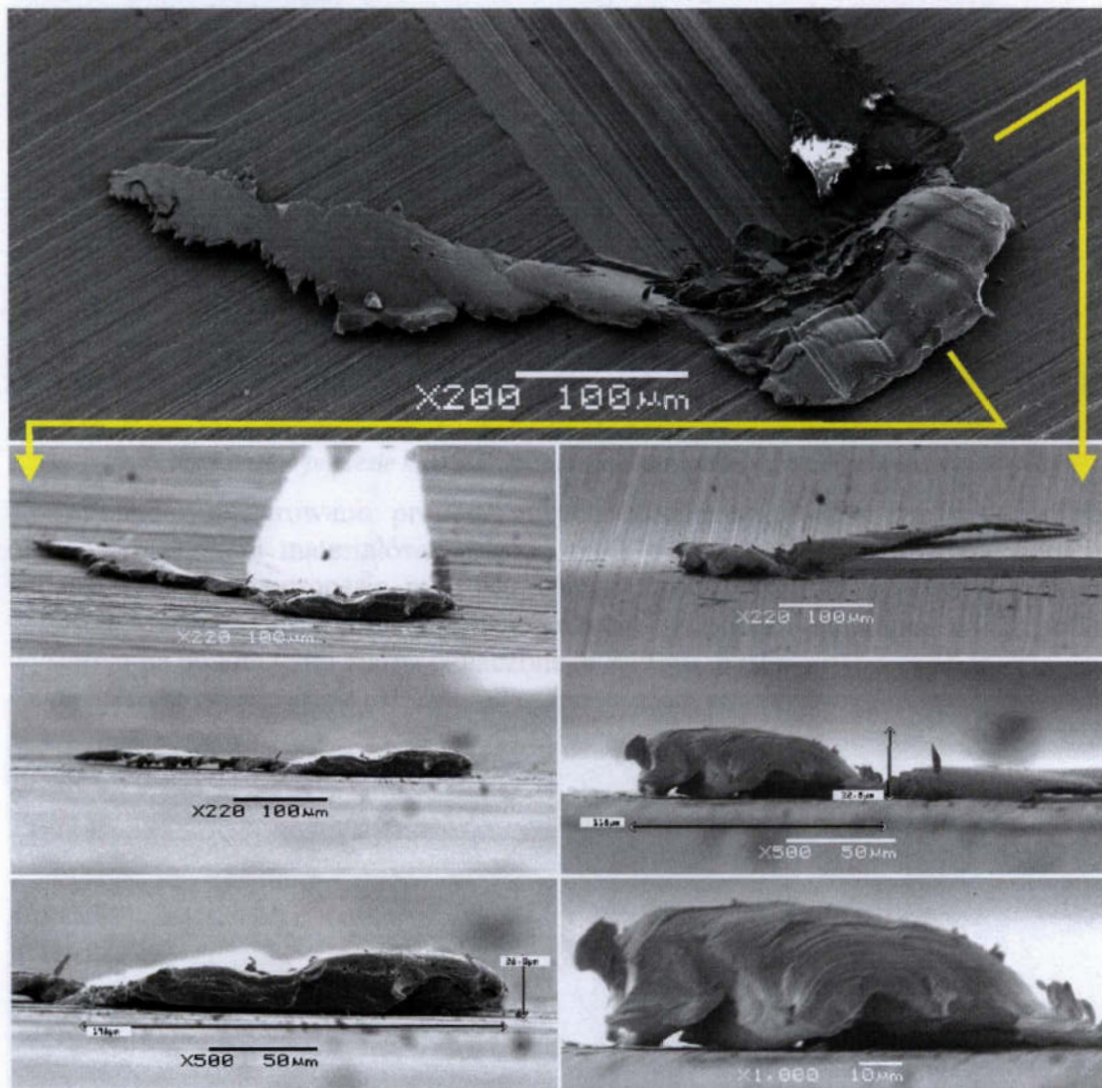
Rys. 6.56. Strefa obróbki po wykruszeniu ziarna o oznaczeniu Z7 w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 71 HRA (oznaczonej C7)

Obrazy śladu uzyskanego w trakcie gwałtownego zatrzymania procesu skrawania pozwalają na wyprowadzenie wniosków dotyczących zjawisk tworzenia wiórów bocznych oraz wypływek w strefie mikroskrawania. Widoczne jest dominujące przemieszczanie obrabianego materiału przed ostrzem oraz tworzenie oddzielonych wiórów bocznych w stopniu zależnym od geometrii ostrza ziarna.

Na podstawie analizy obrazów mikroskopowych możliwe jest obliczenie częstotliwości w procesie nieciągłego oddzielania materiału w strefie mikroskrawania. Elementarne grubości warstw, z których tworzyły się płytki składając się na wiór o budowie elementowej, obserwowane w strefie wykruszenia ziarna, wynosiły $g_p=1,88\pm 4,7\ \mu\text{m}$. Obliczono, że dla średnich wartości współczynnika spęczania wióra $k_{sp}=5$, podczas procesu mikroskrawania z prędkością $v_s=26,8\ \text{m/s}$, okresowe narastanie naprężeń i odkształceń podczas tworzenia wióra zachodziło z częstotliwością $1,14\pm 2,85\ \text{MHz}$.



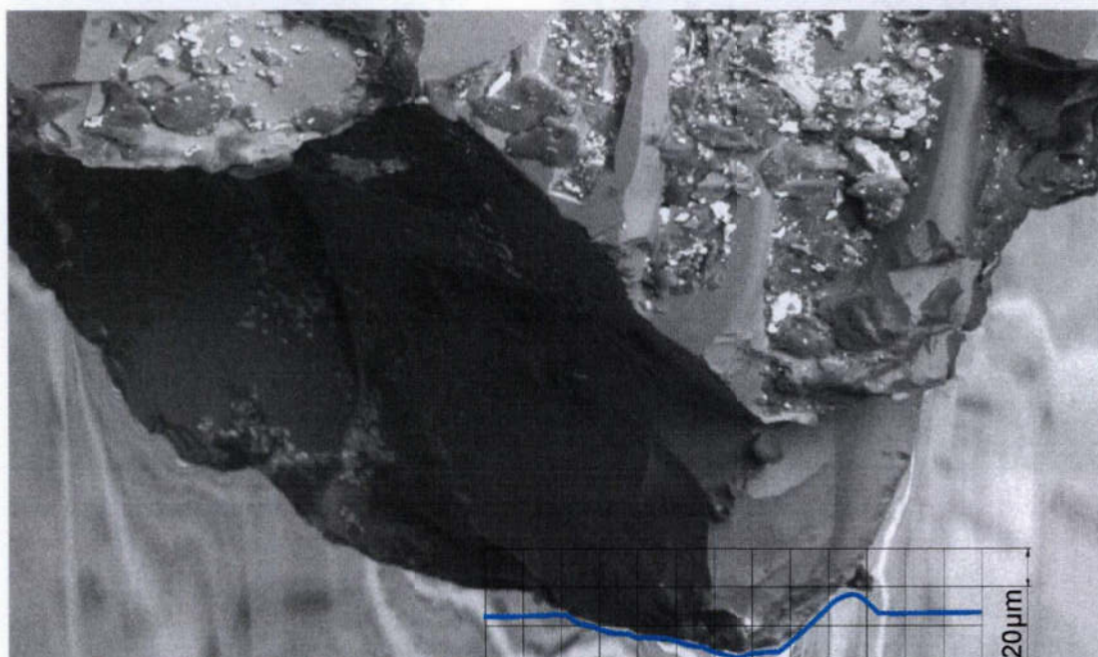
Rys. 6.57. Zmiany wartości składowej normalnej F_n siły skrawania w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 71 HRA (oznaczonej C7), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z7 w funkcji położenia ziarna wzdłuż drogi kontaktu z materiałem



Rys. 6.58. Pomiary wiórów uzyskanych podczas mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 71 HRA (oznaczonej C7), po wykruszeniu ziarna oznaczonego Z7

6.3.4. Rejestracja procesu zużycia ziaren ściernych

Analiza zużycia ziaren ściernych wymagała sprawdzenia czy możliwe jest wnioskowanie o zużyciu ostrza skrawającego na podstawie zarysu śladu skrawania. Po przeanalizowaniu śladów skrawania i odpowiadających im rzutów ostrza z obrazów mikroskopowych, wnioskuje się, że jest to możliwe. Na rysunku 6.59 przedstawiono przykład analizy dla ziarna wraz z dopasowaniem geometrii ziarna z elektrokorundu szlachetnego do profilu rysy uzyskanej w procesie mikroskrawania stali narzędziowej, stopowej NC6, ulepszonej cieplnie do twardości 50 HRC.



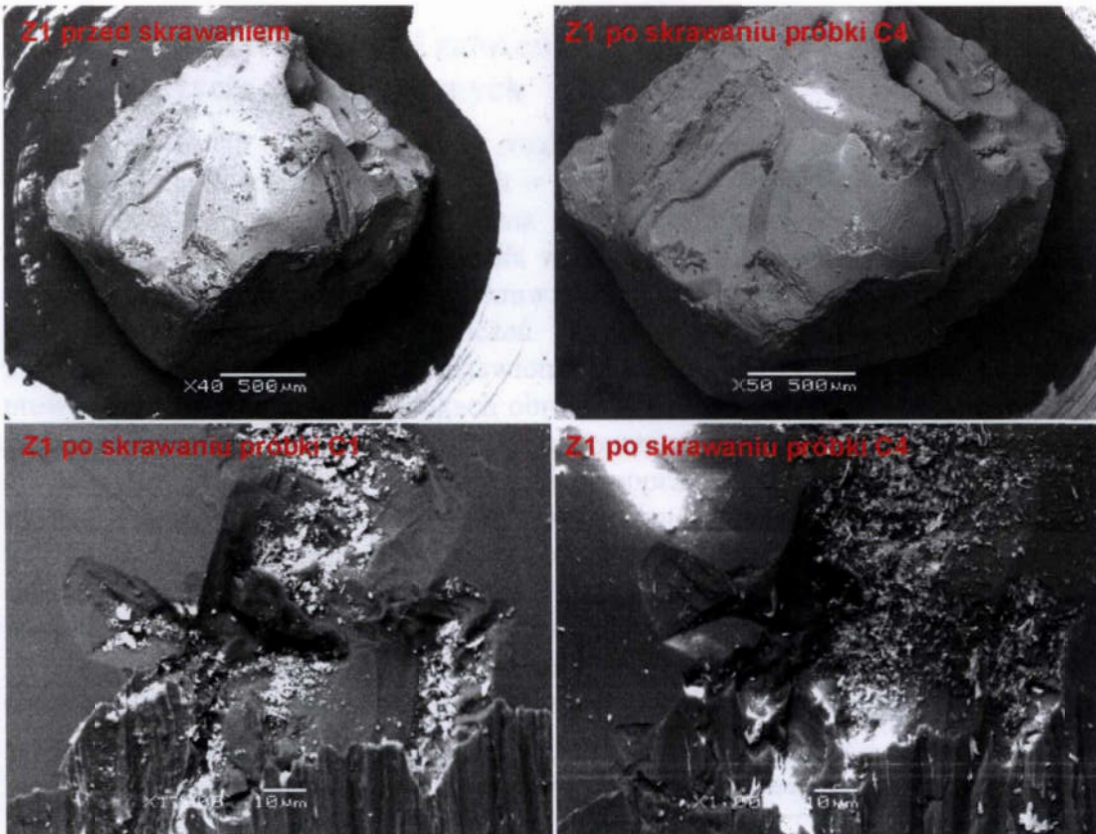
Rys. 6.59. Geometria ostrza ziarna z elektrokorundu szlachetnego wraz z dopasowaniem do profilu rysy uzyskanej w procesie mikroskrawania stali narzędziowej NC6, o twardości 50 HRC

Ponadto rejestrowano procesy zużycia ziaren w procesie mikroskrawania objętych badaniami materiałów. Rysunki 6.60, 6.61 i 6.62 przedstawiają zużycie badanych ziaren w procesie mikroskrawania. Zaobserwowano przewagę zużycia w postaci mikrowykruszeń. Natomiast zużycie w postaci ścierania wierzchołka wystąpiło na powierzchni ziarna oznaczonego Z1 (rys. 6.61)

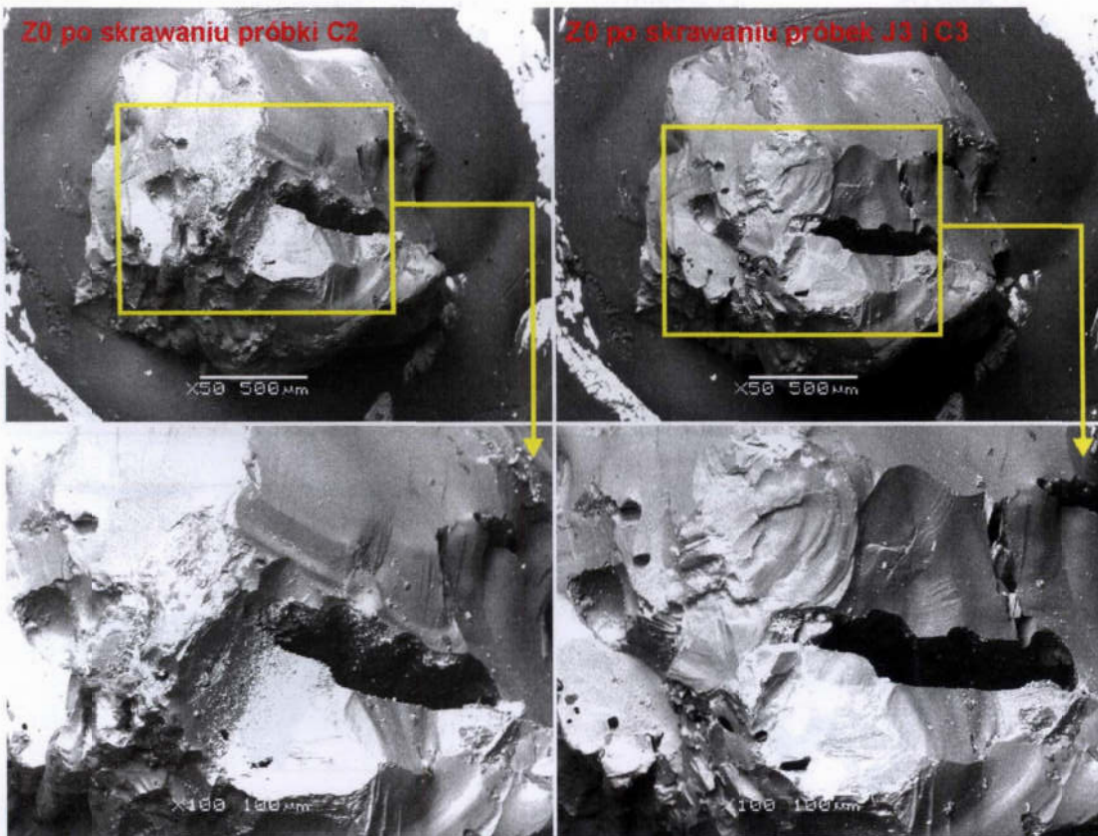


Rys. 6.60. Zużycie ziarna oznaczonego Z2 po skrawaniu próbki oznaczonej C4

Rys. 6.61. Zużycie ziarna oznaczonego Z1 w skrawaniu próbki oznaczonej C4



Rys. 6.61. Zużycie ziarna oznaczonego Z1 po skrawaniu próbki oznaczonej C1 i C4



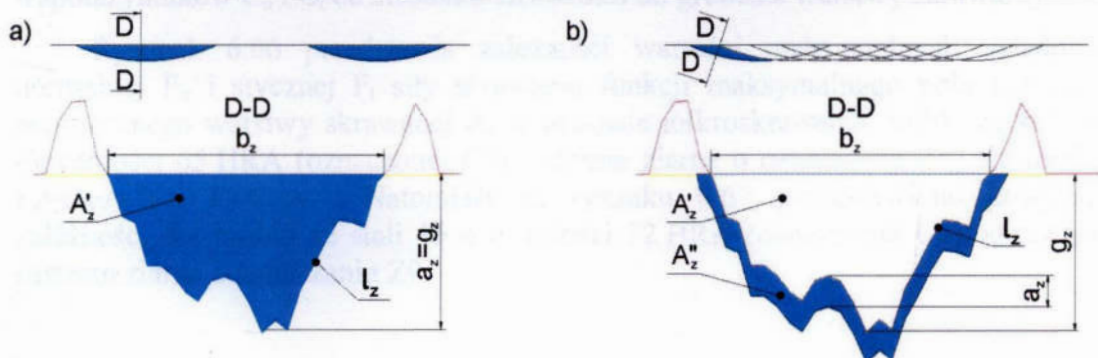
Rys. 6.62. Zużycie ziarna oznaczonego Z0 po skrawaniu próbki oznaczonej J3 i C3

6.4. Wyniki weryfikacji założeń do modeli obciążenia i zużycia ziaren ściernych

Celem badań opisanych w tym rozdziale była weryfikacja założeń do modeli obciążenia ziaren ściernych, opisanych w rozdziale czwartym, w których zakładano wyznaczenie wartości obciążenia ziarna za pomocą modelu $F_n=C \cdot A_z^n$ i $F_t=C \cdot A_z^n$. Zestawienie współczynników C i n dla wyznaczonych modeli zależności wartości składowej normalnej i stycznej siły skrawania od pola przekroju warstwy skrawanej dla przeprowadzonych doświadczeń mikroskrawania stali 45 ziarnami z elektrokorundu szlachetnego zestawiono w tablicy 6.7. Proces mikroskrawania prowadzono w zmiennych warunkach obróbki (oznaczonych jako a i b – rys. 6.63), mających wpływ na kształt i pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z . Na rysunku 6.63 przedstawiono pola przekrojów poprzecznych warstwy skrawanej dla dwóch odmiennych warunków. W pierwszym przypadku kolejne kontakty pojedynczego ziarna ściernego następują poza wcześniej wykonanymi śladami skrawania. Grubość warstwy skrawanej a_z równa jest głębokości skrawania g_z , czyli $A_z=A_z'$ (rys. 6.63a). W drugim przypadku (rys. 6.63b) kształt i pole warstwy skrawanej są odmienne i można oczekiwać, że opór jednostkowy będzie większy. Grubość warstwy skrawanej a_z jest mniejsza od głębokości skrawania g_z , $A_z=A_z''$.

Tablica 6.7. Zestawienie wartości współczynników estymacji zależności wartości składowych siły skrawania od pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej

Materiał / twardość próbki	Warunki skrawania / Oznaczenie ziarna		Stała C_a ziarna	$F_n=C_n \cdot A_z^{n_n}$		$F_t=C_t \cdot A_z^{n_t}$	
				Składowa normalna F_n siły skrawania		Składowa styczna F_t siły skrawania	
				C_n	n_n	C_t	n_t
	a		8,55505				
(C4) 45/76HRA	b	Z1	68,5454	0,553162	0,586986	0,093902	0,745844
	a		7,38113				
(C4) 45/76HRA	b	Z2	58,4058	0,120111	0,739052	0,063963	0,750992
(C5) 45/65HRA	a	Z8	7,84114	0,044586	0,744952	0,006533	0,960425
(C6) 45/72HRA	a	Z9	2,64495	0,172930	0,686942	0,048725	0,753294
(C7) 45/71HRA	a	Z7	5,57772	0,060402	0,690000	0,038225	0,750000



Rys. 6.63. Pola przekroju poprzecznego dla różnych warunków skrawania: a) skrawanie z tworzeniem oddzielnych rys $a_z=g_z$, $A_z=A'$, b) skrawanie z tworzeniem rys ciągłych $a_z < g_z$, $A_z=A''$

W celu porównania jednostkowych oporów skrawania $k_{st}=C_t \cdot A_z^{1-n_t}$ dla różnych warunków obróbki wyznaczono zależności $F_n=C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t=C_t \cdot A_z^{n_t}$ dla średnich wartości wykładników n_n i n_t .

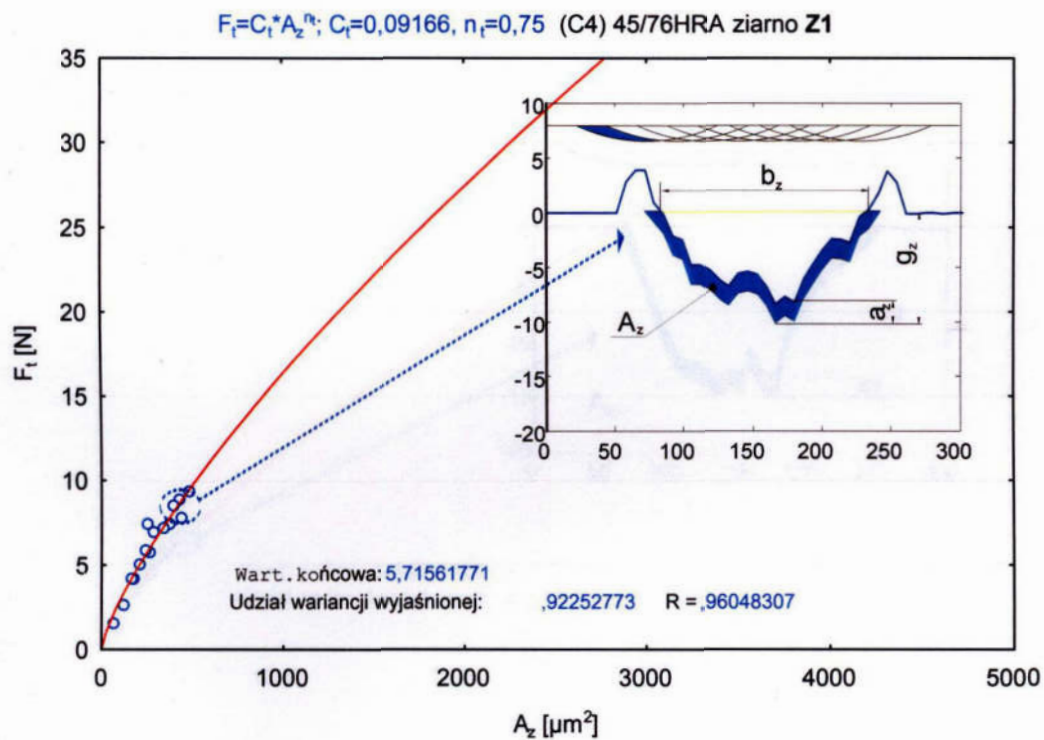
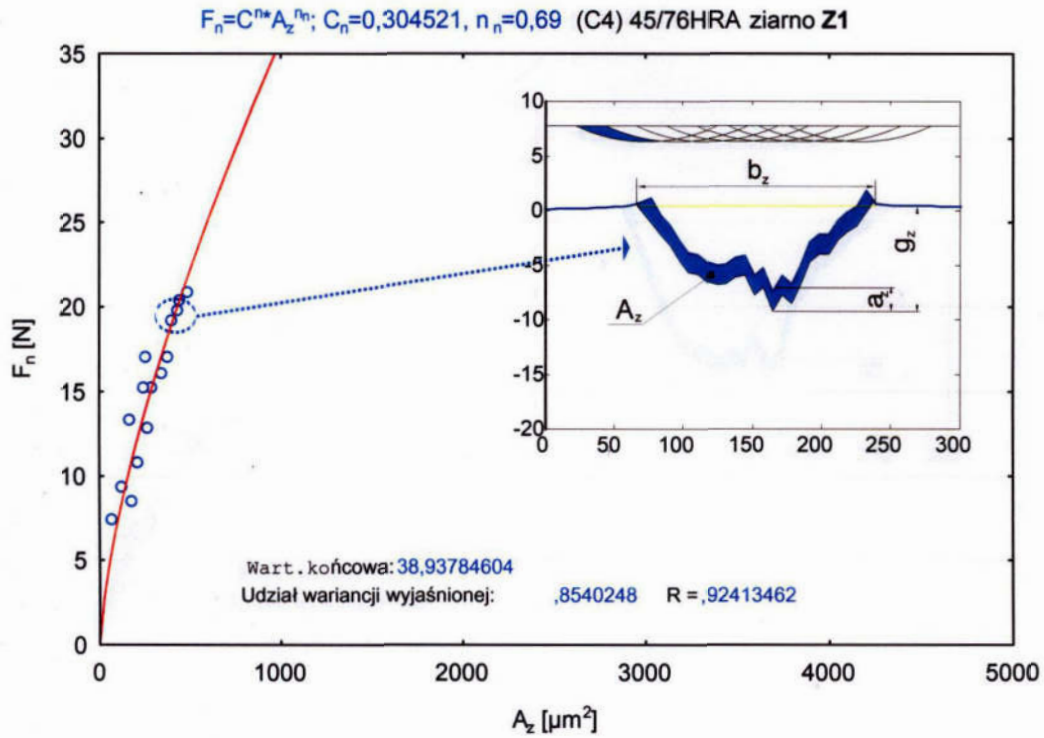
Dla składowej normalnej F_n siły skrawania średnia wartość wykładnika wynosi $n_n=0,69$ (odchylenie $S_{n_n}=0,06$), natomiast dla składowej stycznej F_t siły skrawania średnia wartość wykładnika wynosi $n_t=0,75$ (odchylenie $S_{n_t}=0,03$). W tabelicy 6.8 zestawiono wartości współczynników C_n i C_t po przeprowadzeniu ponownych obliczeń zależności wartości składowych siły skrawania od pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej dla uśrednionej wartości wykładników n_n i n_t .

Tabela 6.8 Zestawienie wartości współczynników estymacji zależności wartości składowych siły skrawania od pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej

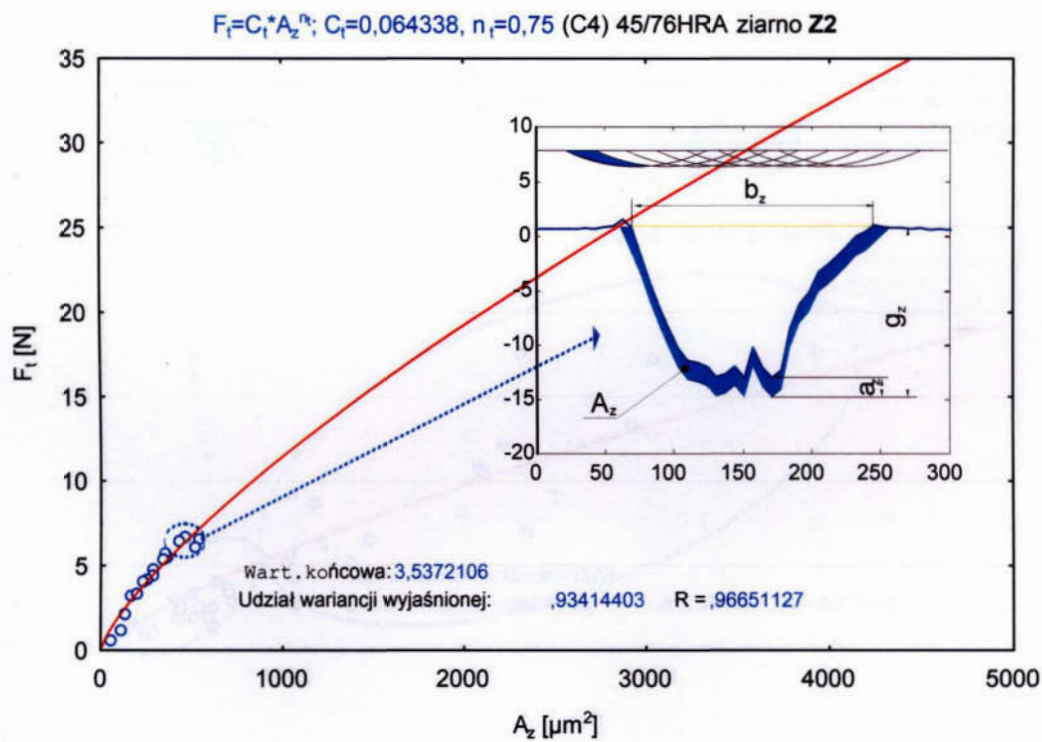
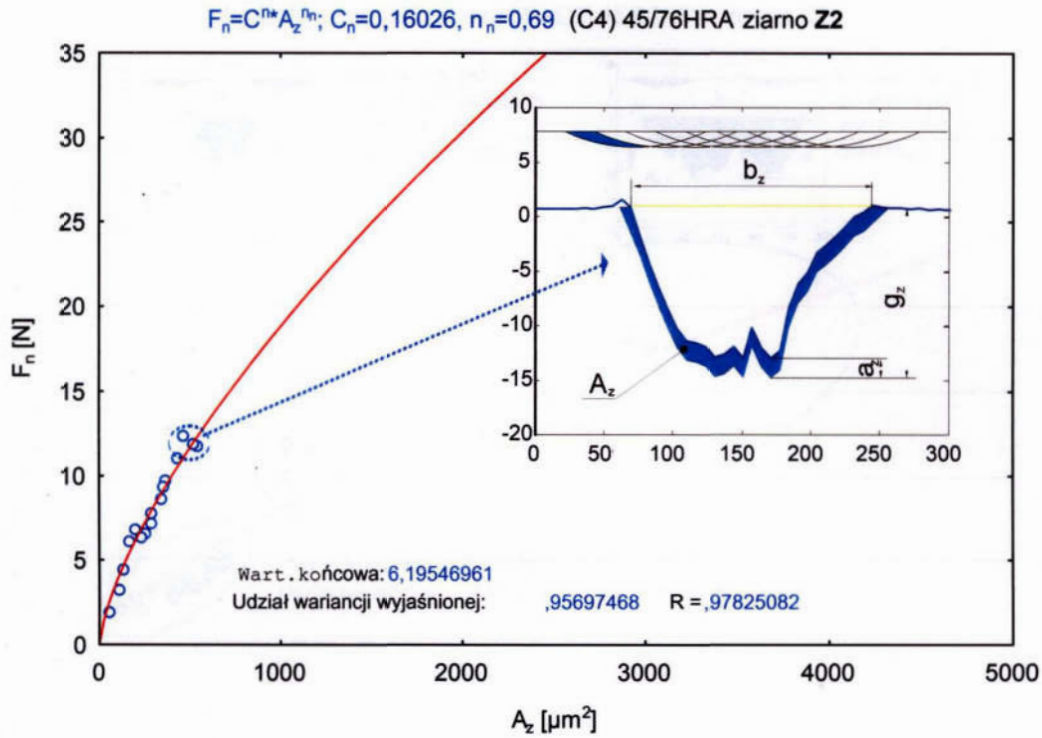
Materiał oraz twardość próbki	Ziarno	Wartość współczynnika C_n dla składowej normalnej F_n siły skrawania, $n_n=0,69$	Wartość współczynnika C_t dla składowej stycznej F_t siły skrawania, $n_t=0,75$
(C4) 45/76HRA	Z1	0,304521	0,0916600
(C4) 45/76HRA	Z2	0,160260	0,0643380
(C5) 45/65HRA	Z8	0,067450	0,0323250
(C6) 45/72HRA	Z9	0,169378	0,0498320
(C7) 45/71HRA	Z7	0,060402	0,0038225

Na rysunkach 6.64 i 6.65 przedstawiono odpowiednio zależności wartości maksymalnych składowej normalnej F_n i stycznej F_t siły skrawania funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4) skrawanej wierzchołkami ziaren o oznaczeniach Z1 oraz Z2, dla modeli $F_n=C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t=C_t \cdot A_z^{n_t}$. Na wykresach przedstawiono ponadto profile śladów mikroskrawania będące odzwierciedleniem geometrii ostrza skrawającego ziarna. Proces mikroskrawania ziarnami oznaczonymi Z1 i Z2 prowadzony był dla takich samych warunków. Wnioskuje się zatem, że różnice w wartości współczynników C_n i C_t spowodowane są odmienną geometrią ostrza skrawającego. Ziarno oznaczone Z1 charakteryzowało się większą wartością współczynnika C_a (dla modelu $A_z=C_a \cdot a_z^2$) w porównaniu z ziarnem Z2, czyli warstwa skrawana ziarnem oznaczonym Z1 charakteryzowała się większą szerokością b_z dla tej samej grubości warstwy a_z . Zaobserwowano zależność współczynników C_n i C_t od stosunku szerokości do grubości warstwy skrawanej.

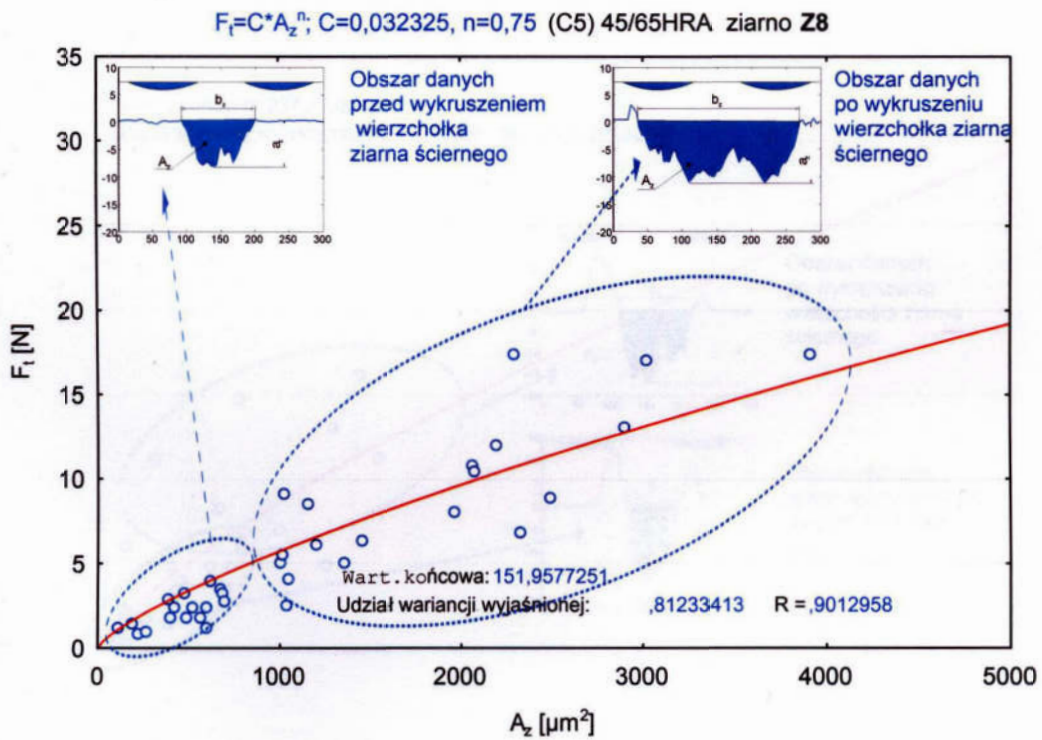
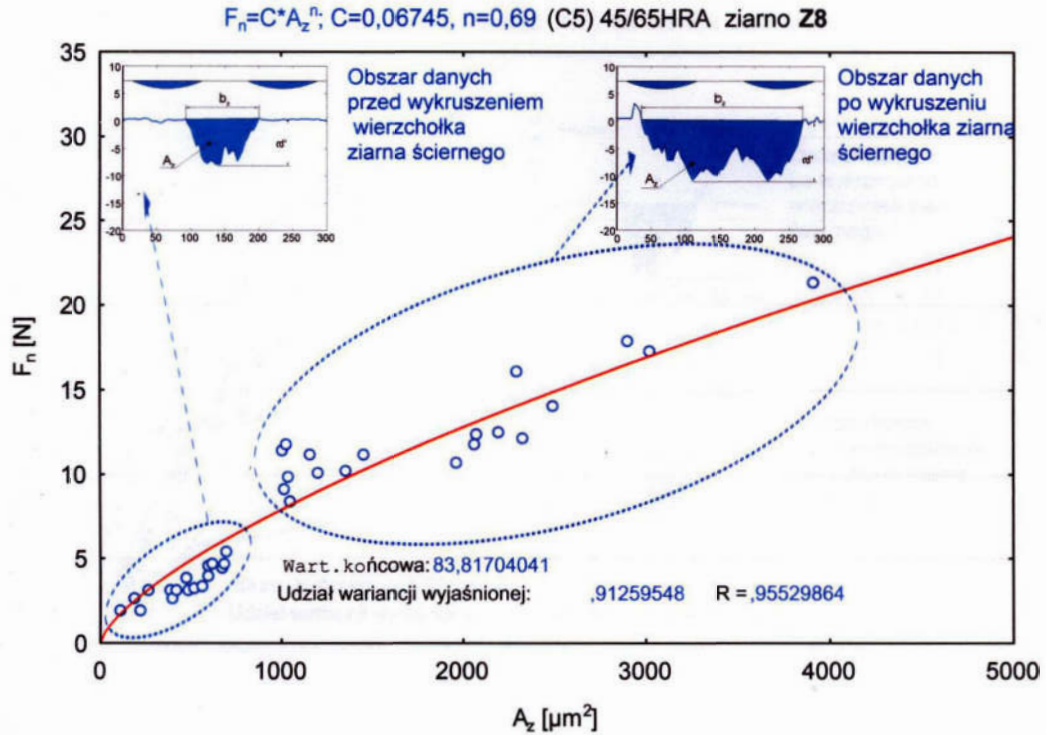
Rysunek 6.66 przedstawia zależności wartości maksymalnych składowej normalnej F_n i stycznej F_t siły skrawania funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w procesie mikroskrawania próbki ze stali 45 o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8, dla modeli $F_n=C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t=C_t \cdot A_z^{n_t}$. Natomiast na rysunku 6.67 przedstawiono powyższe zależności dla próbki ze stali 45 o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9.



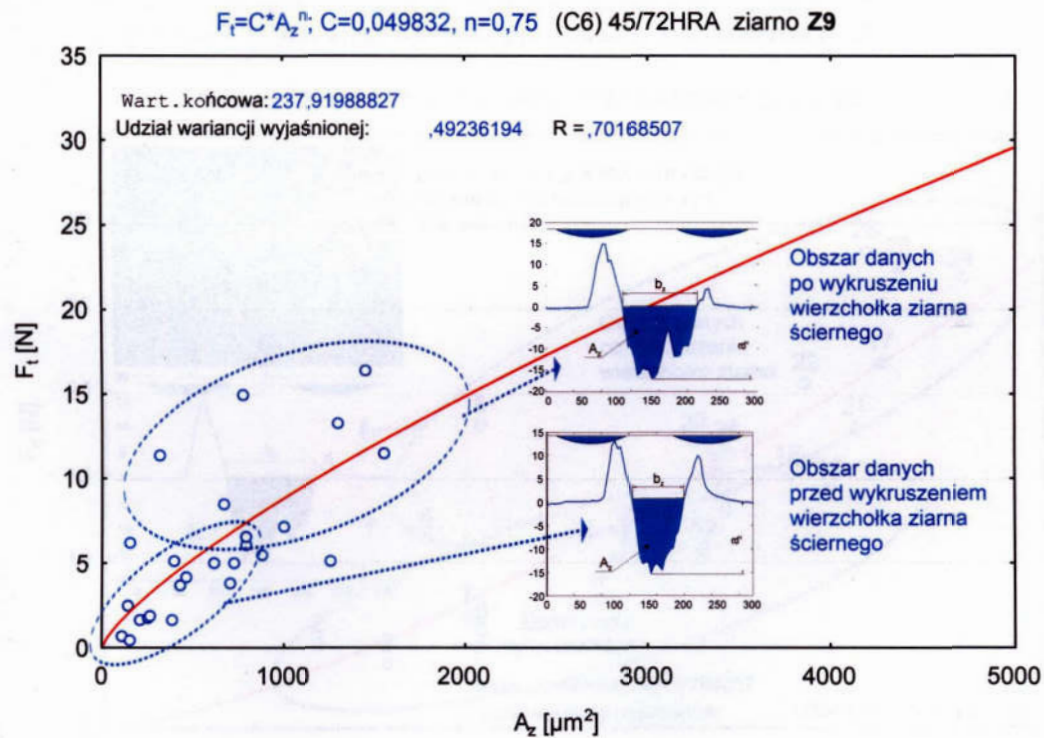
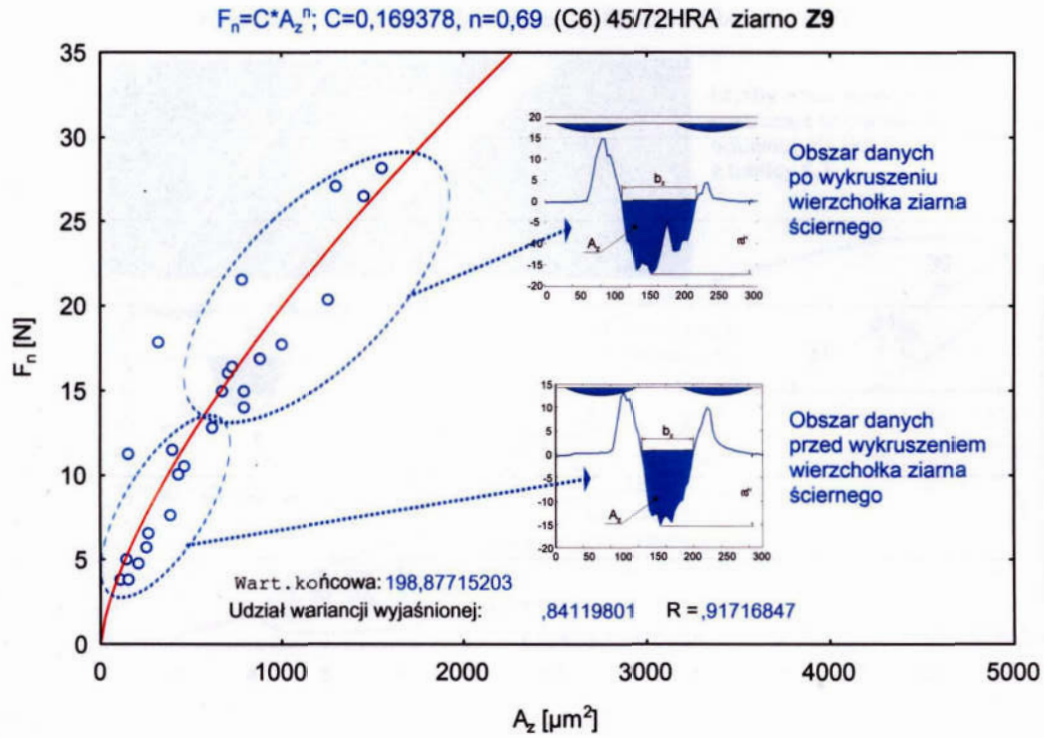
Rys. 6.64 Wykresy zależności $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t = C_t \cdot A_z^{n_t}$ dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej wierzchołkiem ostrza ziarna oznaczonego Z1



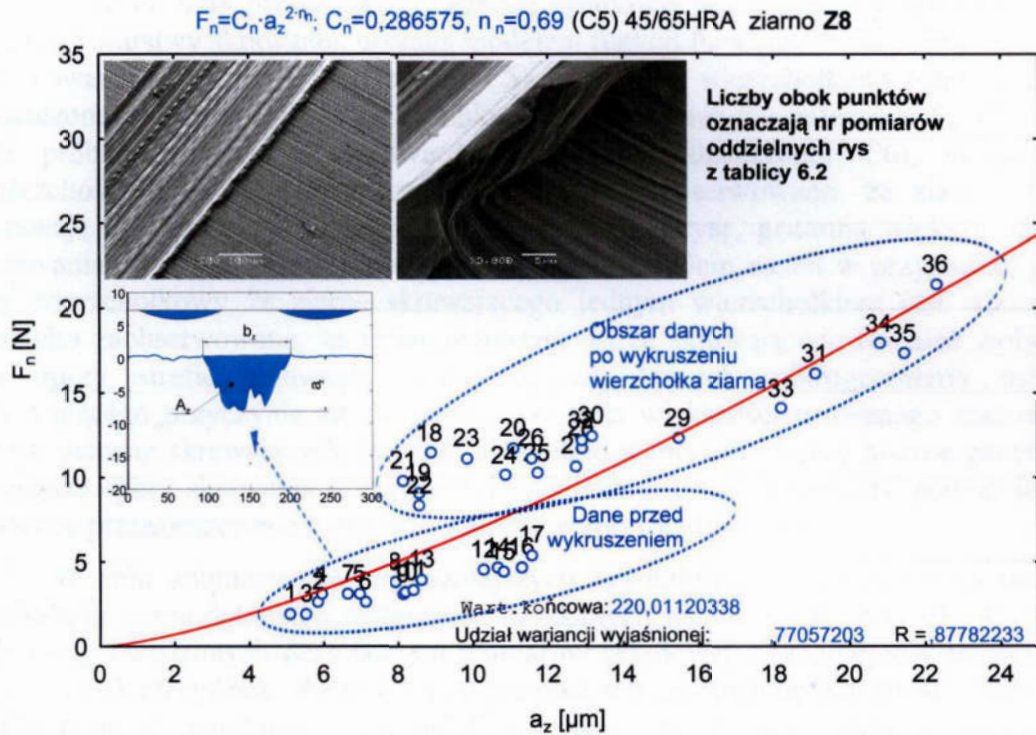
Rys. 6.65 Wykresy zależności $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t = C_t \cdot A_z^{n_t}$ dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej wierzchołkiem ostrza ziarna oznaczonego Z2



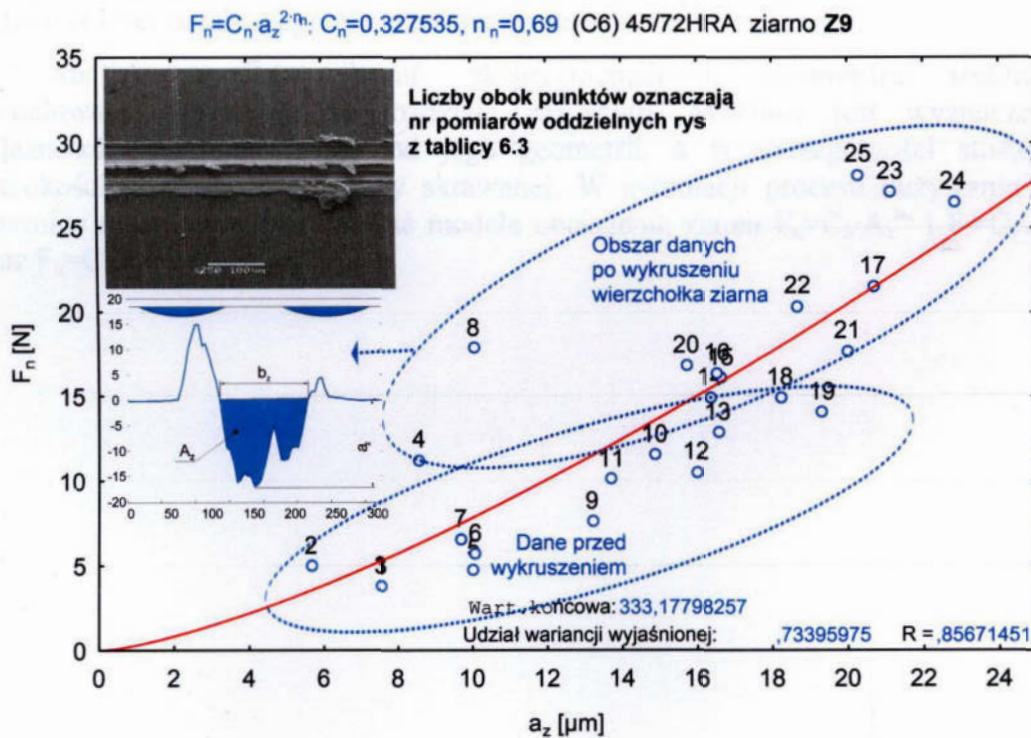
Rys. 6.66 Wykresy zależności $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t = C_t \cdot A_z^{n_t}$ dla próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), skrawanej wierzchołkiem ostrza ziarna oznaczonego Z8



Rys. 6.67 Wykresy zależności $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t = C_t \cdot A_z^{n_t}$ dla próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej wierzchołkiem ostrza ziarna oznaczonego Z9



Rys. 6.68 Wykres zależności $F_n = C_n \cdot a_z^{2 \cdot n_n}$ dla próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), skrawanej wierzchołkiem ostrza ziarna oznaczonego Z8

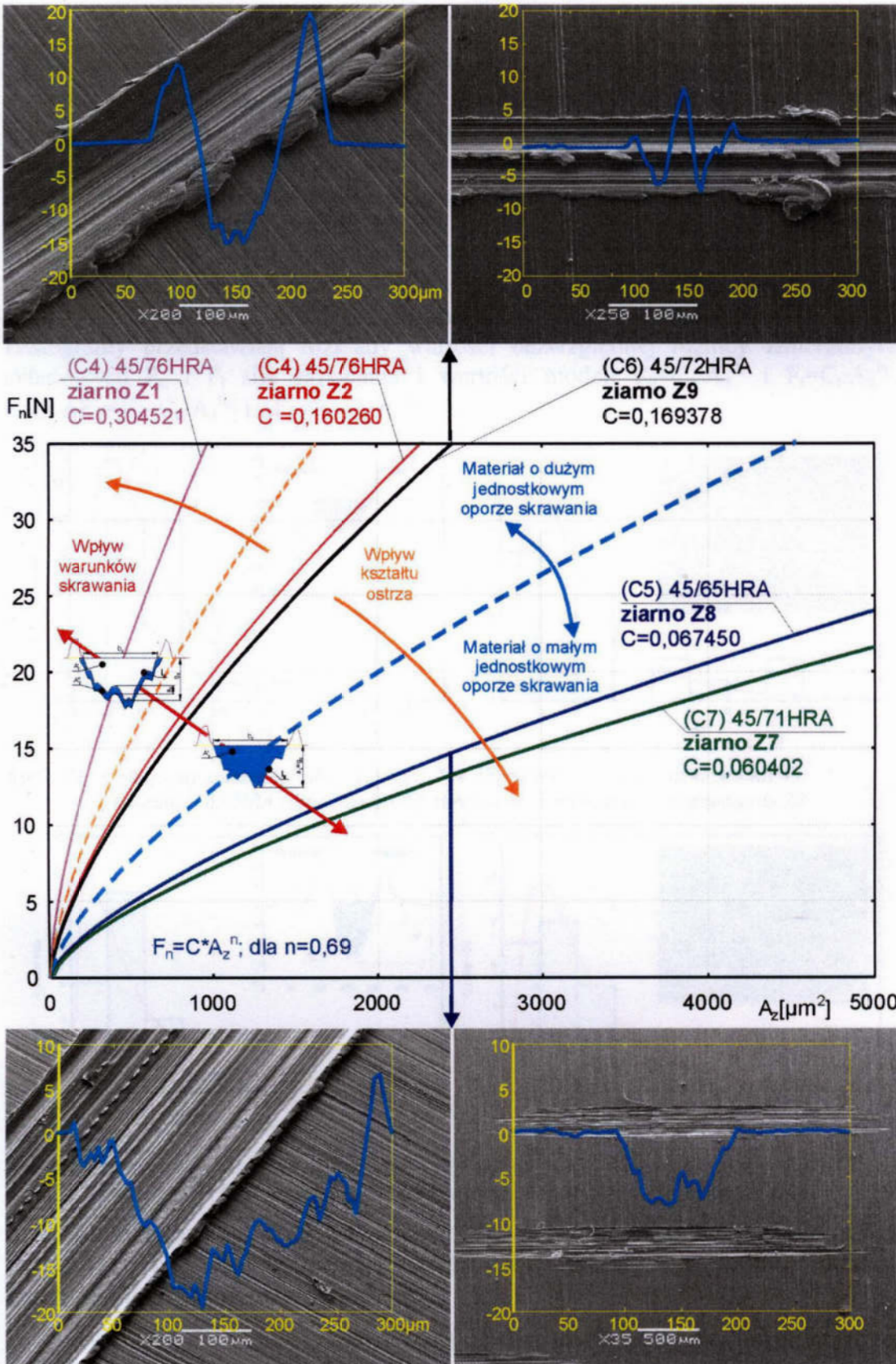


Rys. 6.69 Wykres zależności $F_n = C_n \cdot a_z^{2 \cdot n_n}$ dla próbki ze stali 45 o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej wierzchołkiem ostrza ziarna oznaczonego Z9

Rysunek 6.68 przedstawia zależność składowej normalnej siły skrawania od grubości warstwy skrawanej, opisaną modelem funkcji $F_n = C_n \cdot a_z^{2 \cdot n_n}$ dla próbki ze stali 45 o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), skrawanej wierzchołkiem ostrza ziarna oznaczonego Z8. Natomiast na rysunku 6.69 przedstawiono zależność $F_n = C_n \cdot a_z^{2 \cdot n_n}$ dla próbki ze stali 45 o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej wierzchołkiem ostrza ziarna oznaczonego Z9. Zaobserwowano, że ziarna które skrawają dwoma wierzchołkami, tworząc podwójną ryse, generują większe opory skrawania od ziaren skrawających jednym wierzchołkiem nawet w przypadku, gdy kąt wierzchołkowy 2ε ziarna skrawającego jednym wierzchołkiem jest większy. Ponadto zaobserwowano, że mikrogeometria ostrza skrawającego również wpływa na opory w strefie skrawania ziarna. Ziarna, których mikrogeometria ostrza skrawającego przyczynia się do przemieszczenia większości usuwanego materiału przed ostrzem skrawających, tworząc niewielkie wypłytki i wióry boczne generują mniejsze opory skrawania w porównaniu z ziarnami o mikrogeometrii powodującej znaczne przemieszczenie materiału w strefie wypłytek bocznych.

W celu zobrazowania najważniejszych czynników wpływających na opory skrawania ziarna dokonano zestawienia uzyskanych wyników zależności $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ dla przeprowadzonych doświadczeń pomiarów składowej normalnej siły skrawania dla wszystkich próbek. Rysunku 6.70 przedstawia zestawienie zależności wartości maksymalnych składowej normalnej F_n siły skrawania funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla wartości wykładnika $n_n = 0,69$. Zaznaczono wpływ geometrii ostrza opisanej zależnością b_z / a_z i warunków skrawania, od których zależy kształt i wielkości pola przekroju warstwy skrawanej, oraz twardości obrabianego materiału na obciążenie ziarna ściernego.

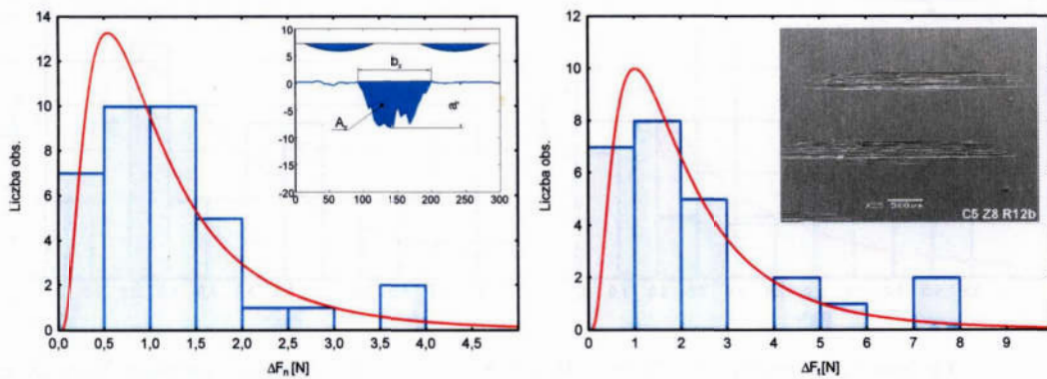
Analiza wyników badań eksperymentalnych potwierdza słuszność modelowania opisanego w rozdziale czwartym. Możliwe jest wyznaczenie zależności obciążenia ziaren od jego geometrii, a w szczególności stosunku szerokości do grubości warstwy skrawanej. W symulacji procesu zużywania się ściernicy można więc zastosować modele obciążenia ziaren $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t = C_t \cdot A_z^{n_t}$ oraz $F_n = C_n \cdot a_z^{2 \cdot n_n}$ i $F_t = C_t \cdot a_z^{2 \cdot n_t}$.



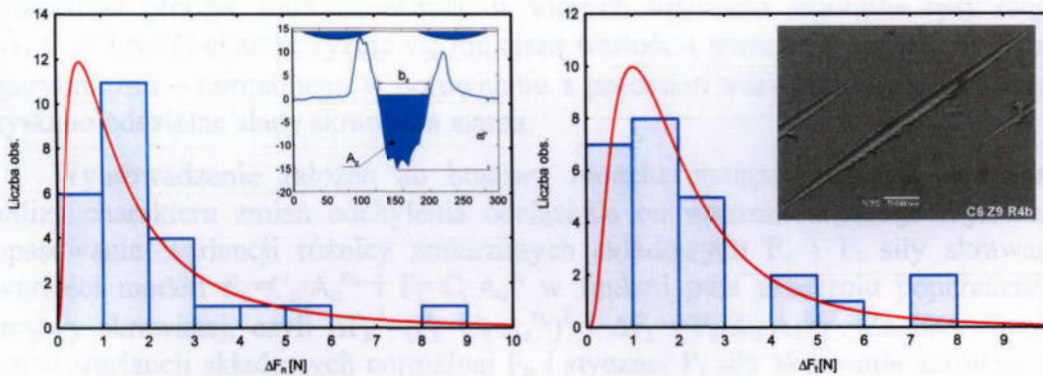
Rys. 6.70. Zestawienie zależności $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ wartości maksymalnych składowej normalnej F_n siły skrawania funkcji maksymalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z dla uśrednionej wartości wykładnika $n_n = 0,69$

6.5. Założenia do budowy modelu i symulacji dotyczące obciążenia ziaren ściernych

W celu wyprowadzenia założeń do budowy modelu obciążenia ziaren ściernych dokonano analizy otrzymanych wyników badań eksperymentalnych. Przeprowadzono statystyczną analizę obciążenia ziarna, ze szczególnym uwzględnieniem charakteru zmian obciążenia wraz ze wzrostem przekroju warstwy skrawanej materiału. Na rysunkach 6.71 i 6.72 przedstawiono analizę obciążenia odpowiednio dla mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8 oraz mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9. Histogramy przedstawiają rozkłady wartości bezwzględnej różnicy zmierzonych składowych F_n i F_t siły skrawania i wartości modeli $F_n=C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t=C_t \cdot A_z^{n_t}$, czyli $\Delta F_n=|F_n-C_n \cdot A_z^{n_n}|$ i $\Delta F_t=|F_t-C_t \cdot A_z^{n_t}|$.



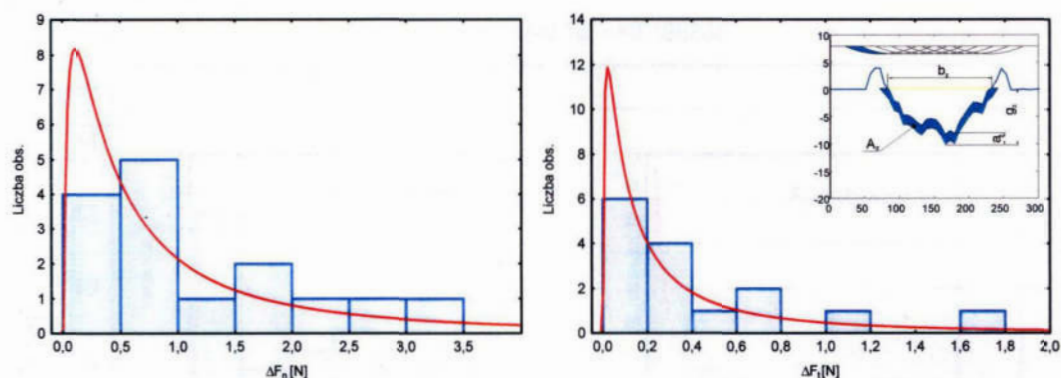
Rys. 6.71. Histogramy zależności $\Delta F_n=|F_n-C_n \cdot A_z^{n_n}|$ i $\Delta F_t=|F_t-C_t \cdot A_z^{n_t}|$ dla próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8



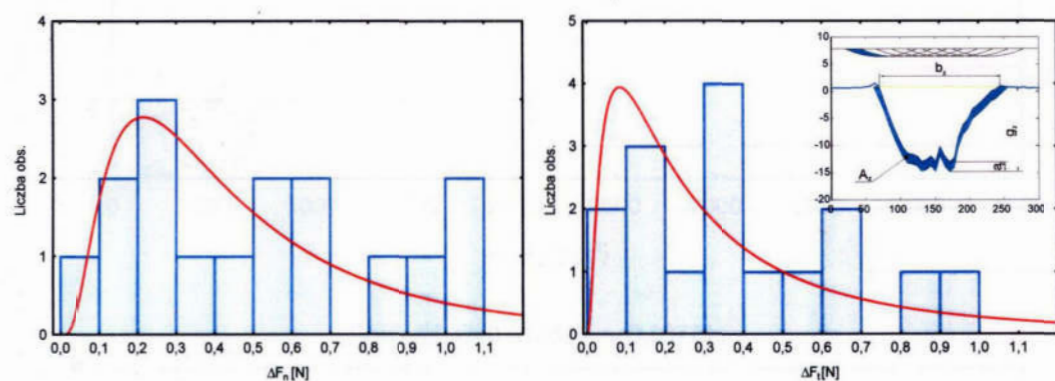
Rys. 6.72. Histogramy zależności $\Delta F_n=|F_n-C_n \cdot A_z^{n_n}|$ i $\Delta F_t=|F_t-C_t \cdot A_z^{n_t}|$ dla próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9

Zaobserwowano, że różnica zmierzonego obciążenia ziarna i wartości modeli $F_n=C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t=C_t \cdot A_z^{n_t}$ wykazują charakter zmian zbliżony do procesu opisanego rozkładem logarytmiczno – normalnym.

Rysunki 6.73 i 6.74 przedstawiają analizę obciążenia dla mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4) skrawanej ostrzami ziaren oznaczonymi Z1 i Z2, dla warunków procesu mikroskrawania, w których uzyskano regularne rysy ciągłe.



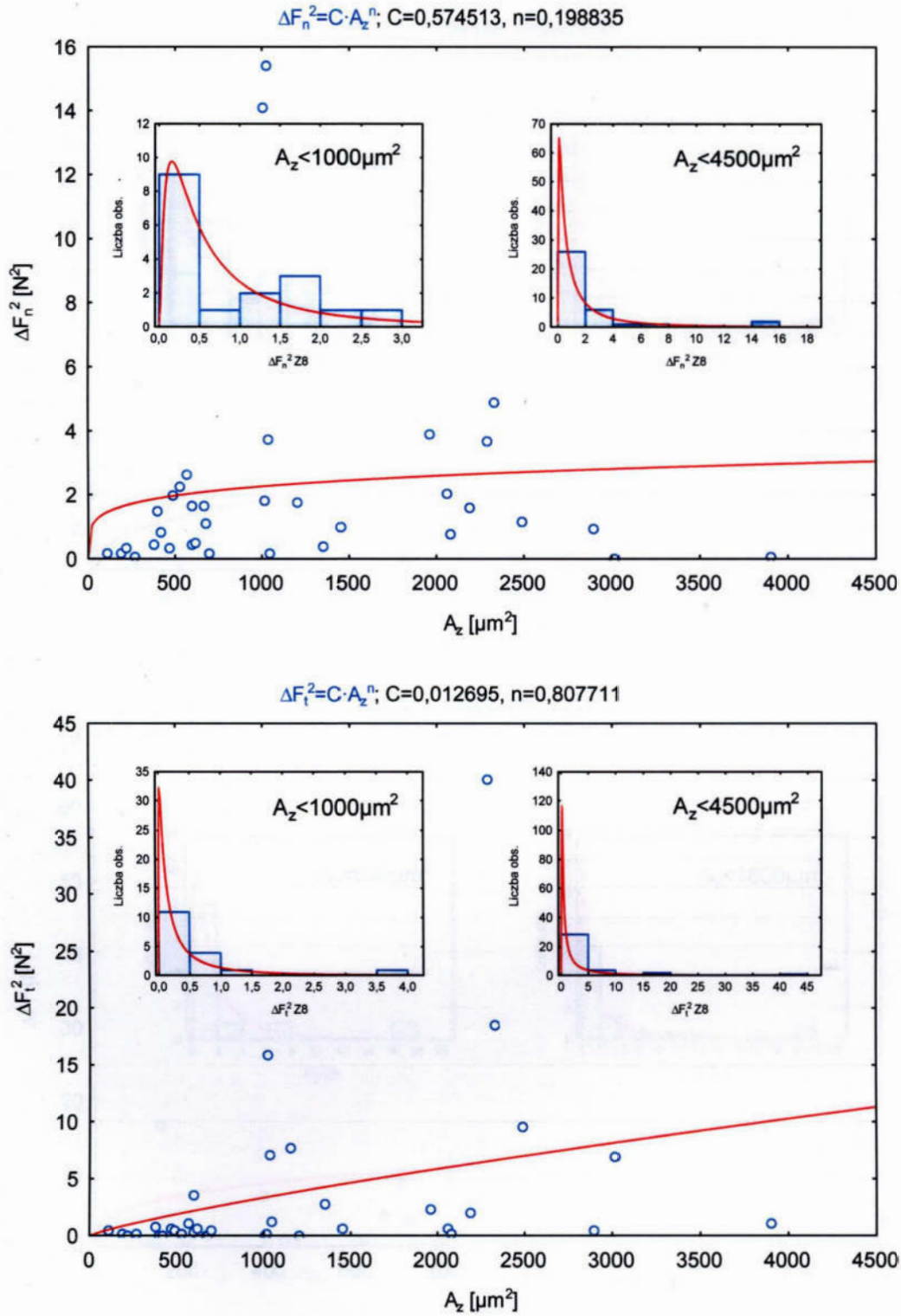
Rys. 6.73. Histogramy zależności $\Delta F_n = |F_n - C_n \cdot A_z^{n_n}|$ i $\Delta F_t = |F_t - C_t \cdot A_z^{n_t}|$ dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ostrzem ziarna Z1



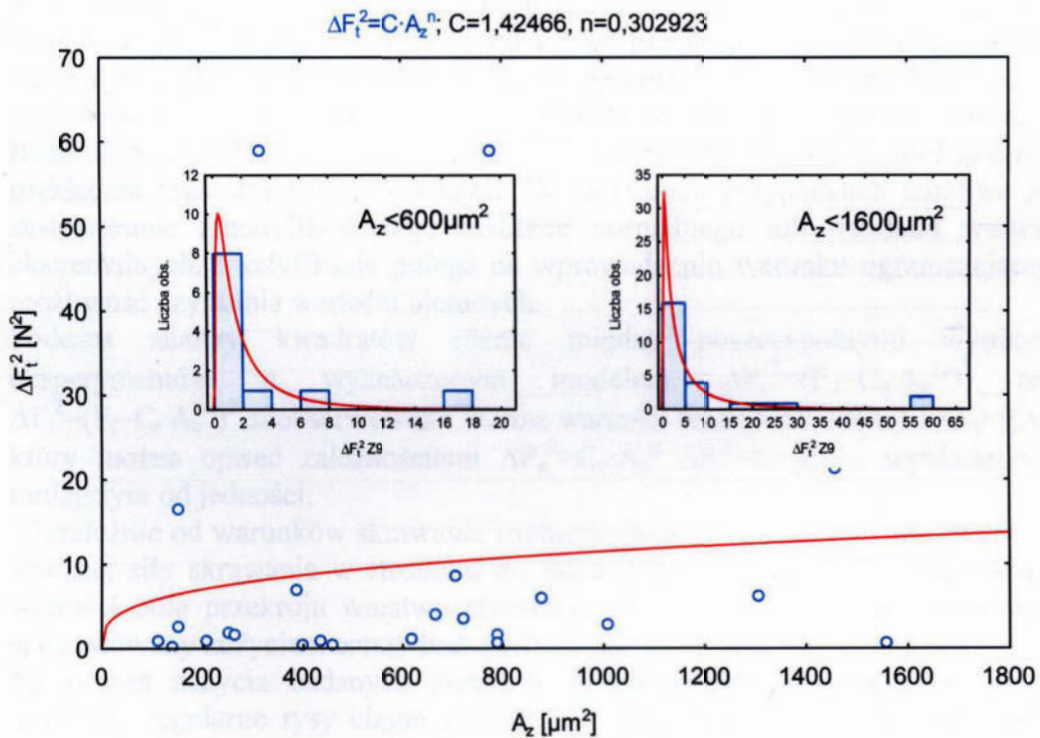
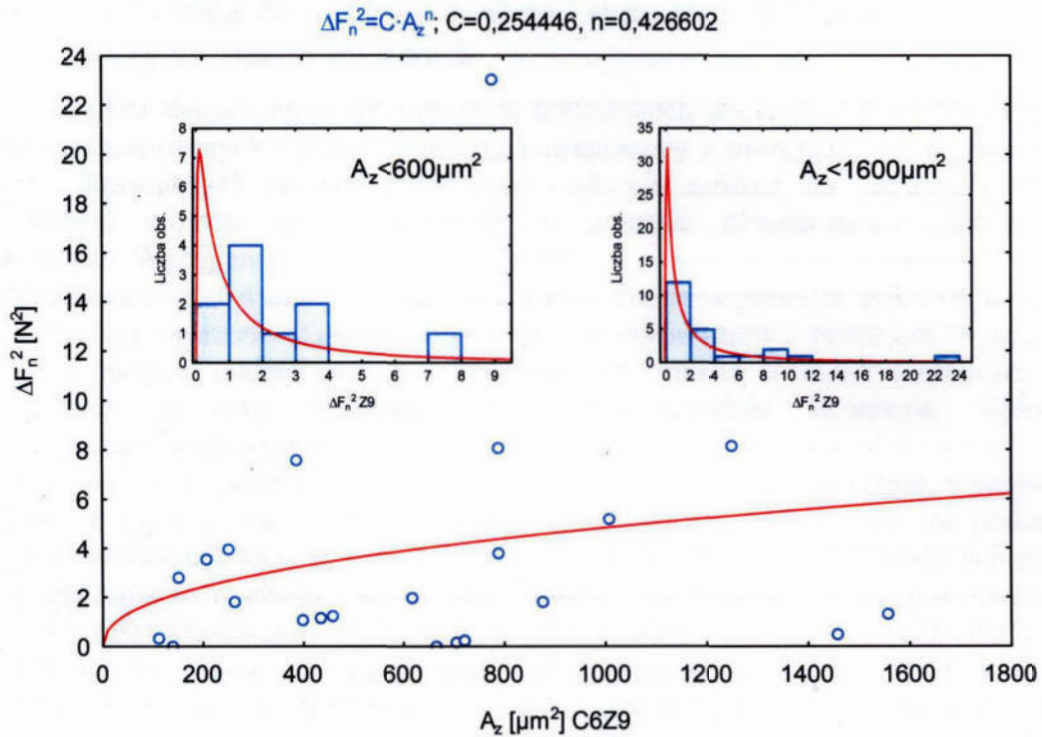
Rys. 6.74. Histogramy zależności $\Delta F_n = |F_n - C_n \cdot A_z^{n_n}|$ i $\Delta F_t = |F_t - C_t \cdot A_z^{n_t}|$ dla próbki ze stali 45, o twardości 76 HRA (oznaczonej C4), skrawanej ostrzem ziarna Z2

Różnica zmierzonego obciążenia ziarna i wartości $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t = C_t \cdot A_z^{n_t}$ dla parametrów procesu mikroskrawania, w których uzyskano regularne rysy ciągłe (rys. 6.73 i 6.74) charakteryzuje się mniejszą wartością parametru kształtu rozkładu logarytmiczno – normalnego w porównaniu z procesem mikroskrawania, w którym uzyskano oddzielne ślady skrawania ziarna.

Wprowadzenie założeń do budowy modelu obciążenia ziaren wymagało analizy charakteru zmian odchylenia obciążenia od wartości średniej. Wykonano dopasowanie wariancji różnicy zmierzonych składowych F_n i F_t siły skrawania i wartości modeli $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t = C_t \cdot A_z^{n_t}$ w funkcji pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej, czyli $\Delta F_n^2 = (F_n - C_n \cdot A_z^{n_n})^2$ i $\Delta F_t^2 = (F_t - C_t \cdot A_z^{n_t})^2$. Zaobserwowano wzrost wariancji składowych normalnej F_n i stycznej F_t siły skrawania zarówno dla procesu mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8 (rys. 6.75), jak i dla procesu mikroskrawania próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6) dla ziarna Z9 (rys. 6.76).



Rys. 6.75. Wykres zależności $\Delta F_n^2 = (F_n - C_n \cdot A_z^{n_n})^2$ i $\Delta F_t^2 = (F_t - C_t \cdot A_z^{n_t})^2$ dla próbki ze stali 45, o twardości 65 HRA (oznaczonej C5), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z8



Rys. 6.76. Wykres zależności $\Delta F_n^2 = (F_n - C_n \cdot A_z^{n_n})^2$ i $\Delta F_t^2 = (F_t - C_t \cdot A_z^{n_t})^2$ dla próbki ze stali 45, o twardości 72 HRA (oznaczonej C6), skrawanej ostrzem ziarna o oznaczeniu Z9

6.6. Założenia do budowy modelu i symulacji dotyczące zużycia ziaren ściernych

Analiza danych eksperymentalnych dotyczących obciążenia ziaren ściernych oraz zarejestrowanych obrazów strefy mikroskrawania z uwzględnieniem geometrii ostrzy skrawających pozwoliła na wyprowadzenie założeń do budowy modelu i symulacji zużycia ziaren ściernych w procesie obwodowego szlifowania płaszczyzn. Wyciągnięto następujące wnioski:

1. Zaobserwowano większy poziom obciążenia ziaren w procesie mikroskrawania, w którym tworzone regularne rysy ciągłe w porównaniu z procesem tworzenia pojedynczych, oddzielnych rys, spowodowany zmianą stosunku szerokości do grubości warstwy skrawanej b_z/a_z , co utrudnia tworzenie wiórów i przemieszczanie materiału.
2. Dla warunków skrawania, w których uzyskano regularne rysy ciągłe, wypływki boczne mają postać wiórów z wyraźną nieciągłością. Obliczono, że podczas procesu mikroskrawania z prędkością $v_s=26,8\text{m/s}$, okresowe narastanie naprężeń i odkształceń podczas tworzenia wióra, zachodziło z częstotliwością $0,93\div 2,02\text{MHz}$ dla stali 45 (72 HRA) i $1,76\div 4,03\text{MHz}$ dla stali NC6 (26 HRC).
3. Obciążenie ziarna można opisać zależnościami $F_n=C_n\cdot A_z^{n_n}$ i $F_t=C_t\cdot A_z^{n_t}$. Stwierdzono, że możliwe jest, w szerokim zakresie warunków skrawania dla określonej grupy materiałów, wyznaczenie ustalonych wartości wykładników potęgowych n_n i n_t , co pozwala następnie na uzależnienie stałych C_n i C_t od warunków procesu skrawania, kształtu i pola przekroju oraz grubości warstwy skrawanej, a także parametrów opisujących geometrię ostrza ziarna. Stałe C_n i C_t mają wówczas interpretację fizyczną odpowiadającą oporom skrawania ziarna.
4. Rozrzuty wartości składowych normalnej i stycznej siły skrawania można opisać rozkładem logarymiczno normalnym. W niektórych przypadkach możliwe jest zastosowanie zmodyfikowanego rozkładu normalnego lub rozkładu wartości ekstremalnych. Modyfikacje polega na wprowadzeniu warunku ograniczającego możliwość uzyskania wartości ujemnych.
5. Podczas analizy kwadratów różnic między poszczególnymi wynikami eksperymentów, a wyznaczonym modelem, $\Delta F_n^2=(F_n-C_n\cdot A_z^{n_n})^2$ oraz $\Delta F_t^2=(F_t-C_t\cdot A_z^{n_t})^2$ zaobserwowano wzrost wartości funkcji $\Delta F_n=f(A_z)$ i $\Delta F_t=f(A_z)$, który można opisać zależnościami $\Delta F_n^2=C_n\cdot A_z^{n_n}$ $\Delta F_t^2=C_t\cdot A_z^{n_t}$ o wykładniku n mniejszym od jedności.
6. Niezależnie od warunków skrawania zaobserwowano większy przyrost składowej stycznej siły skrawania w stosunku do składowej normalnej F_t/F_n dla rosnącej wartości pola przekroju warstwy skrawanej A_z , czyli wzrost mocy skrawania, spowodowany zużyciem ostrzy badanych ziaren.
7. Na proces zużycia badanych ziaren w procesie mikroskrawania, w którym uzyskano regularne rysy ciągłe składały się mikrowykruszenia na powierzchni ziarna oraz ścieranie wierzchołka ostrza, natomiast w procesie, w którym uzyskiwano pojedyncze skrawanie wierzchołka ziarna obserwowano przewagę zużycia w postaci mikrowykruszeń wierzchołka ostrza skrawającego ziarna.
8. Procesy zużycia ziaren polegające na mikrowykruszeniach i ścieraniu wierzchołka ostrza powodują zwiększenie stosunku szerokości do grubości warstwy skrawanej b_z/a_z .
9. Procesy mikrowykruszeń powodują często, dla małych głębokości skrawania, że ziarno usuwa więcej niż jedną warstwę, tworząc kilka równoległych rys.

ROZDZIAŁ 7

BADANIA SYMULACYJNE PROCESU ZUŻYCIA ŚCIERNICY

7.1. Wprowadzenie

Analiza procesu zużycia narzędzi ściernych oraz eksperymentalna weryfikacja modeli obciążenia ziaren ściernych pozwoliły na wyprowadzenie wniosków dotyczących procedur symulacji procesu zużycia ściernicy. W symulacji zastosowano probabilistyczny model obciążenia ziaren ściernych oraz modele ściernego i kształtowego zużycia narzędzi. W modelowaniu procesu zużycia uwzględniono zdarzenia polegające na przekroczeniu przez obciążenie mechaniczne granicy wytrzymałości doraźnej, prowadzące do wykruszenia ziarna, kumulację obciążenia oraz granicę odporności na sumę obciążeń.

Do symulacji obciążenia oraz modelowania poziomów wytrzymałości doraźnej i odporności na obciążenie sumaryczne ziaren zastosowano funkcje losowe o zadanym rozkładzie oraz zmiennych parametrach. Zapis informacji dotyczących obciążenia i wytrzymałości, czasu pracy i położenia ziaren na powierzchni czynnej narzędzia pozwala na szczegółową analizę procesu zużycia ściernicy na podstawie:

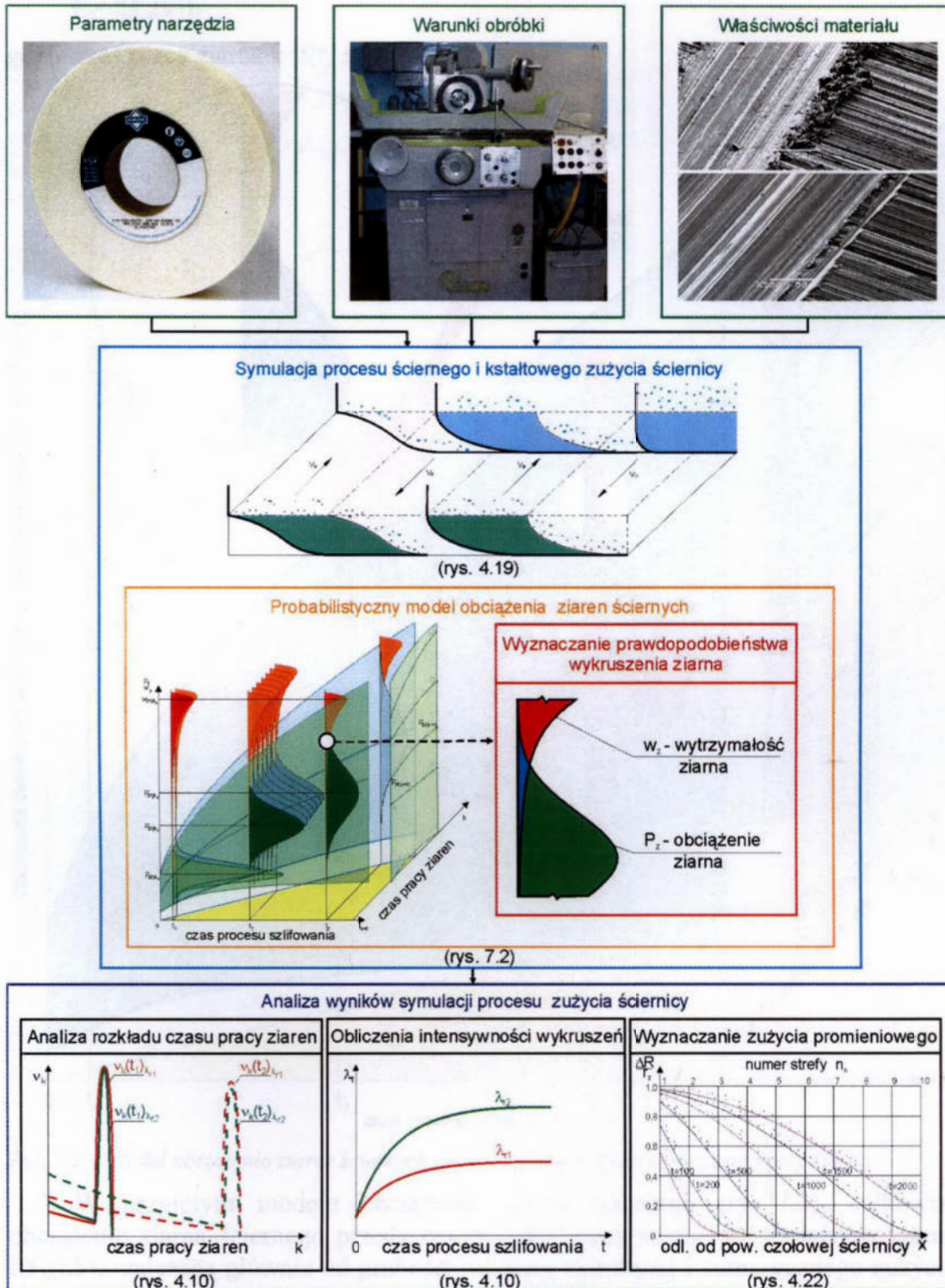
- wyznaczonych rozkładów pracy ziaren,
- liczebności ziaren w grupach o ustalonym czasie pracy,
- liczebności wykruszeń w grupach o ustalonym czasie pracy,
- zmian funkcji intensywności wykruszeń,
- intensywności zużycia, spowodowanego przekroczeniem wytrzymałości doraźnej,
- intensywności zużycia, spowodowanego kumulacją obciążeń ziaren,
- wyznaczonego zużycia kształtowego wzdłuż tworzącej ściernicy,
- wyznaczonych zmian starcia ziaren ściernych z wpływem czasu obróbki,
- stanu powierzchni czynnej ściernicy.

Opracowana metoda symulacyjna zużycia ściernicy uwzględnia zależności geometryczne i kinematyczne w procesie obwodowego szlifowania płaszczyzn. Przyjęto następujące założenia dotyczące modelu symulacyjnego:

- oś ściernicy przemieszcza się równoległe do płaszczyzny przedmiotu,
- prędkość szlifowania v_s i prędkość posuwu v_p są niezmiennie w danej operacji,
- posuw poprzeczny p_p następuje po wyjściu ściernicy ze strefy szlifowania,
- drgania promieniowe ściernicy względem przedmiotu szlifowania są pomijalnie małe w porównaniu z grubościami warstw skrawanych a_z ,
- odkształcenia sprężyste przedmiotu w strefie szlifowania są pomijalnie małe w stosunku do grubości warstw skrawanych a_z ,
- wartość średnia obciążenia ziarna wyznaczana jest z uwzględnieniem zależności pola przekroju od grubości warstwy skrawanej $A_z=f(a_z)$,
- obciążenie ziarna zależy od postępującego w czasie zużycia ściernego ziaren,
- wartość średnia wytrzymałości doraźnej i odporności na obciążenie skumulowane ziarna są zależne od czasu pracy ziaren.

Zużycie promieniowe wyznaczane jest w strefach zużycia, których ilość zależy od stosunku wysokości ściernicy do posuwu poprzecznego $h=H/p_p$. Do wyznaczenia wartości zużycia promieniowego zastosowano znormalizowany współczynnik, odnoszący się do średniej wartości wymiaru charakterystycznego ziaren $\Delta R/r_z$

Ogólny schematy nowej metody symulacji procesu zużycia ziaren i ściernicy przedstawiono na rysunku 7.1.



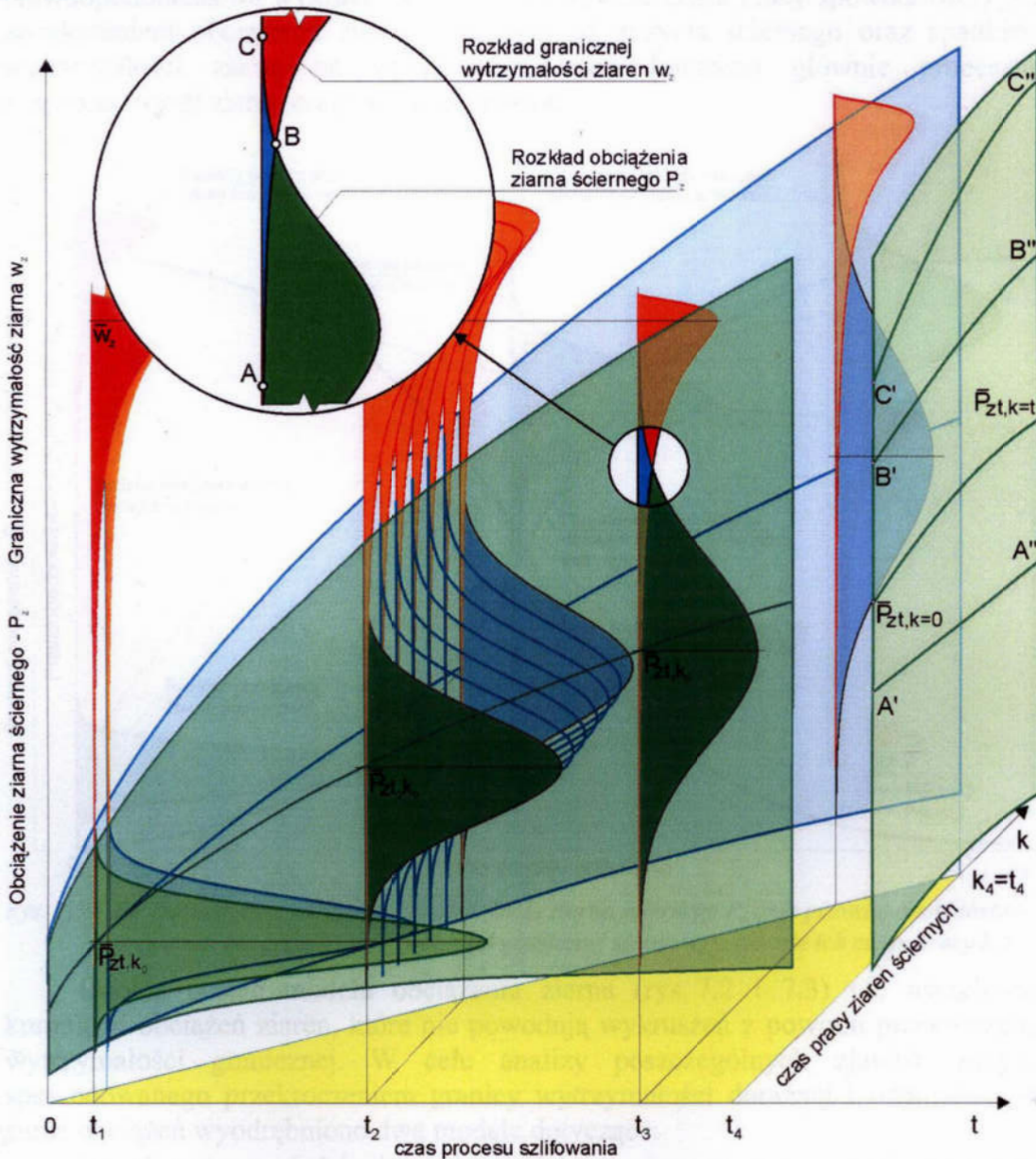
Rys. 7.1. Ogólny schematy nowej metody symulacji procesu zużycia ziaren i ściernicy

7.2. Symulacja obciążenia i wykruszania ziaren

Zgodnie z zależnościami wyprowadzonymi w rozdziale czwartym sumaryczne zużycie ściernych ziaren na powierzchni czynnej ściernicy zależne jest głównie od ich czasu pracy. Siły skrawania poszczególnymi ziarnami zależą od ich zużycia ściernego, co można zapisać następująco:

$$P_z = f(F_s(k)), \tag{7.1}$$

gdzie czas pracy ziarna $k = f(t) \leq t$.



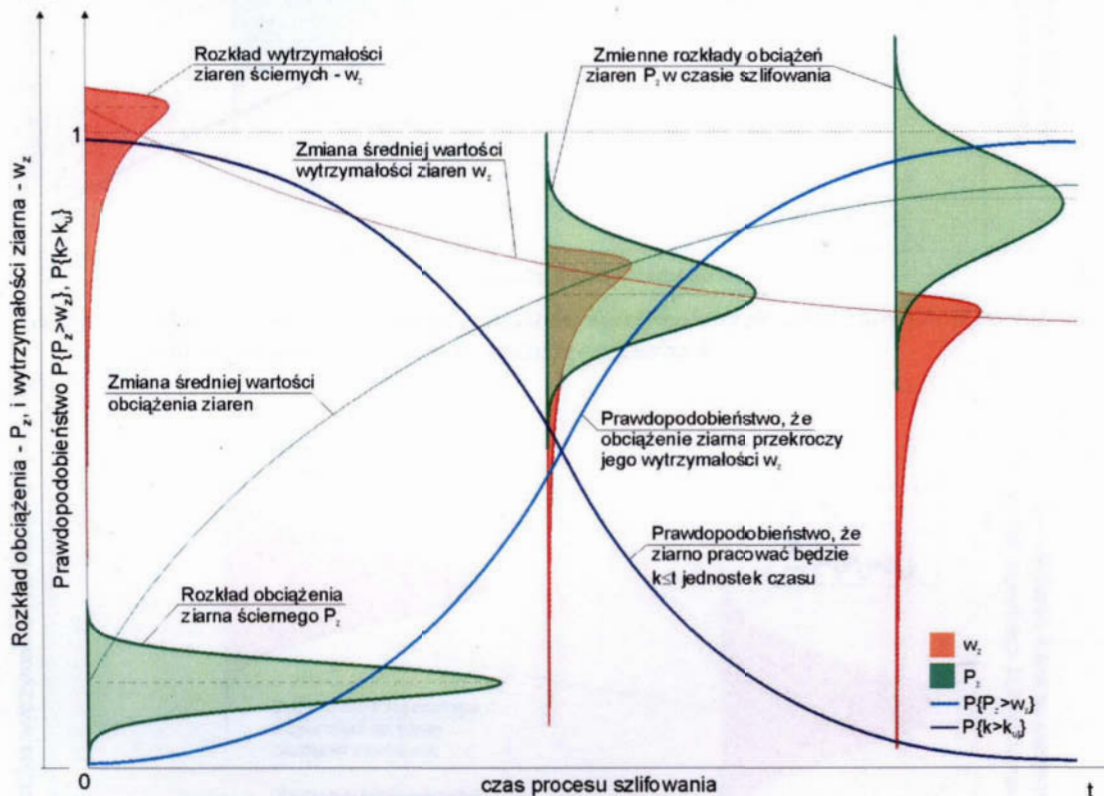
Rys. 7.2. Model obciążenia ziaren ściernych i doraźnej wytrzymałości w czasie pracy ziaren

W przyjętym modelu obciążenia ziarna ściernego (rys. 7.2), całkowite obciążenie ziarna ściernego przedstawiono jako sumę średniego obciążenia ziarna $f(F_s(t,k))$, zależącą głównie od grubości warstwy skrawanej i sumarycznego zużycia powierzchni czynnej ściernicy oraz składnika losowego $X(t,k)$, zmiennego w czasie procesu szlifowania t i zależnego od czasu pracy ziarna k ,

$$P_z = f(F_s(t,k)) + X(t,k). \tag{7.2}$$

Rysunek 7.2 ilustruje problem zmienności obciążenia ziarna ściernego w funkcji jego czasu pracy dla zależności (7.2). Zależność $f(F_s(t,k))$ określa średnie obciążenie ziarna, natomiast parametry rozkładu składowej losowej $X(t,k)$ zależą od zużycia powierzchni czynnej ściernicy i czasu pracy ziaren.

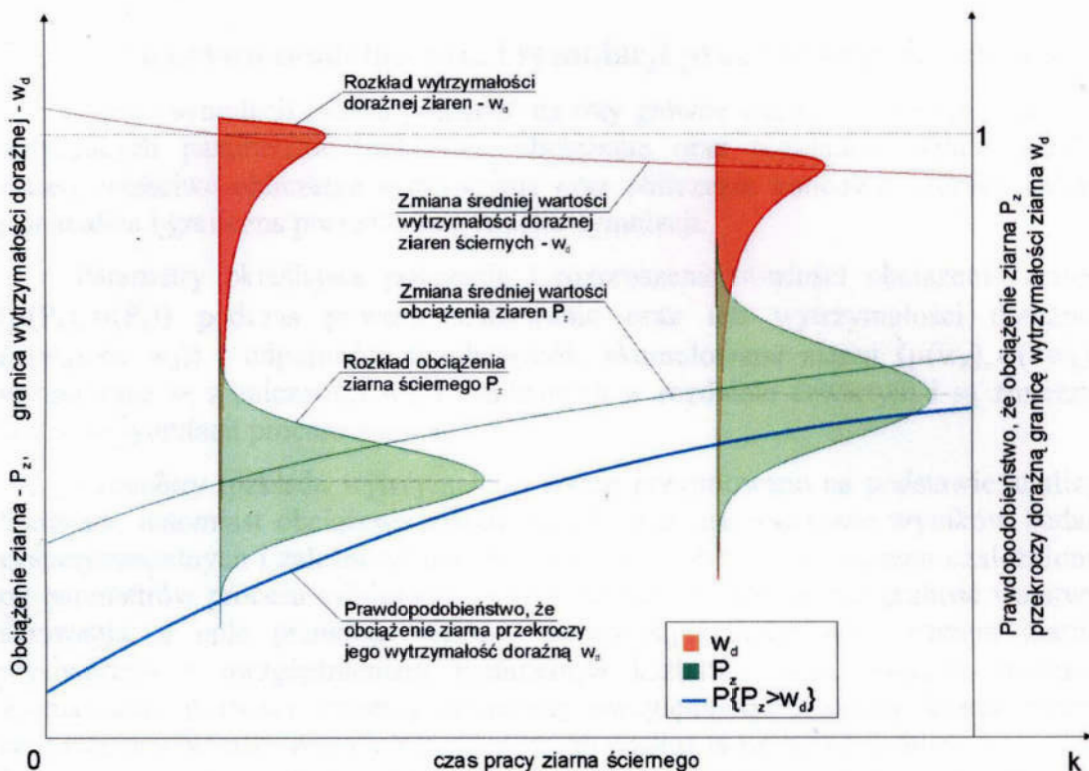
Prawdopodobieństwo, że obciążenie ziarna ściernego P_z przekroczy wytrzymałość ziarna w_z , dla różnych czasów pracy ziaren $k \leq t$ oraz prawdopodobieństwo, że czas pracy ziarna k przekroczy zadany okres czasu pracy k_u w czasie szlifowania t , przedstawione zostało na rysunku 7.3. Wzrost prawdopodobieństwa wykruszenia ziarna z upływem czasu pracy spowodowany jest zwiększeniem obciążenia ziaren, zależnym od zużycia ściernego oraz spadkiem wytrzymałości ziarna na wykruszenie, spowodowanym głównie procesami zmęczeniowymi ziaren oraz mostków spoiwa.



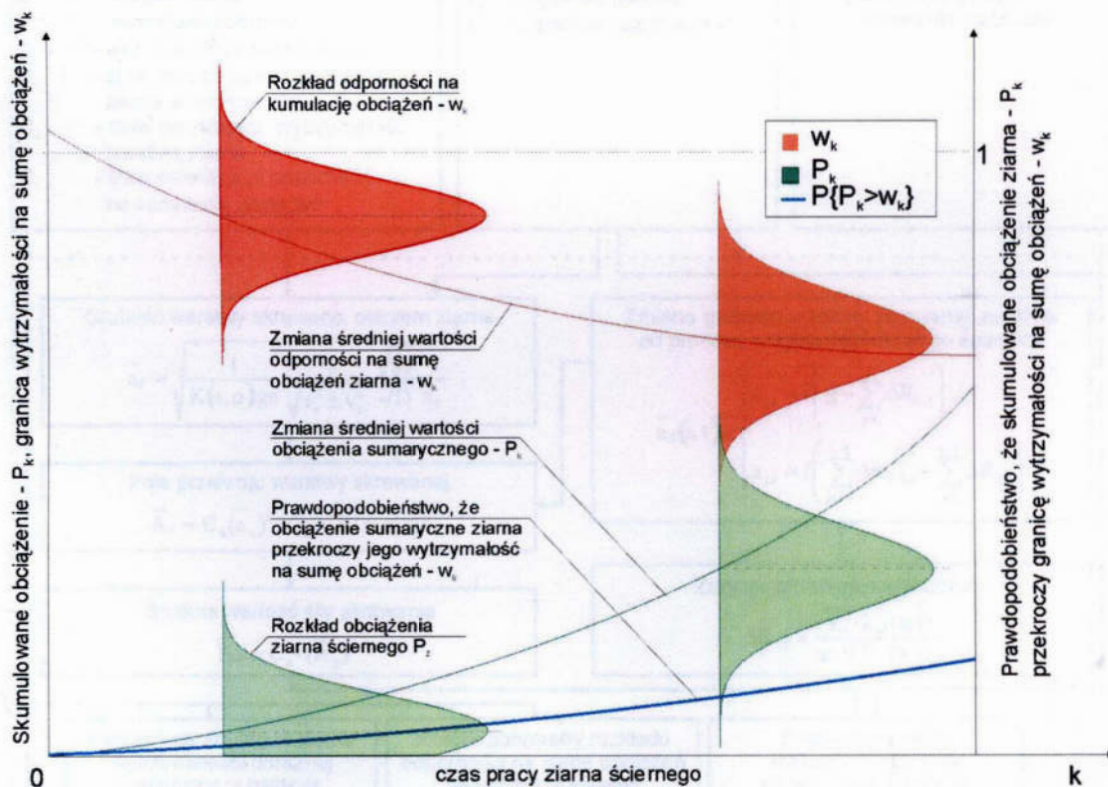
Rys. 7.3. Probabilistyczne cechy modelu obciążenia ziarna ściernego P_z oraz prawdopodobieństwo przekroczenia przez P_z wytrzymałości granicznej ziaren w_z w okresie ich czasu pracy $k \leq t$

Ogólna postać modelu obciążenia ziarna (rys. 7.2 i 7.3) nie uwzględnia kumulacji obciążeń ziaren, które nie powodują wykruszeń z powodu przekroczenia wytrzymałości granicznej. W celu analizy poszczególnych zjawisk zużycia spowodowanego przekroczeniem granicy wytrzymałości doraźnej i odporności na sumę obciążeń wyodrębniono dwa modele dotyczące:

- zmiennej wytrzymałości ziaren i mostków spoiwa w czasie szlifowania oraz obciążeń chwilowych P_z powodujących wykruszenia, których główną przyczyną jest przekroczenie granicy wytrzymałości doraźnej ziaren w_d (rys. 7.4),
- kumulowania sił działających na ziarna P_k , które nie powodują przekroczenia granicy wytrzymałości doraźnej oraz zmian w czasie pracy ziaren granicznej odporności na sumę obciążeń w_k (rys. 7.5).



Rys. 7.4. Schemat do analizy zmiennej charakteru wytrzymałości doraźnej ziaren oraz obciążenia chwilowego ziarna, zależnego od czasu pracy ziarna k



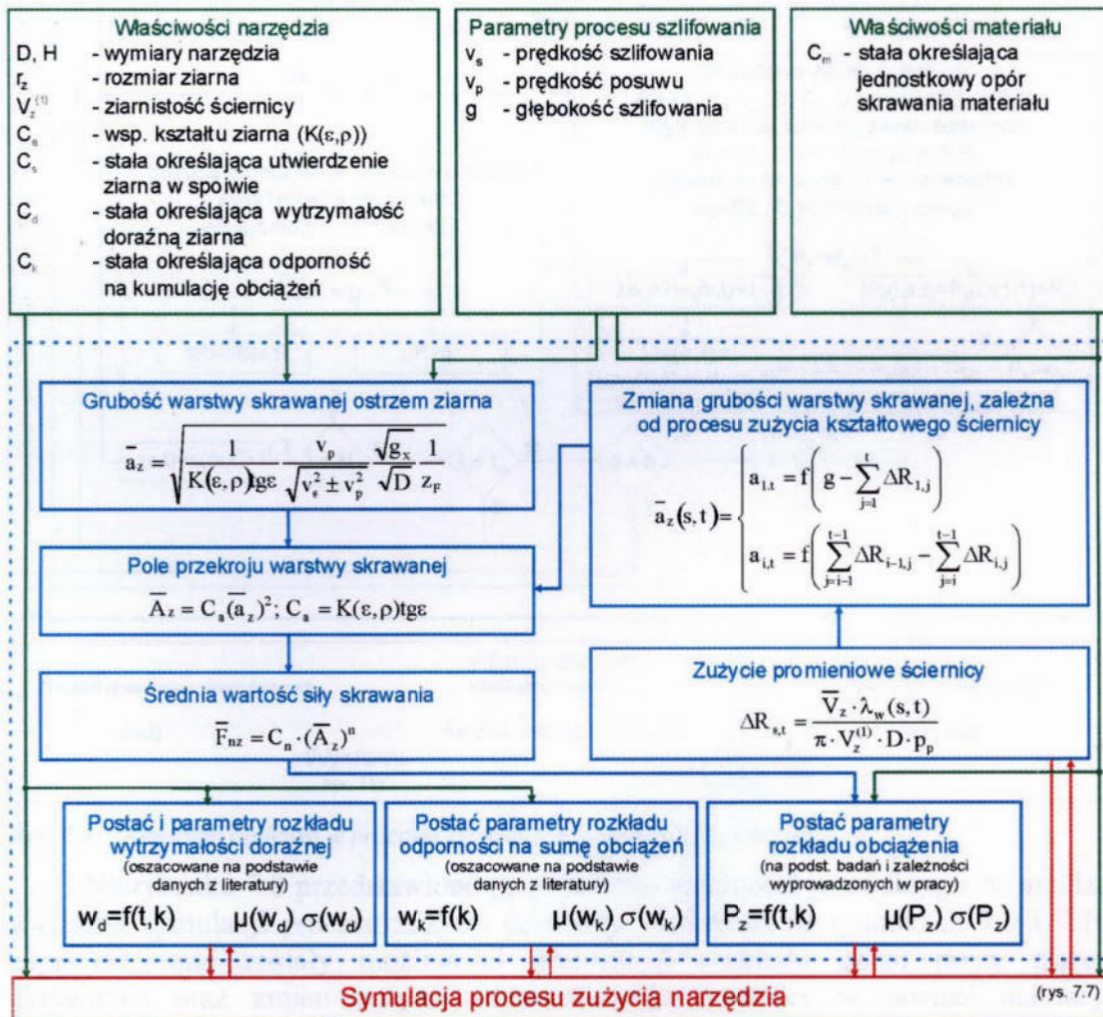
Rys. 7.5. Schemat do analizy kumulacji obciążeń działających na ziarna i odporności na sumę obciążeń ziarna w czasie jego pracy k

7.3. Algorytm modelowania i symulacji procesu zużycia ściernicy

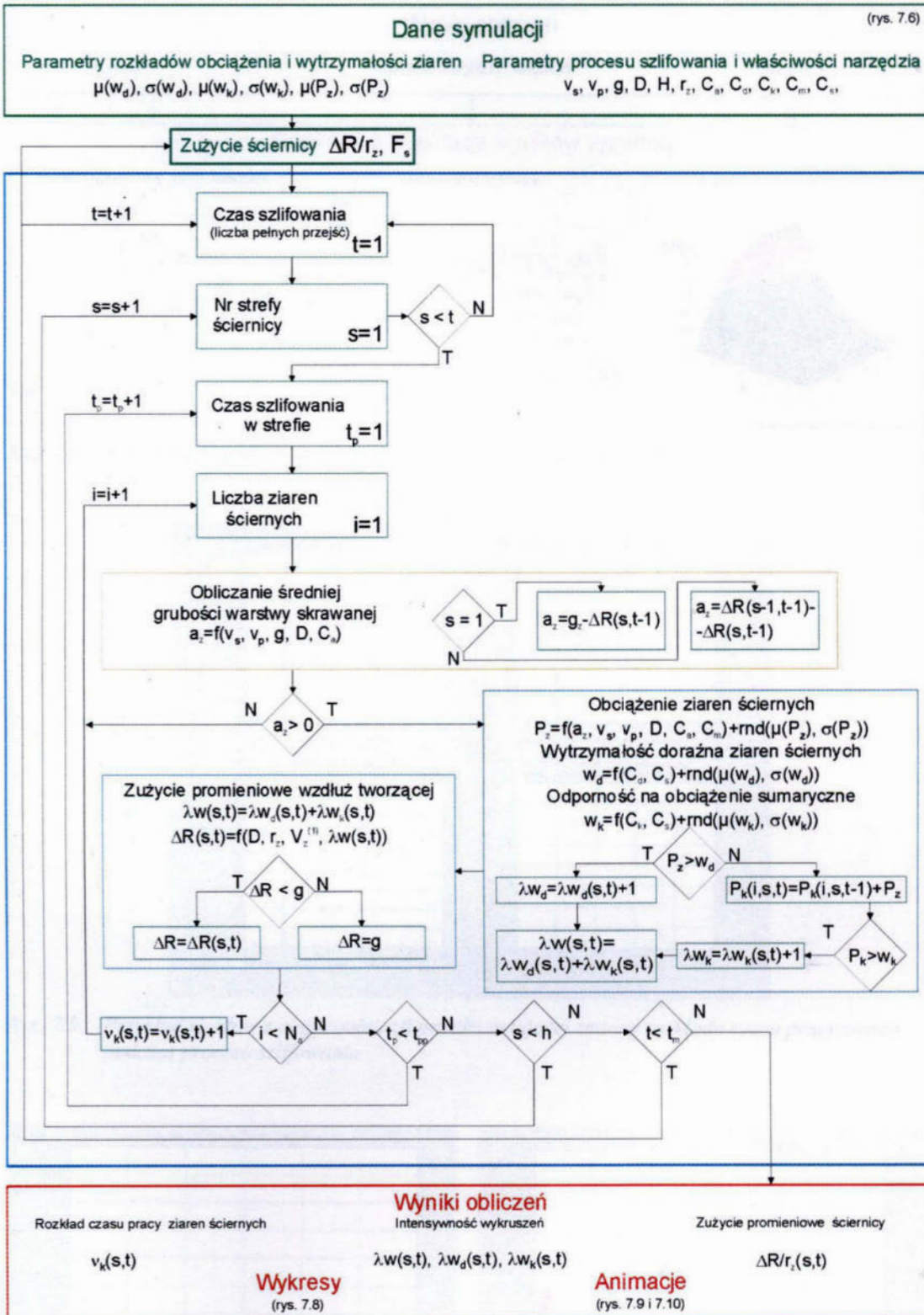
Proces symulacji można podzielić na trzy główne etapy: generowanie danych dotyczących parametrów rozkładów obciążenia oraz rozkładów wytrzymałości ziaren, właściwe obliczenia symulacyjne oraz obliczenia końcowe, których celem jest analiza i graficzna prezentacja wyników symulacji.

Parametry określające położenie i rozproszenie wartości obciążenia ziaren ($\mu(P_z), \sigma(P_z)$) podczas procesu szlifowania oraz ich wytrzymałości dorażnej ($\mu(w_d), \sigma(w_d)$) i odporności na obciążenie skumulowane ziaren ($\mu(w_k), \sigma(w_k)$) wyznaczane są z zależności wyprowadzonych w rozdziale czwartym i są zmienne w czasie symulacji procesu zużycia.

Parametry rozkładu wytrzymałości ziaren przyjmowano na podstawie analizy literatury, natomiast obciążenie ziaren modelowano na podstawie wyników badań eksperymentalnych i zależności opisanych w pracy. Poziom obciążenia uzależniono od parametrów procesu szlifowania, wpływających zasadniczo na grubość warstwy skrawania, a pole przekroju warstwy skrawanej pojedynczym ostrzem ziarna wyznaczano z uwzględnieniem parametrów kształtu ziarna. Ponadto podczas wyznaczania grubości warstwy skrawanej uwzględniono zmienny kształt strefy szlifowania w wyniku zużycia promieniowego wzdłuż tworzącej ściernicy.

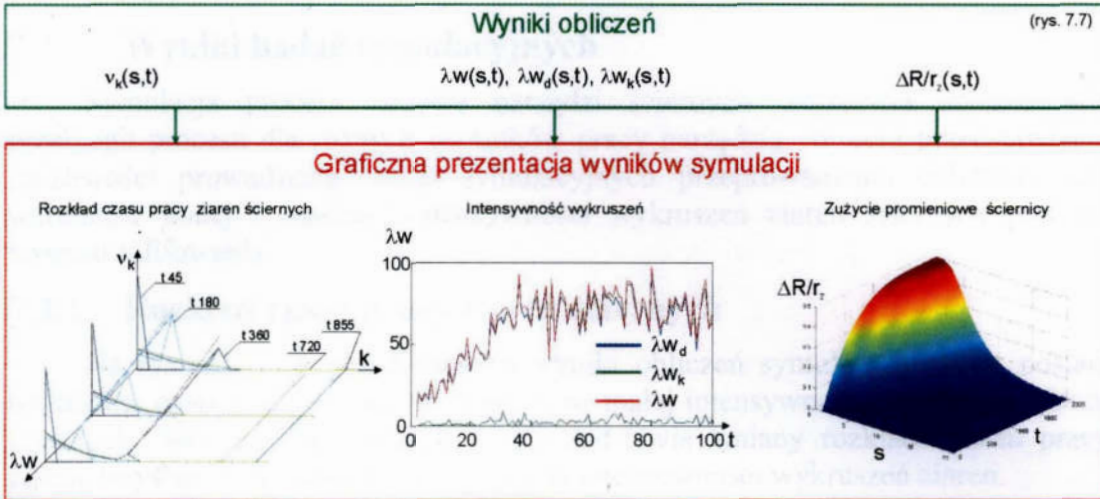


Rys. 7.6. Schemat zależności obliczeń przygotowawczych do generowania danych dotyczących obciążenia i wytrzymałości ziaren ściernicy dla symulacji zużycia ściernicy

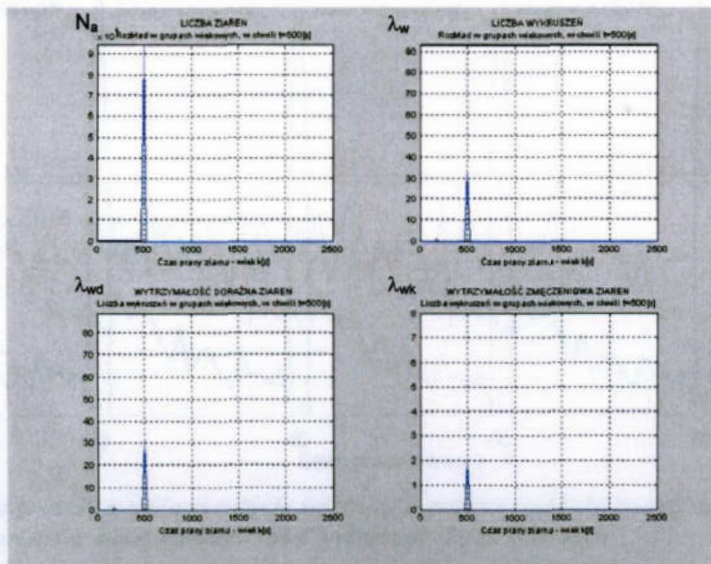


Rys. 7.7. Algorytm obliczeń w procesie symulacji procesu zużycia ściernicy

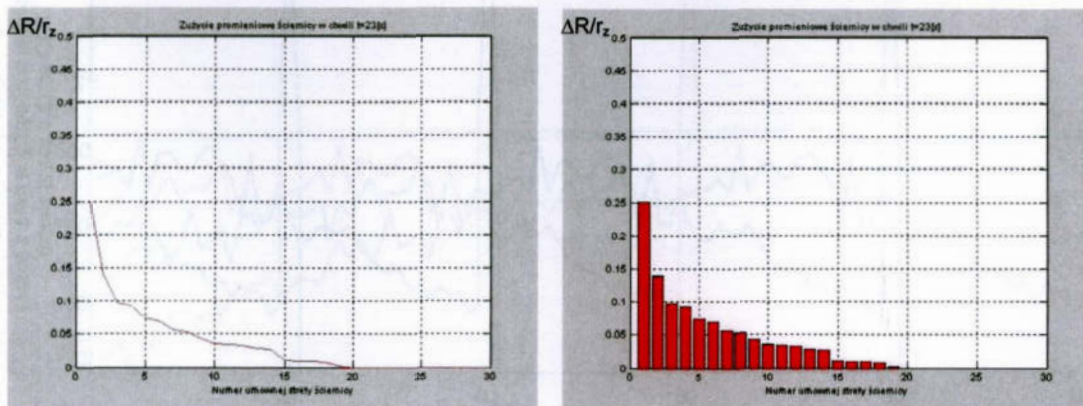
Na rysunku 7.8 przedstawiono przykładowe zależności pozwalające na analizę wyników symulacji procesu zużycia ściernicy. Natomiast na rysunkach 7.9 i 7.10 zaprezentowane zostały możliwości prezentacji rozkładu czasu pracy ziaren aktywnych oraz zmian zużycia promieniowego ściernicy w postaci animacji przedstawiających zmiany prezentowanych zależności w czasie.



Rys. 7.8. Schemat prezentacji wyników symulacji procesu zużycia ściernicy



Rys. 7.9. Przykład slajdów z ciągu animacji przedstawiającej zmiany rozkładu czasu pracy ziaren podczas procesu szlifowania



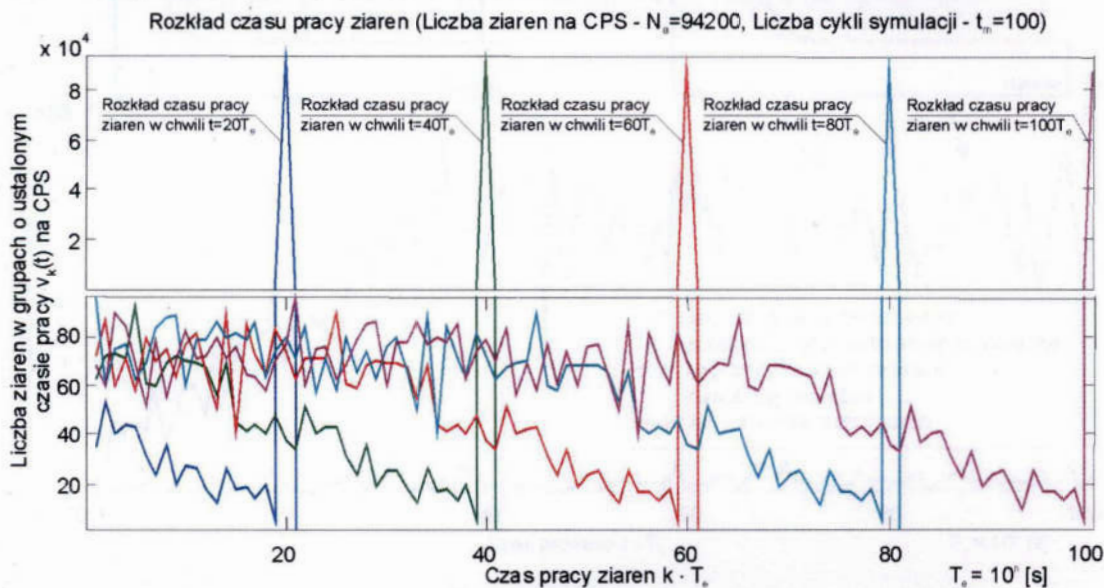
Rys. 7.10. Przykłady slajdów z ciągu animacji przedstawiającej zużycie promieniowe wzdłuż tworzącej ściernicy podczas procesu szlifowania

7.4. Wyniki badań symulacyjnych

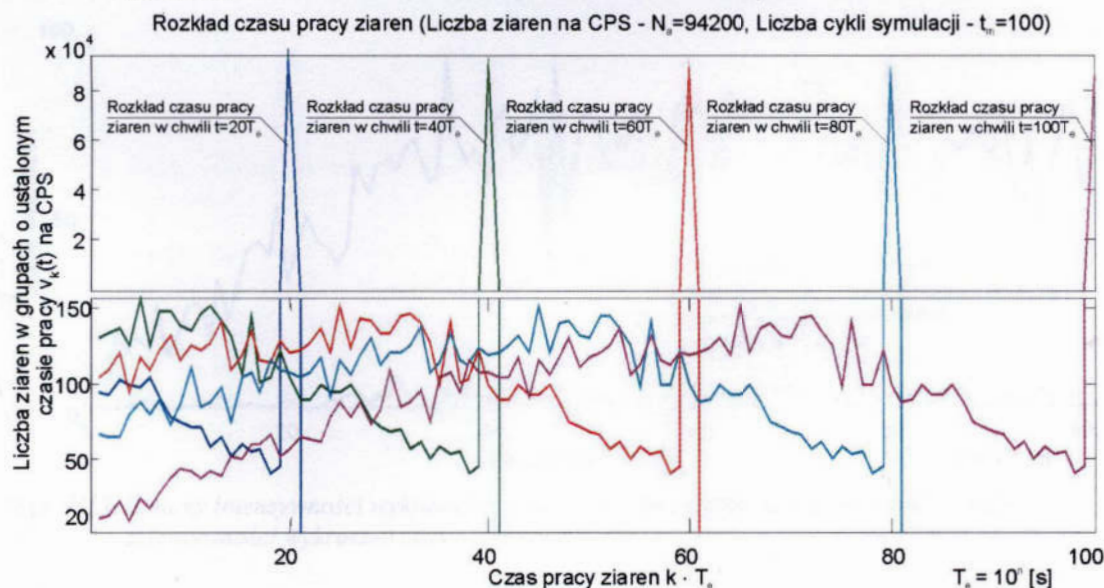
Symulacja procesu zużycia narzędzi ściernych umożliwia analizowanie przebiegu procesu dla różnych warunków pracy narzędzia. W celu przedstawienia możliwości prowadzenia badań symulacyjnych przeprowadzono obliczenia dla warunków małej i znacznej intensywności wykruszeń ziaren ściernych podczas procesu szlifowania.

7.4.1. Rozkład czasu pracy ziaren ściernych

Na rysunku 7.11 przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych, w postaci rozkładów czasu pracy ziaren dla warunków małej intensywności wykruszeń ziaren ściernych. Natomiast na rysunek 7.12 przedstawia zmiany rozkładu czasu pracy ziaren aktywnych dla warunków o większej intensywności wykruszeń ziaren.



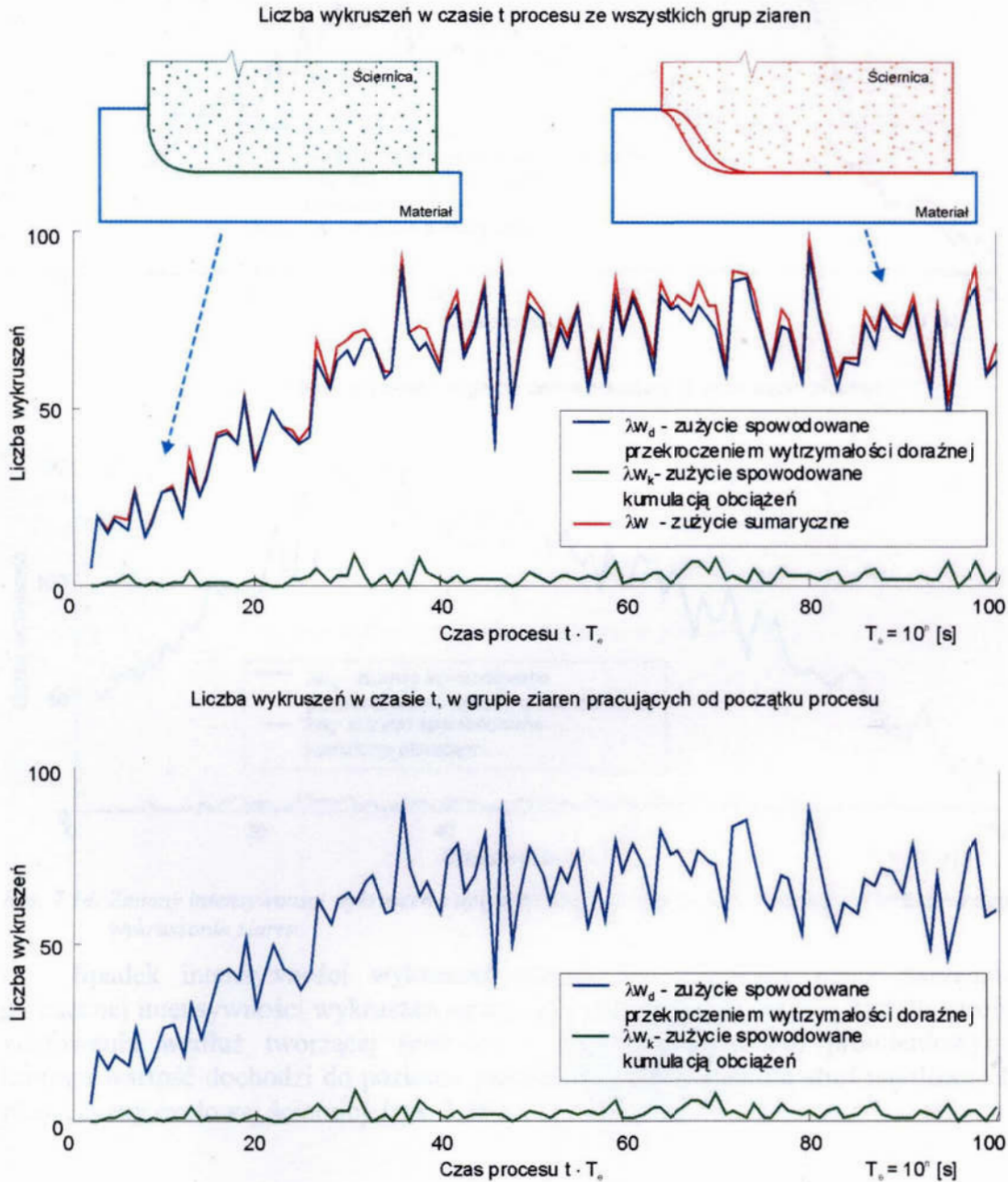
Rys. 7.11. Wyniki procesu symulacji zużycia ściernicy w postaci rozkładu czasu pracy ziaren dla warunków małej intensywności wykruszeń ziaren ściernych



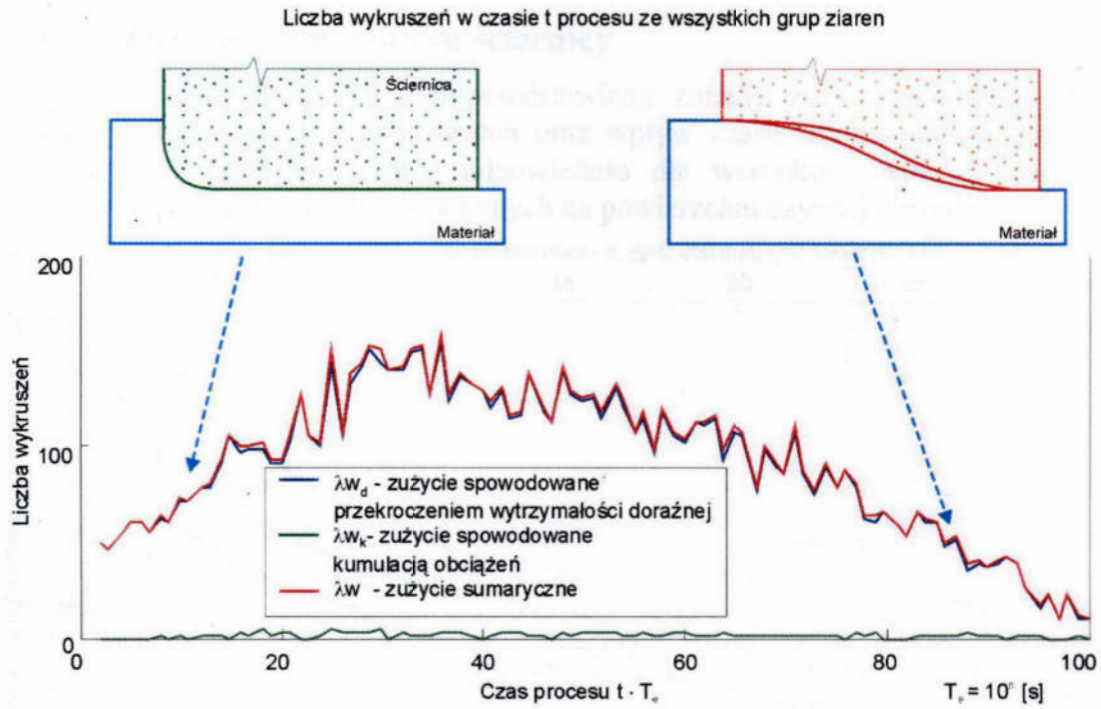
Rys. 7.12. Wyniki procesu symulacji zużycia ściernicy w postaci rozkładu czasu pracy ziaren dla warunków o większej intensywności wykruszeń ziaren ściernych

7.4.2. Intensywność wykruszeń ziaren podczas procesu szlifowania

Badania symulacyjne pozwoliły na wyprowadzenie zależności intensywności wykruszeń ziaren podczas procesu szlifowania, z rozgraniczeniem zużycia spowodowanego przekroczeniem wytrzymałości doraźnej ziaren i odporności na kumulację obciążeń. Rysunek 7.13 przedstawia zmiany intensywności wykruszeń dla warunków ograniczonego samoostrzenia ściernicy. Natomiast na rysunku 7.14 przedstawiono zmiany liczby wykruszeń podczas procesu szlifowania dla warunków o większej intensywności wykruszeń ziaren.



Rys. 7.13. Zmiany intensywności wykruszeń z upływem czasu szlifowania dla warunków małej intensywności wykruszeń ziaren ściernicy



Liczba wykruszeń w czasie t, w grupie ziaren pracujących od początku procesu

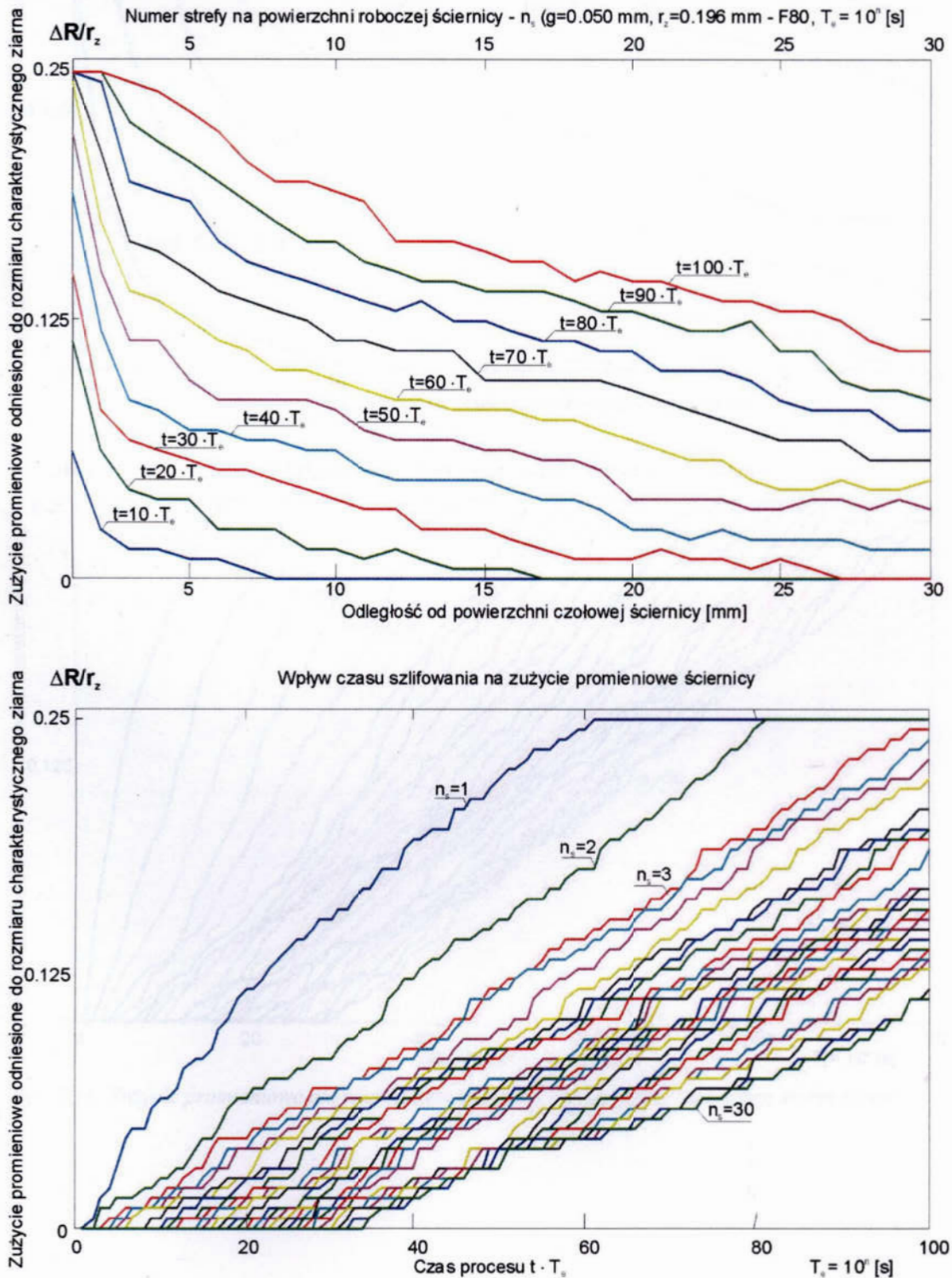


Rys. 7.14. Zmiany intensywności wykruszeń z upływem czasu szlifowania dla warunków intensywnego wykruszania ziaren

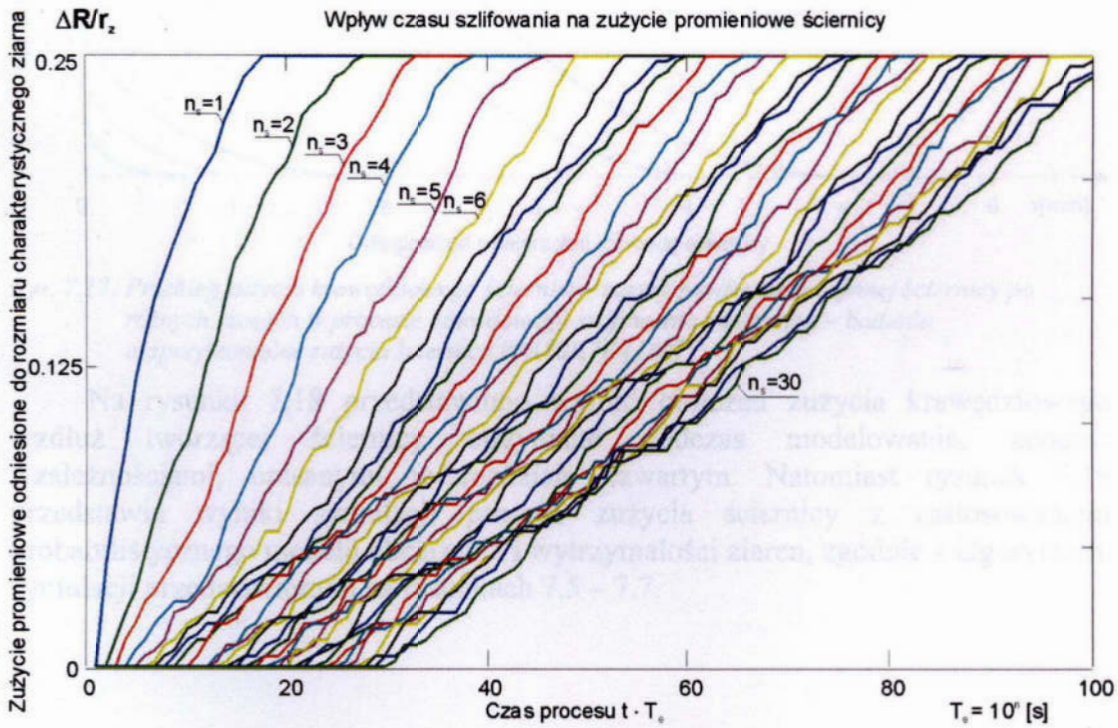
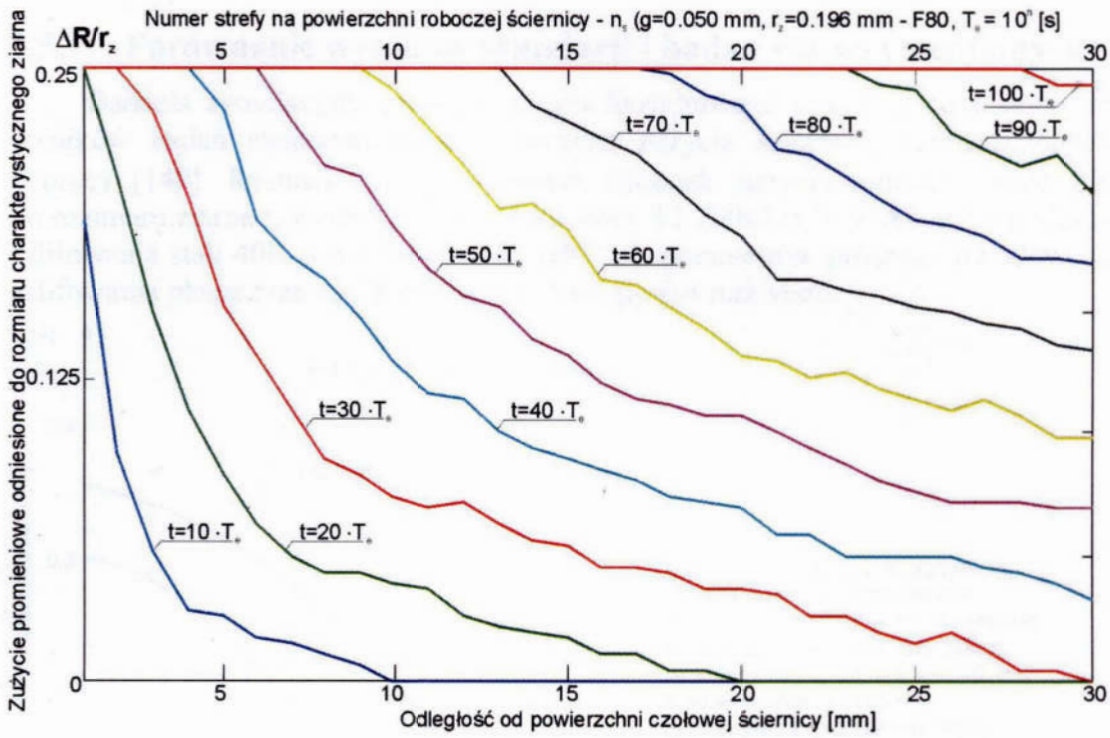
Spadek intensywności wykruszeń ziaren dla warunków pracy narzędzia o znacznej intensywności wykruszeń ziaren spowodowany jest zmianą kształtu strefy szlifowania wzdłuż tworzącej ściernicy i znacznym zużyciem promieniowym, którego wartość dochodzi do poziomu głębokości szlifowania dla stref najbliższych płaszczyzny czołowej ściernicy (rys. 7.16).

7.4.3. Zużycie promieniowe ściernicy

Na rysunkach 7.15 i 7.16 przedstawiono zmiany zużycia promieniowego ściernicy w funkcji czasu szlifowania oraz wpływ czasu szlifowania na zużycie w umownych strefach ściernicy odpowiednio dla warunków małej i znacznej intensywności wykruszeń ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia.



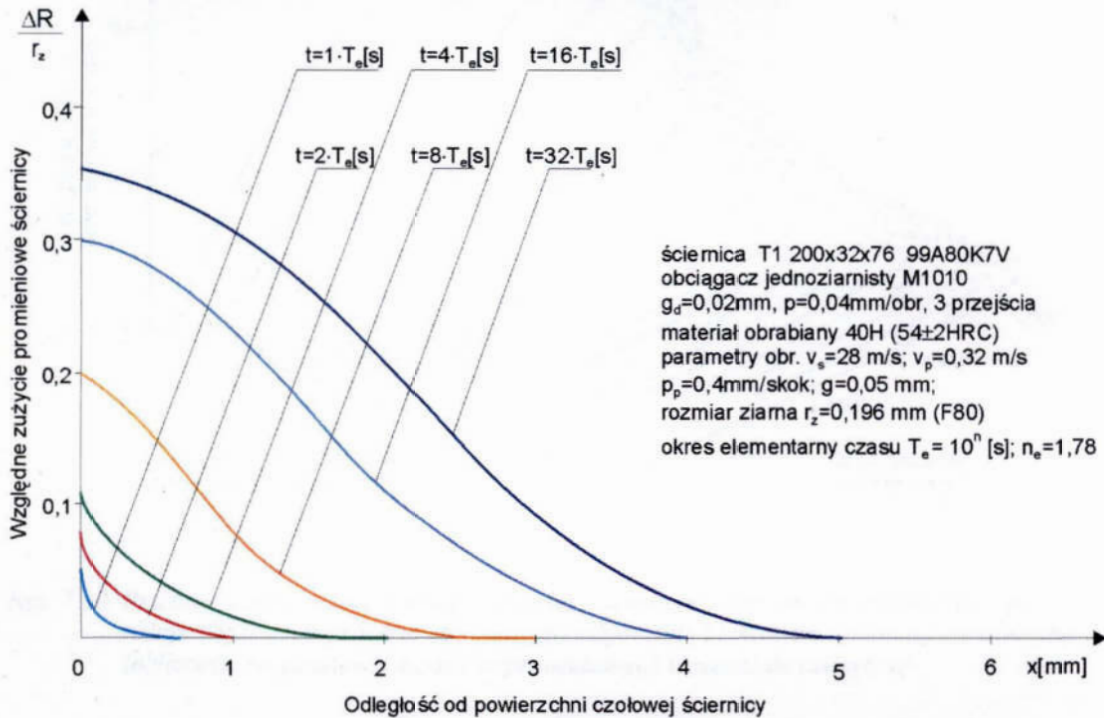
Rys. 7.15. Zużycie promieniowe dla warunków małej intensywności wykruszeń ziaren ściernych



Rys. 7.16. Zużycie promieniowe dla warunków o znacznej intensywności wykruszeń ziaren ściernych

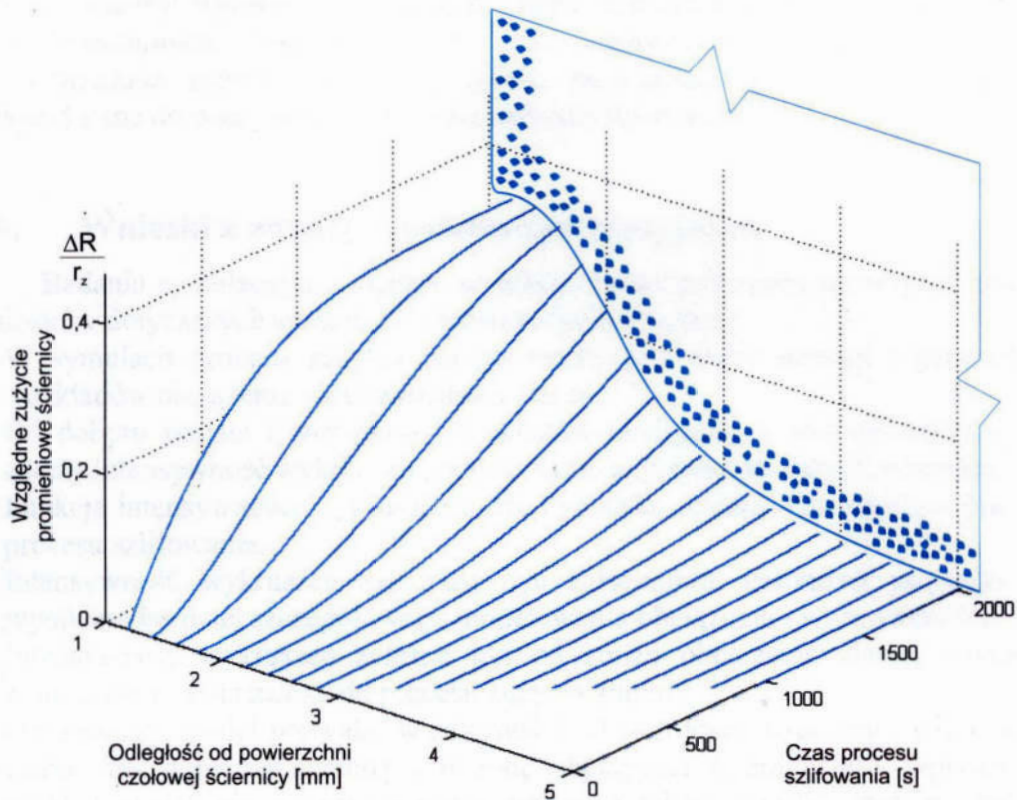
7.5. Porównanie wyników symulacji i badań eksperymentalnych

Badania symulacyjne procesu zużycia kształtowego ściernicy odniesiono do wyników badań eksperymentalnych procesu zużycia ściernicy, zamieszczonych w pracy [140]. Rysunek 7.17 przedstawia stosunek zużycia promieniowego ΔR do rozmiaru ziarna r_z wzdłuż tworzącej ściernicy T1 200x32x76 99A80K7V podczas szlifowania stali 40H o twardości 54 ± 2 HRC dla parametrów procesu obwodowego szlifowania płaszczyzn $v_s=28$ m/s, $v_p=32$ m/s, $p_p=0,4$ mm/skok.

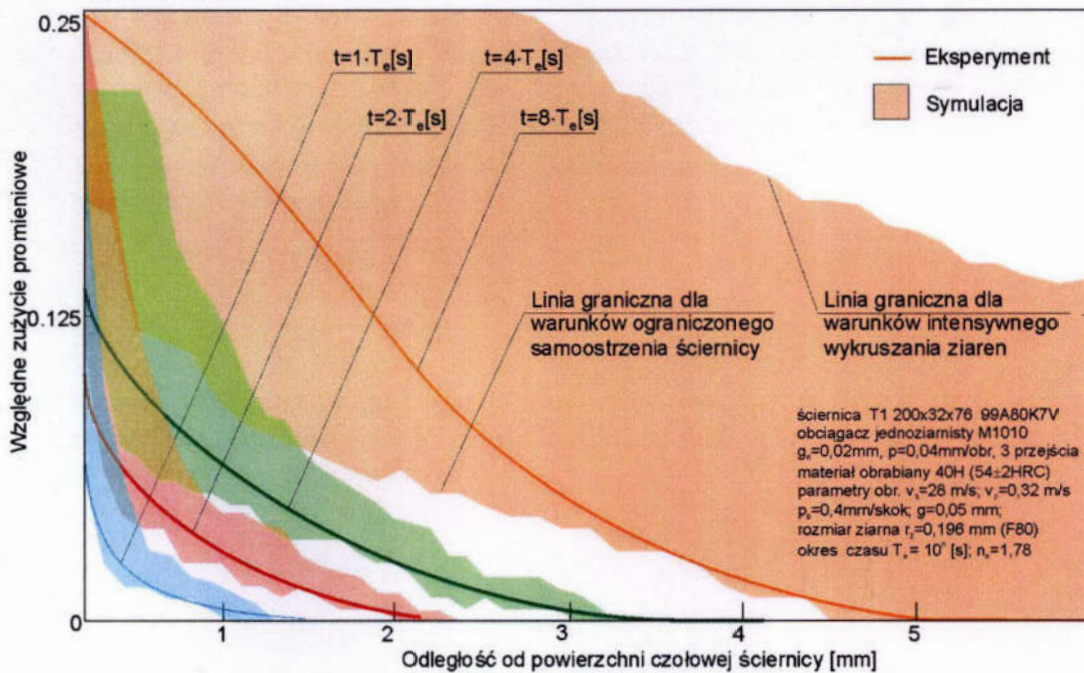


Rys. 7.17. Przebieg zużycia krawędziowego ściernicy - zarysy powierzchni czynnej ściernicy po różnych czasach w procesie obwodowego szlifowania płaszczyzn – badania eksperymentalne zużycia ściernicy 99A80K7V [140]

Na rysunku 7.18 przedstawiono wyniki obliczeń zużycia krawędziowego wzdłuż tworzącej ściernicy otrzymane podczas modelowania, zgodnie z zależnościami, opisanymi w rozdziale czwartym. Natomiast rysunek 7.19 przedstawia wyniki symulacji procesu zużycia ściernicy z zastosowaniem probabilistycznego modelu obciążenia i wytrzymałości ziaren, zgodnie z algorytmem symulacji przedstawionym na rysunkach 7.5 – 7.7.



Rys. 7.18. Przebieg zużycia krawędziowego ściernicy - zarysy powierzchni czynnej ściernicy po różnych czasach w procesie obwodowego szlifowania płaszczyzn – badania symulacyjne (obliczenia na podstawie modeli wyprowadzonych w rozdziale czwartym)



Rys. 7.19. Porównanie wyników badań eksperymentalnych zużycia promieniowego ściernicy z wynikami symulacji, z zastosowaniem probabilistycznych modeli obciążenia i wytrzymałości ziaren ściernych

Z analizy wyników porównania badań symulacyjnych i wyników badań eksperymentalnych wnioskuje się, że zastosowane modele obciążenia i wytrzymałości ziaren, a także algorytmy, zastosowane w symulacji mogą być wykorzystane do oceny procesu zużycia narzędzi ściernych.

7.6. Wnioski z analizy wyników symulacyjnych

Badania symulacyjne i analizy wyników badań pozwoliły na wyprowadzenie wniosków dotyczących symulacji procesu zużycia ściernicy:

1. W symulacji procesu zużycia bardzo ważny jest dobór postaci i parametrów rozkładów obciążenia i wytrzymałości ziarna.
2. Od doboru postaci i parametrów rozkładów obciążenia i wytrzymałości ziaren zależy intensywność wykruszeń podczas symulacji procesu zużycia ściernicy.
3. Funkcja intensywności wykruszeń może być stała, rosnąca lub malejąca podczas procesu szlifowania.
4. Intensywność wykruszeń nie musi być założeniem, natomiast powinna być wynikiem bardziej szczegółowego modelowania obciążenia i wytrzymałości.
5. Intensywność wykruszeń zależna jest od zmian obciążenia ziaren, natomiast zmiana obciążenia zależy od procesu zużycia ziaren.
6. Opracowany model pozwala, w zależności od twardości, struktury i właściwości ziaren, tak dobrać parametry i metodę obciążania ściernicy aby wpływać na rozkład obciążenia i wytrzymałości ziaren, a także określić czas, po którym powinno nastąpić odnowienie powierzchni czynnej ściernicy.

ROZDZIAŁ 8

MODELOWANIE I OCENA TRWAŁOŚCI ŚCIERNIC

8.1. Problematyka wyznaczenia okresu trwałości

Analiza procesu zużycia oraz wyznaczenie okresu trwałości narzędzi ściernych jest problemem o dużym znaczeniu technologicznym i ekonomicznym. Szczególnie ważne jest prawidłowe określenie okresu czasu, po którym powinno nastąpić odnowienie właściwości skrawnych powierzchni czynnej ściernicy. W produkcji jednostkowej, ze względu na zmienne warunki i parametry procesu szlifowania w poszczególnych operacjach, przewidywanie okresu trwałości na podstawie czasu pracy narzędzia może prowadzić do popełnienia znacznych błędów, skutkujących nie wykorzystaniem potencjału skrawnego ściernicy lub doprowadzeniem do wyraźnego pogorszenia właściwości powierzchni obrabianego przedmiotu. W takim przypadku rozwiązaniem problemu może być diagnostyka stanu narzędzia, polegająca na ocenie właściwości eksploatacyjnych na podstawie informacji o wartości monitorowanych wielkości, charakteryzujących proces szlifowania, oraz sygnalizacji stanu narzędzia operatorowi lub wysyłaniu informacji do systemu automatycznego sterowania procesem obróbki.

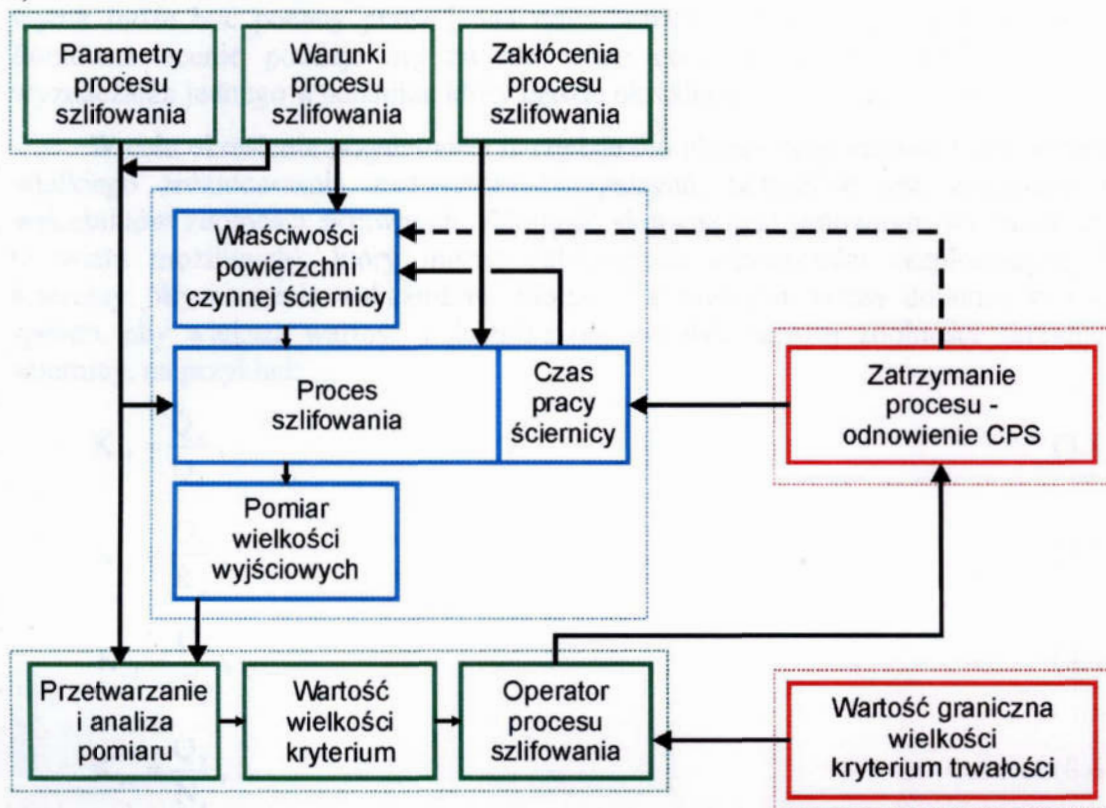
Budowa narzędzi ściernych oraz zmienność warunków i parametrów procesu szlifowania nie pozwala na wyznaczenie prostych zależności deterministycznych pomiędzy monitorowanymi wielkościami. Ze względu na znaczny wpływ czynników o losowym charakterze na proces zużycia narzędzi ściernych, uzasadniona jest budowa systemu symulacji procesu zużycia ściernicy z uwzględnieniem probabilistycznych cech procesu. W systemach automatycznego sterowania procesem szlifowania możliwe jest też porównywanie wyników symulacji z wartościami monitorowanych wielkości, charakteryzujących proces szlifowania i prognozowanie pozostałego okresu czasu, po którym powinno nastąpić odnowienie powierzchni czynnej ściernicy.

Wyznaczenie trwałości narzędzi ściernych z uwzględnieniem losowego charakteru procesu szlifowania, wymaga określenia warunków ograniczających, ustalających dopuszczalny poziom zmian mikrogeometrii powierzchni czynnej ściernicy oraz zmian kształtu i wymiarów ściernicy. Dopuszczalne pogorszenie właściwości eksploatacyjnych narzędzia może być określane za pomocą syntetycznych kryteriów oceny procesu lub z wykorzystaniem zbioru wartości wybranych wielkości wyjściowych procesu, takich jak siły i moc szlifowania, parametry emisji akustycznej oraz parametry drgań układu obróbkowego.

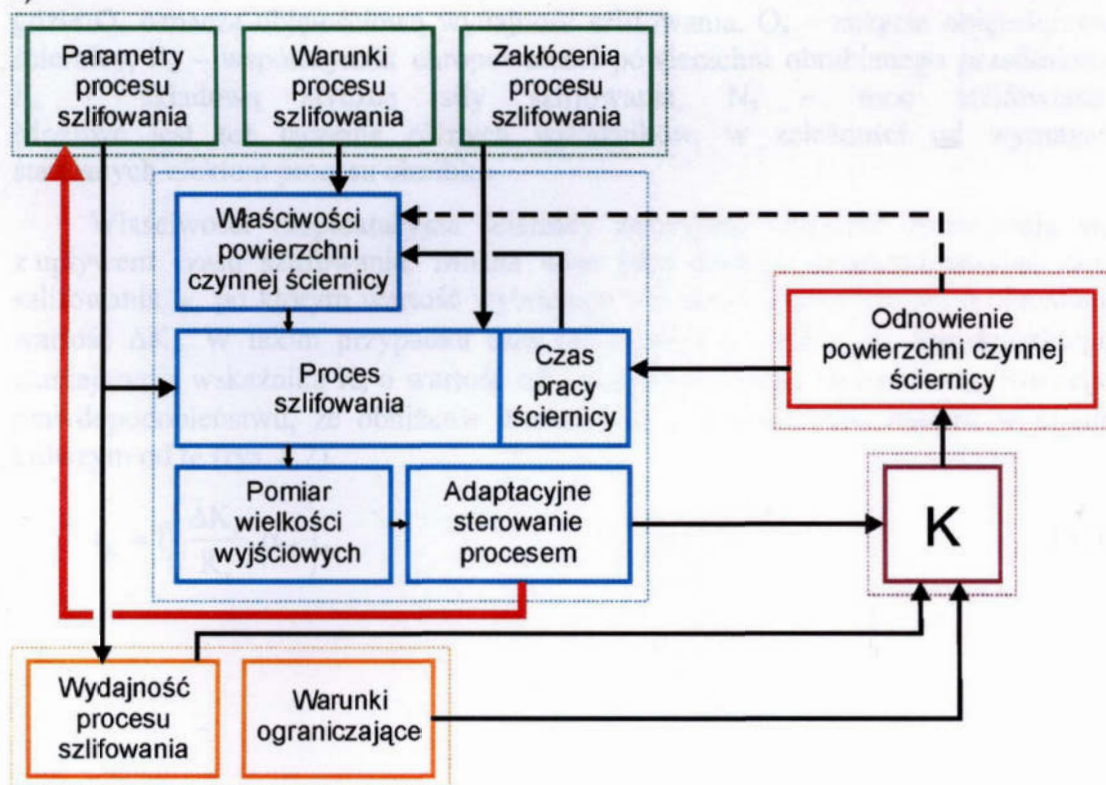
Zmiana właściwości eksploatacyjnych narzędzia, z upływem czasu szlifowania, w wyniku jego zużywania się, jest głównym powodem zwiększania się prawdopodobieństwa, że niedotrzymane zostaną warunki ograniczające. Za kryterium trwałości można uznać więc osiągnięcie granicznej wartości choćby jednej, z rozpatrywanych wielkości wyjściowych procesu szlifowania, na które nałożono warunki ograniczające.

Na rysunku 8.1 przedstawiono schematy do analizy wykorzystania informacji o realizacji i wynikach procesu szlifowania dla określenia trwałości ściernicy w warunkach z ustalonymi parametrami szlifowania oraz sterowania adaptacyjnego.

a)



b)



Rys. 8.1. Schemat do analizy wykorzystania informacji o przebiegu i wynikach procesu szlifowania dla określenia trwałości ściernicy w warunkach:

a) kontroli procesu przez operatora, b) sterowania adaptacyjnego

8.2. Ocena właściwości eksploatacyjnych ściernicy

Od każdej oceny, w tym również od oceny właściwości eksploatacyjnych narzędzi ściernych, wymaga się spełnienia warunku jednoznaczności, co oznacza, że wynik może być podany przez jedną tylko wartość z przyjętego zakresu zmian. Ponieważ ocenie poddaje się zwykle wiele cech, to należy określić sposób wyznaczania jednego wskaźnika, który będzie określoną funkcją tych cech.

W celu określenia przydatności narzędzia dla określonego zastosowania wobec wielkiego zróżnicowania zastosowań i wymagań, potrzebne jest wyznaczenie wskaźników zdolności skrawnych. Zdolność skrawna jest umownym wskaźnikiem (z wielu możliwych), który można zaliczyć do właściwości eksploatacyjnych ściernicy. Wyznaczenia wskaźników zdolności skrawnych należy dokonać w taki sposób, aby większa wartość wskaźnika odpowiadała lepszej zdolności skrawnej ściernicy, na przykład:

$$K_{s1} = \frac{Q_v}{Q_s}, \quad (8.1)$$

$$K_{s2} = \frac{Q_v}{R_a}, \quad (8.2)$$

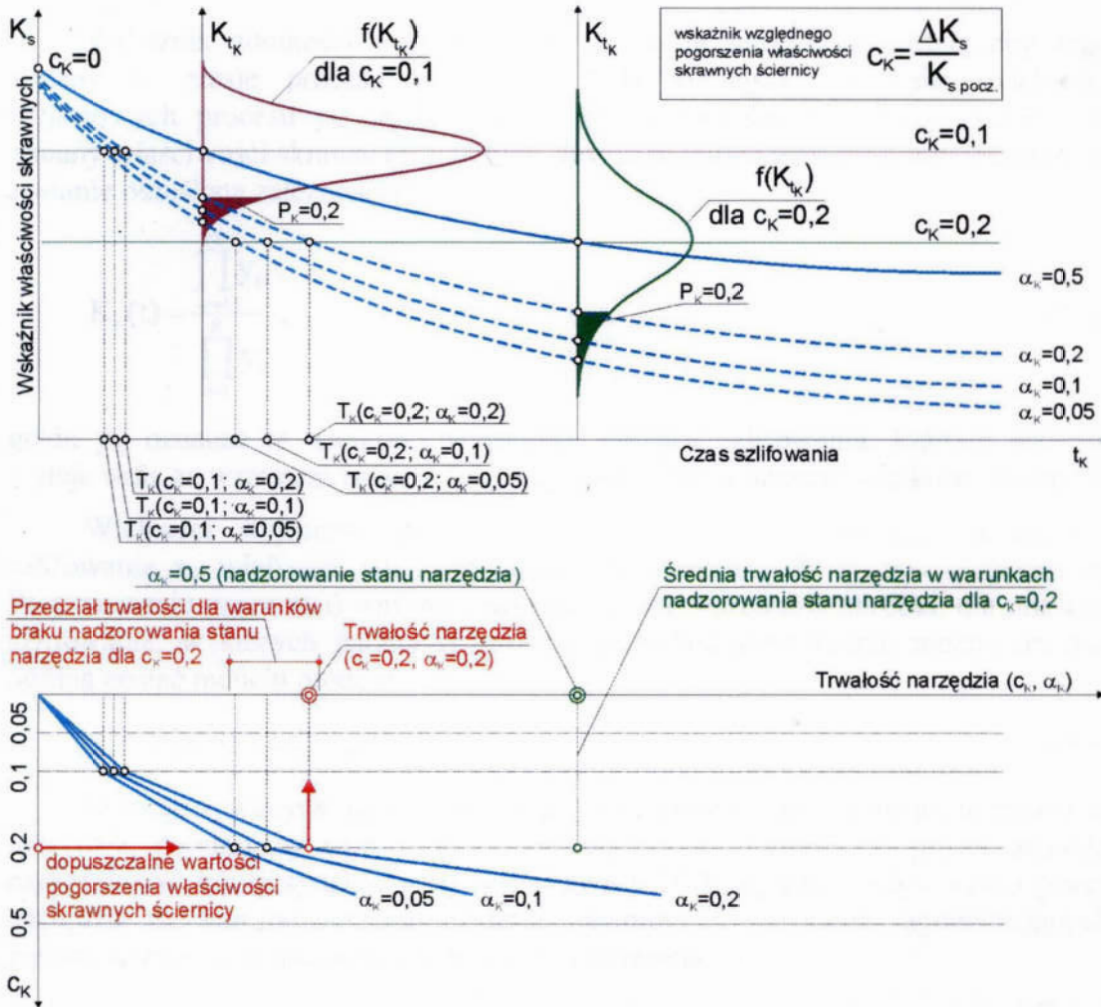
$$K_{s3} = \frac{Q_v}{F_n}, \quad (8.3)$$

$$K_{s4} = \frac{Q_v}{N_s}, \quad (8.4)$$

gdzie Q_v oznacza objętościową wydajność szlifowania, Q_s – zużycie objętościowe ściernicy, R_a – współczynnik chropowatości powierzchni obrabianego przedmiotu, F_n – składową styczną siły szlifowania, N_s – moc szlifowania. Możliwe jest też łączenie różnych wskaźników, w zależności od wymagań stawianych efektem procesu obróbki.

Właściwości eksploatacyjne ściernicy zazwyczaj wyraźnie zmniejszają się z upływem czasu szlifowania. Można więc jako miernik trwałości przyjąć czas szlifowania t_k , po którym wartość wybranego wskaźnika zmniejsza się o określoną wartość ΔK_s . W takim przypadku czas szlifowania t_k zależy od dopuszczalnego zmniejszenia wskaźnika K_s o wartość ΔK_s oraz od poziomu istotności α_k , równego prawdopodobieństwu, że obniżenie wartości K_s o wartość ΔK_s nastąpi w czasie krótszym od t_k (rys. 8.2).

$$t_k = f\left(\frac{\Delta K_s}{K_s}, \alpha_k\right), \quad (8.5)$$



Rys. 8.2. Schemat do analizy trwałości właściwości eksploatacyjnych ściernicy

8.3. Model matematyczny trwałości ściernicy – postać ogólna

Wyznaczenie okresu trwałości wymaga określenia warunków ograniczających, nałożonych na zmiany wielkości wyjściowych procesu lub ich funkcje, na które znaczny wpływ ma postępujące zużycie poszczególnych ziaren i całego narzędzia ściernego. Jeżeli proces szlifowania nie jest sterowany adaptacyjnie, to warunki ograniczające nie są nałożone na wartości parametrów procesu (te są niezmiennie) lecz na wyniki procesu i mają postać:

$$K_s = K_{s \min} , \tag{8.6}$$

gdzie K_s oznacza zdolność skrawną ściernicy, natomiast $K_{s \min}$ – najmniejszą dopuszczalną zdolność skrawną pod względem oczekiwanych efektów szlifowania, wyrażonych za pomocą warunków ograniczających. Wskaźnik zdolności skrawnej zależy od rodzaju obróbki, wymagań dokładności wymiarowej i kształtowej oraz jakości warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu. Po oznaczeniu przez y_i wybranych wielkości wyjściowych procesu szlifowania oraz przez t czasu szlifowania, zmienność wskaźnika właściwości skrawnych K_s w czasie szlifowania można przedstawić jako funkcję wartości wyjściowych:

$$K_s(t) = f(y_i(t)); \quad i=1,2,\dots,n, \tag{8.7}$$

Wskaźnik zdolności skrawnej $K_s(t)$ powinien mieć taką postać, aby jego zmiany w czasie procesu szlifowania były silniejsze od zmian wielkości wyjściowych procesu y_i , czyli powinien być wskaźnikiem o dużej czułości na zmiany właściwości skrawnych ściernicy. Jest to możliwe wówczas, gdy jego postać zostanie określona zależnością:

$$K_s(t) = \frac{\prod_{m=1}^M y_m}{\prod_{r=1}^R y_r}, \quad (8.8)$$

gdzie y_m oznacza te wielkości wyjściowe procesu szlifowania, których wartość maleje wraz ze wzrostem zużycia ściernicy, natomiast y_r oznacza wielkości rosnące.

Wielkości wyjściowe procesu szlifowania y_i są funkcjami parametrów szlifowania x_i , wielkości mierzalnych lecz niesterowalnych w_i oraz zakłóceń z_i . Po oznaczeniu przez $w_i(t)$ wpływu czasu na zmianę warunków obróbki, dla operacji szlifowania, w których parametry procesu pozostają niezmiennie, można przyjąć ogólną postać modelu procesu:

$$y_j = f_i[w_i(t), z_i] \Big|_{x_i = \text{const}}, \quad (8.9)$$

W rozpatrywanych okresach czasu pracy ściernicy, odpowiadających trwałości narzędzia, dominujący wpływ na zmianę warunków obróbki ma proces zużycia narzędzia. W takiej sytuacji $w_i(t)$ w zależności (8.9) opisuje wpływ czasu pracy narzędzia na stan powierzchni czynnej ściernicy. Z warunków ograniczających zmiany wielkości wyjściowych y_i procesu szlifowania:

$$y_j = f_i[w_i(t), z_i] \leq y_{j \text{ dop}}, \quad (8.10)$$

wynika zależność czasu

$$T_j \leq \eta_{y_j}(y_{j \text{ dop}}, z_i), \quad (8.11)$$

po którym y_j osiąga wartość dopuszczalną.

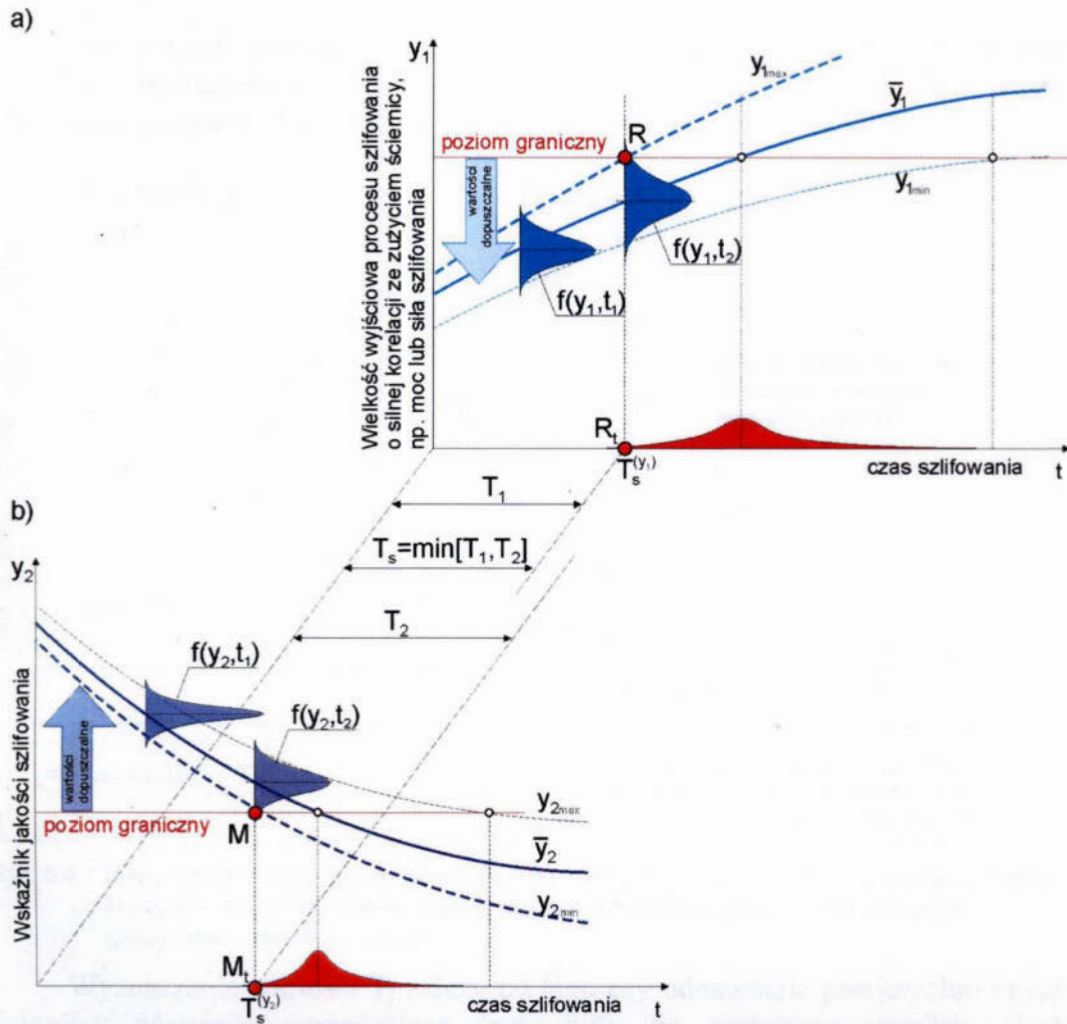
Okres trwałości ściernicy T_s , w którym wszystkie poddane ocenie właściwości eksploatacyjne ściernicy mieszczą się w granicach dopuszczalnego ich pogorszenia, określa zależność:

$$T_s = \min[T_j = \eta_{y_j}(y_{j \text{ dop}}, z_i)], \quad (8.12)$$

W przypadku, gdy warunek ograniczający nałożono również na wskaźnik zdolności skrawnej K_s , czyli $K_s > K_{s \text{ min}}$, to:

$$T_s = \min[T_{K_s} = \eta_{K_s}(K_{s \text{ min}}), T_j = \eta_{y_j}(y_{j \text{ dop}})], \quad (8.13)$$

Oznacza to, że trwałość ściernicy T_s jest równa najkrótszemu czasowi szlifowania, po którym przynajmniej jedna z wielkości wyjściowych lub wartość wskaźnika zdolności skrawnej osiągnie wartość dopuszczalną. Postaci funkcji $\eta_{K_s}(K_{s \text{ min}})$ i $\eta_{y_j}(y_{j \text{ dop}})$ nie są znane, bowiem zawierają składową losową, zależną od wpływu zakłóceń w procesie szlifowania, co można uwzględnić wyznaczając rozkład trwałości ściernicy T_s (rys. 8.3).



Rys. 8.3. Graficzna interpretacja wyznaczania rozkładu trwałości narzędzia dla wielkości wyjściowych: a) zwiększających wartość, wraz ze wzrostem zużycia ściernicy, b) malejących wraz z pogorszeniem się właściwości skrawnych ściernicy, takich jak np. wskaźnik jakości szlifowania

Na rysunku 8.3 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczania okresu trwałości ściernicy przez analizę zmian parametrów wyjściowych procesu szlifowania. W pierwszym przypadku (rys. 8.3a), dla wielkości wyjściowych rosnących wraz z procesem zużycia ściernicy, np. siły lub moc szlifowania, trwałość ściernicy T_s wyznacza okres czasu określony punktem R_t , czyli przekroczenie poziomu granicznego (punkt R) przez maksymalną wartość wielkości wyjściowej y_1 .

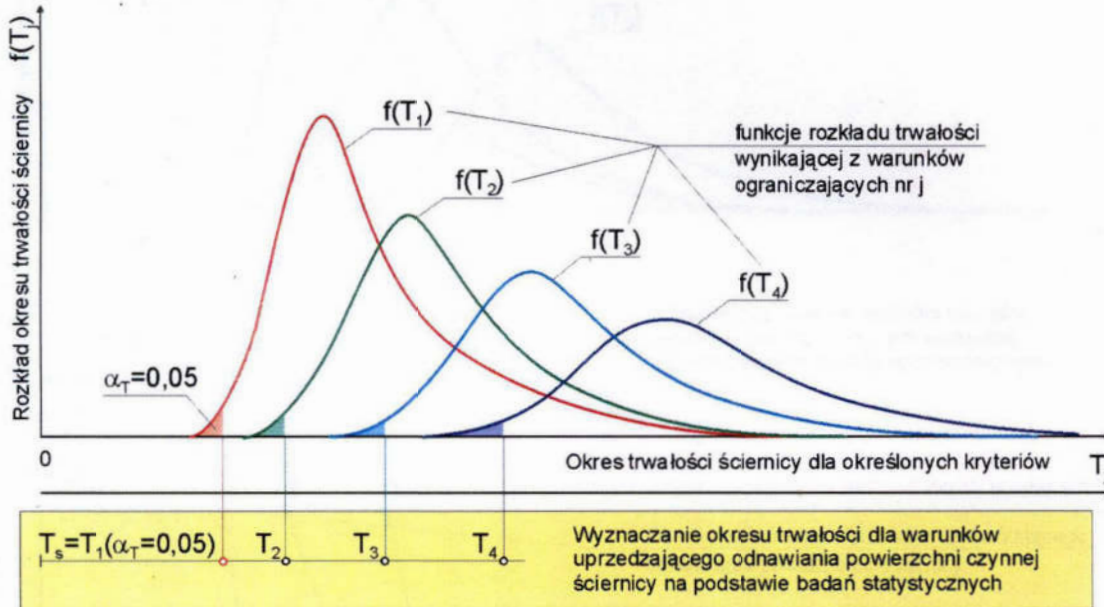
W przypadku wielkości wyjściowych malejących wraz ze wzrostem zużycia narzędzia o trwałości ściernicy decyduje dolna granica dopuszczalnego poziomu granicznego – punkt M_t (rys. 8.3b).

W sytuacji przedstawionej na rysunku 8.3 okres trwałości narzędzia T_s wyznacza przekroczenie dopuszczalnej granicy przez wielkość $y_1 = \min[y_1, y_2]$, czyli najkrótszy okres czasu, po którym nastąpiło pogorszenie właściwości skrawnych ściernicy w stosunku do określonych kryteriów trwałości, a ogólnie:

$$T_s = \min[y_1, y_2, \dots]. \quad (8.14)$$

Dla różnych warunków ograniczających rozkłady wartości T_j będą odmienne (rys. 8.4), natomiast o trwałości ściernicy decydować będzie warunek ograniczający o numerze j , czyli $T_j \leq \eta_{y_j}(y_{j\text{dop}}, z_i)$, i wówczas trwałość ściernicy jest równa:

$$T_s = \min[T_j]; \quad j=1,2,\dots,n, \quad (8.15)$$



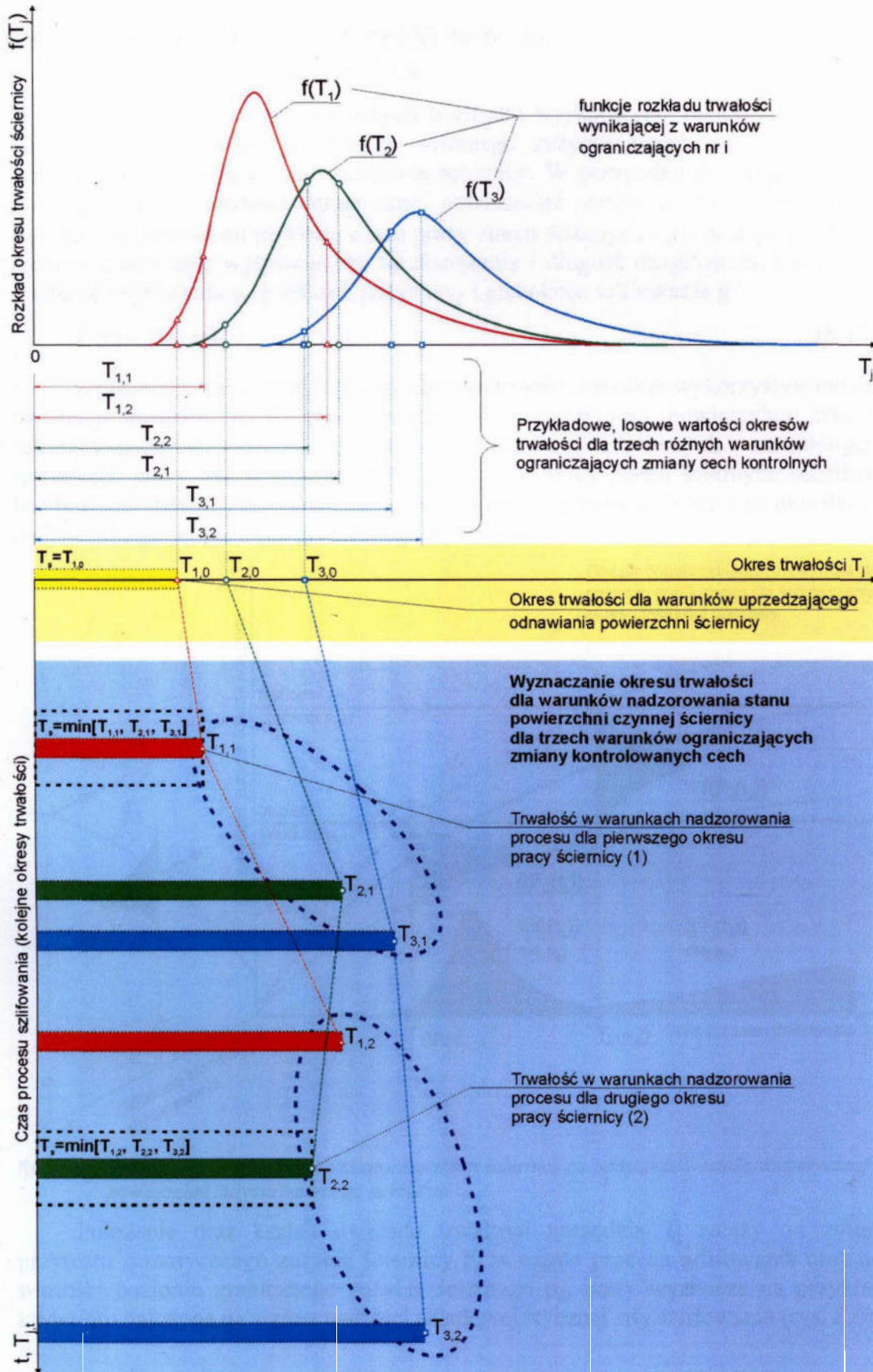
Rys. 8.4. Zmiany rozkładu funkcji trwałości ściernicy wskutek zakłóceń losowych dla określonych kryteriów oceny i warunków uprzedzającego odnawiania powierzchni narzędzia (po upływie ustalonego czasu)

Wyznaczanie wartości T_j zależy od tego czy odnawianie powierzchni czynnej ściernicy następuje uprzedzająco (rys. 8.4), na podstawie wyników badań statystycznych, czy też w wyniku bieżącej oceny stanu narzędzia. **W przypadku braku nadzorowania stanu narzędzia** wartość T_j zależy od przyjętego prawdopodobieństwa α_T przypadku, że ściernica utraci swoją trwałość przed wyznaczonym czasem pracy T_j .

$$T_j = f(\alpha_T). \quad (8.16)$$

Dla warunków obróbki, w których **proces zużycia ściernicy jest kontrolowany za pomocą monitorowania i oceny zmian wartości wielkości wyjściowych**, w kolejnych etapach użytkowania o okresach trwałości mogą zadecydować różne warunki ograniczające nałożona na monitorowane wielkości (rys. 8.5), a poszczególne okresy trwałości ściernicy będą różne.

W przypadku monitorowania stanu powierzchni narzędzia, okres trwałości zależy od bieżącej oceny parametrów wyjściowych procesu szlifowania i osiągać będzie wartości wyższe, niż dla przypadku uprzedzającego odnawiania powierzchni ściernicy (rys. 8.5), co oznacza lepsze wykorzystanie potencjału obróbkowego narzędzia oraz niższe koszty obróbki. Zostało to zilustrowane na rysunku 8.5, na którym z porównania $T_{1,0}$ oraz $T_{1,1} = \min[T_{1,1}, T_{2,1}, T_{3,1}]$ i $T_{2,2} = \min[T_{1,2}, T_{2,2}, T_{3,2}]$ widać korzyści wynikające z nadzorowania stanu narzędzia.



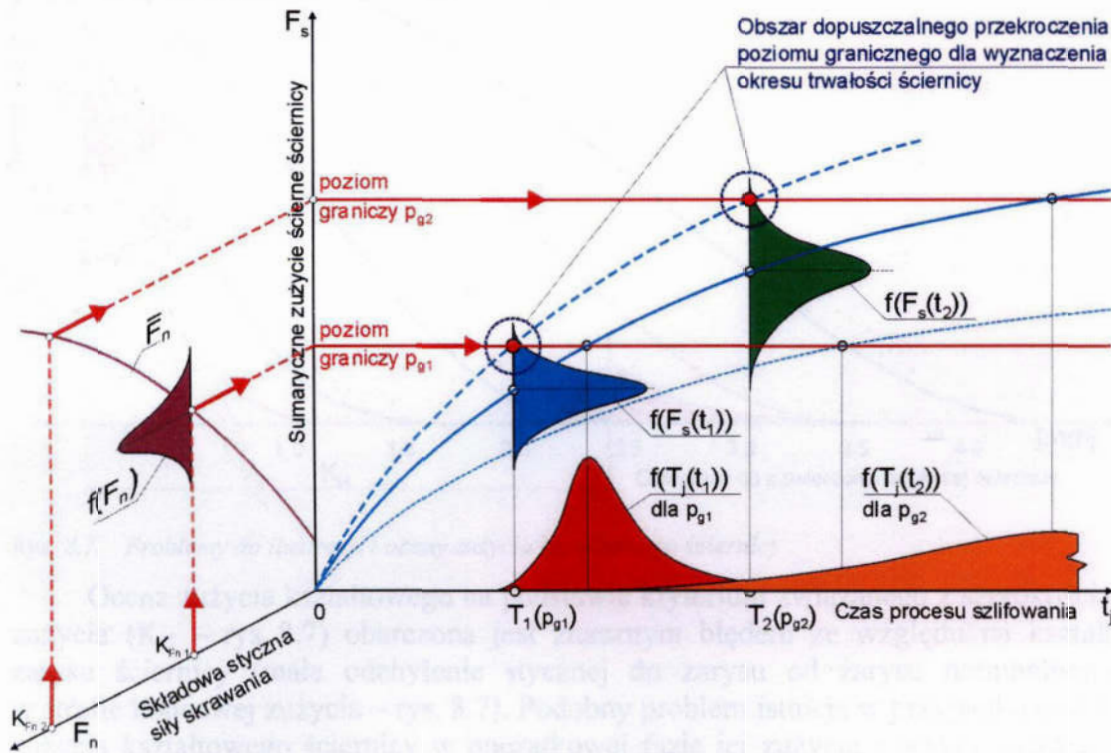
Rys. 8.5. Wyznaczanie okresu trwałości narzędzia dla warunków nadzorowania parametrów stanu powierzchni czynnej ściernicy

8.4. Wpływ warunków obróbki na ocenę okresu trwałości ściernicy

Wzrost wartości monitorowanych wielkości wyjściowych, takich jak siły lub moc szlifowania zależy głównie od ściernego zużycia ziaren, szczególnie dla warunków ograniczonego samoostrzenia ściernicy. W przypadku przewagi zużycia ściernego zmiany wartości sumarycznej powierzchni starcia w czasie szlifowania $F_s(t)$ zależą głównie od rozkładu czasu pracy ziaren ściernych $v_k(t)$ oraz parametrów procesu szlifowania wpływających na obciążenie i długość drogi ostrza, takich jak prędkość szlifowania v_s , prędkość posuwu v_p i głębokość szlifowania g :

$$F_s(t) = f(v_k(t), v_s, v_p, g, \dots), \tag{8.17}$$

Wyprowadzone w rozdziale czwartym zależności i modele wykorzystywane do symulacji rozkładu czasu pracy ziaren oraz sumarycznej powierzchni starcia ściernicy mogą być podstawą do analizy trwałości narzędzi ściernych w określonych warunkach pracy. Na podstawie rozkładów czasu pracy ziaren ściernych możliwe jest bowiem wyznaczenie sumarycznej powierzchni starcia narzędzia oraz określenie maksymalnego jej poziomu granicznego (rys. 8.6).

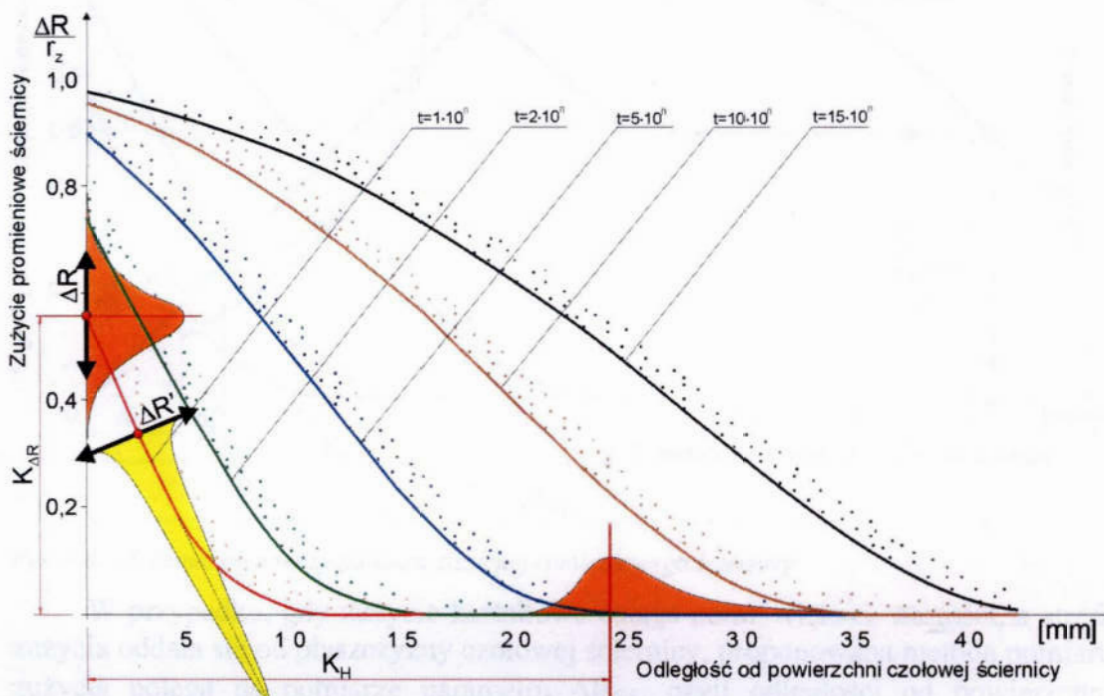


Rys. 8.6. Schemat do analizy i oceny okresu trwałości ściernicy na podstawie wartości sumarycznej powierzchni zużycia ściernego narzędzia

Położenie oraz kształt rozkładu trwałości narzędzia T_j zależy od zmian przyrostu sumarycznego zużycia ściernicy F_s w czasie procesu szlifowania oraz od wartości poziomu granicznego zużycia ściernego p_g , który wyznacza na przykład kryterium nałożone na wzrost wartości składowej stycznej siły szlifowania (rys. 8.6).

Dla ceny trwałości narzędzia w warunkach pracy z samostrzeniem ściernicy, szczególnie w przypadku obwodowego szlifowania płaszczyzn z posuwem poprzecznym, istotne znaczenie ma dokładność wyznaczenia jej zużycia kształtowego wzdłuż tworzącej. W takim przypadku wskazane jest określenie dwóch kryteriów trwałości. Pierwsze kryterium $K_{\Delta R}$ związane jest z przyrastającym w czasie szlifowania zużyciem promieniowym ściernicy, natomiast drugie K_H odnosi się do zmiany czynnej szerokości strefy szlifowania (rys. 8.7).

Posługiwanie się kryteriami oceny zużycia promieniowego ściernicy $K_{\Delta R}$ oraz szerokości strefy szlifowania K_H stwarza wiele trudności dla oceny trwałości narzędzia. W warunkach produkcyjnych trudno jest korzystać z powyższych kryteriów (K_H i $K_{\Delta R}$) ze względu na problemy związane z ich pomiarami (rys. 8.7).

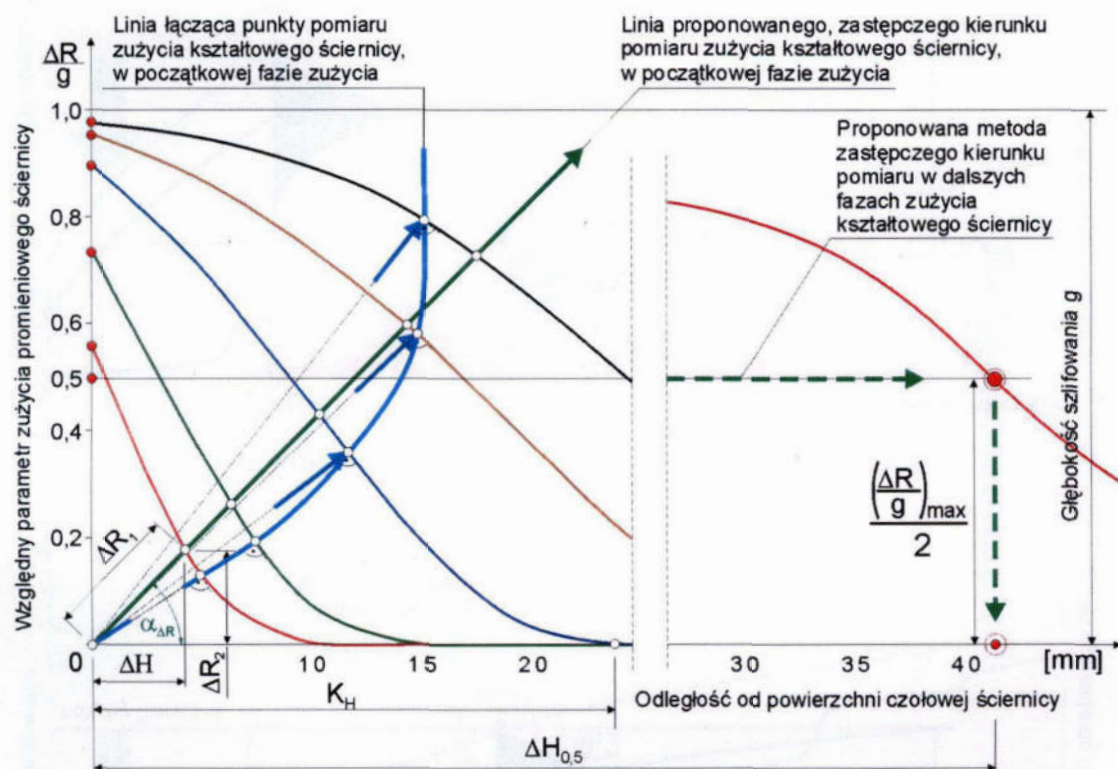


Rys. 8.7. Problemy do ilustracji i oceny zużycia kształtowego ściernicy

Ocena zużycia kształtowego na podstawie kryterium związanego z szerokością zużycia (K_H – rys. 8.7) obarczona jest znacznym błędem ze względu na kształt zarysu ściernicy (małe odchylenie stycznej do zarysu od zarysu nominalnego w strefie końcowej zużycia – rys. 8.7). Podobny problem istnieje w przypadku oceny zużycia kształtowego ściernicy w początkowej fazie jej zużycia z wykorzystaniem kryterium zużycia promieniowego narzędzia ($K_{\Delta R}$ – rys. 8.7).

Optymalny kierunek pomiaru zużycia promieniowego, w początkowej fazie zużycia kształtowego ściernicy, przebiega przez punkty wyznaczone przecięciem tworzącej ściernicy z prostymi przechodzącymi przez punkt 0 i prostopadłymi do zarysu powierzchni ściernicy (rys. 8.8).

Na rysunku 8.8 przedstawiono nową koncepcję pomiaru zużycia promieniowego ściernicy. Dla zastosowań praktycznych, dla pomiaru parametru ΔR_1 , w początkowej fazie zużycia kształtowego ściernicy, wyznaczono zastępczy kierunek pomiaru, przechodzący przez punkt 0 i odchylony o $\alpha_{\Delta R} = 45^\circ$ względem tworzącej zarysu nominalnego ściernicy.



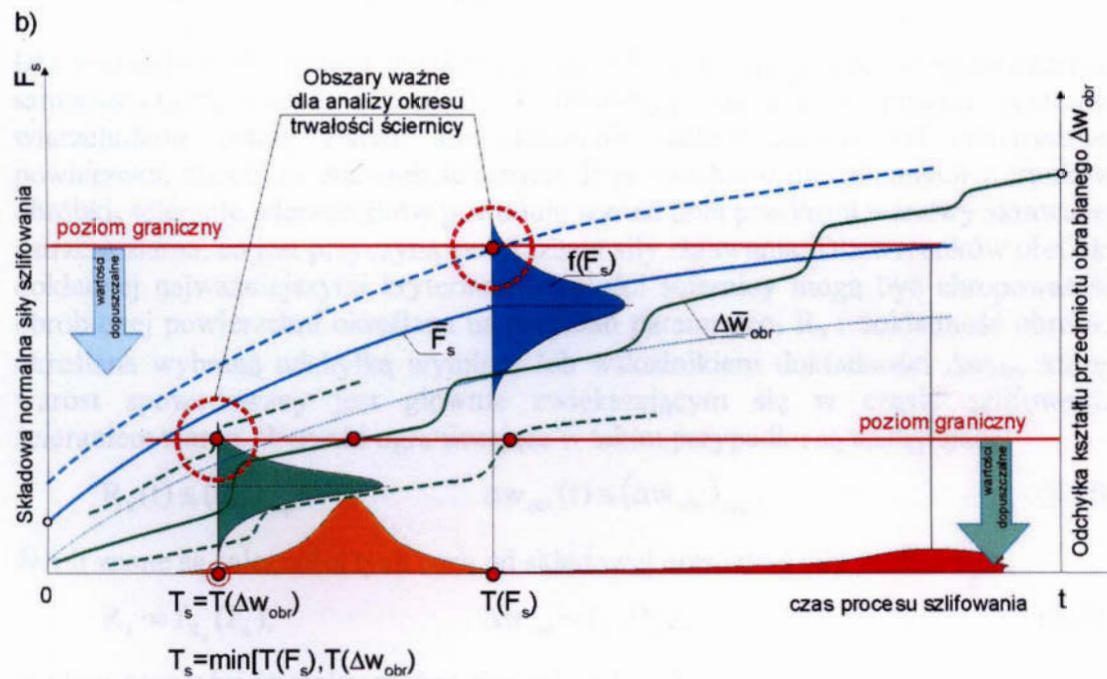
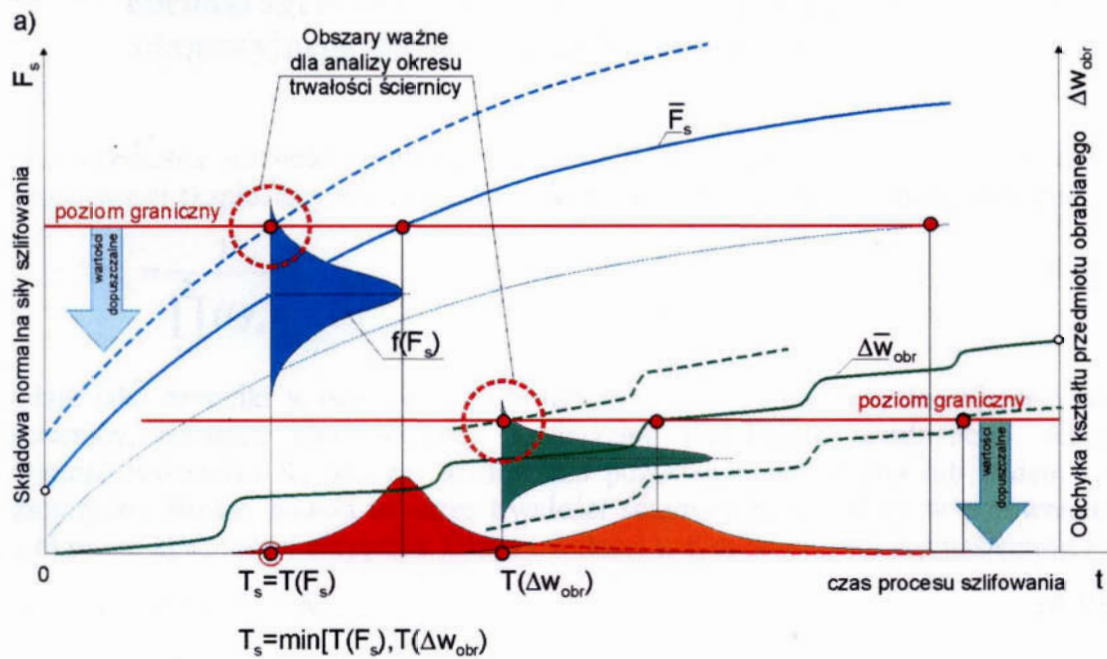
Rys. 8.8. Schemat do analizy pomiaru zużycia promieniowego ściernicy

W przypadku, gdy zużycie kształtowe osiąga coraz większe wartości, a strefa zużycia oddala się od płaszczyzny czołowej ściernicy, proponowana metoda pomiaru zużycia polega na pomiarze parametru $\Delta H_{0,5}$, czyli odległości od powierzchni czołowej ściernicy do punktu, w którym względny współczynnik zużycia promieniowego $\Delta R/g$ osiągnie połowę wartości maksymalnej (rys. 8.8), czyli $g/2$.

W zależności od warunków pracy narzędzia następuje określona kolejność osiągnięcia poziomu granicznego dla wielkości wyjściowych procesu. W przypadku pracy ściernicy w warunkach postępującego tępienia, kryterium odchyłki kształtu obrabianego przedmiotu może mieć mniej istotny wpływ na wyznaczenie okresu trwałości ściernicy. Dla warunków tępienia ziaren ściernych należy spodziewać się w pierwszej kolejności przekroczenia przez siłę szlifowania poziomu granicznego, a następnie dopiero niewielkiego wzrostu odchyłki kształtu obrabianego przedmiotu (rys. 8.9a).

Odmiennej sytuacji należy spodziewać się dla warunków pracy ściernicy z przewagą procesu samoostrzenia narzędzia. W przypadku takim procesy mikrowykruszeń i wykruszeń ziaren mogą doprowadzić do sytuacji, w której nie zostaną zachowane wymagania dotyczące tolerancji wymiaru i kształtu przedmiotu obrabianego. Proces samoostrzenia ściernicy powoduje powolny niemonotoniczny wzrost siły szlifowania, a przekroczenie jej wartości dopuszczalnej spodziewane jest

później niż przekroczenie dopuszczalnej odchyłki kształtu obrabianego przedmiotu (rys. 8.9b).



Rys. 8.9. Wpływ warunków obróbki na ocenę okresu trwałości ściernicy a) warunki pracy ściernicy dla postępującego tępienia narzędzia, b) warunki pracy z samoostrzeniem ściernicy

8.5. Modelowanie trwałości w określonych warunkach dla obróbki zgrubnej, dokładnej oraz dla przypadku adaptacyjnego sterowania procesem szlifowania

Dla warunków obróbki zgrubnej, zgodnie z zależnościami 8.1–8.4 i 8.8, do oceny właściwości eksploatacyjnych ściernicy można użyć wskaźnika zdolności skrawnej,

$$K_s = \frac{1}{\prod_{r=1}^R f(y_r)}, \quad (8.18)$$

gdzie jako czynniki y_r mogą być: siła lub moc szlifowania, zużycie objętościowe ściernicy, parametr chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego. Jeżeli wartość wskaźnika K_s podczas szlifowania pozostanie niezmienna lub będzie się zmniejszać bardzo powoli to okres trwałości ściernicy będzie duży w porównaniu z okresem żywotności narzędzia. Okres trwałości w tym przypadku jest następujący:

$$T_s = \min[t | K_s = K_{\min}], \quad (8.19)$$

Dla warunków dokładnej obróbki, w których ściernica pracuje z ograniczonym samoostrzeniem ziaren ściernych, z przewagą zużycia w postaci ścierania wierzchołków ostrzy ziaren, siła skrawania zależy głównie od sumarycznej powierzchni starcia na ziarnach ściernych. Przy założeniu niezmiennych warunków obróbki, ścieranie wierzchołków powoduje wzrost pola przekroju warstwy skrawanej ostrzem ziarna, co jest przyczyną zwiększenia siły skrawania. Dla warunków obróbki dokładnej najważniejszymi kryteriami trwałości ściernicy mogą być chropowatość obrobionej powierzchni określana na przykład parametrem R_a i dokładność obróbki określana wybraną odchyłką wymiaru lub wskaźnikiem dokładności Δw_{obr} , której wzrost spowodowany jest głównie zwiększającym się w czasie szlifowania ścieraniem ziaren. Warunki ograniczające w takim przypadku są następujące:

$$R_a(t) \leq (R_a)_{\text{dop}}; \quad \Delta w_{\text{obr}}(t) \leq (\Delta w_{\text{obr}})_{\text{dop}}, \quad (8.20)$$

Jeżeli znane są zależności tych cech od składowej normalnej siły szlifowania:

$$R_a = f_{R_a}(F_n); \quad \Delta w_{\text{obr}} = f_{\Delta w}(F_n), \quad (8.21)$$

to okres trwałości ściernicy można zapisać następująco

$$T_s = \min \left[\begin{array}{l} T_{R_a} | F_n(t) = \xi_{R_a}(R_a)_{\text{dop}} \\ T_{\Delta w} | F_n(t) = \xi_{\Delta w}(\Delta w_{\text{obr}})_{\text{dop}} \end{array} \right], \quad (8.22)$$

Przedstawione powyżej modele dotyczące trwałości narzędzi ściernych dla odmiennych warunków pracy ściernicy mogą posłużyć do wyznaczenia okresu trwałości narzędzi ściernych w celu wykorzystania ich potencjału obróbkowego. W przypadku traktowania trwałości ściernicy jako parametru procesu szlifowania możliwe jest optymalizowanie przebiegu procesu z uwagi na przyjęte kryteria i warunki ograniczające dzięki wykorzystaniu wskaźników zdolności eksploatacyjnych narzędzi.

Znajomość modelu trwałości ściernicy pozwala tak planować proces szlifowania, aby przy założonym okresie trwałości spełnione były warunki ograniczające lub przy założonych wartościach parametrów procesu i warunków obróbki prawidłowo wyznaczyć momenty, w których należy odnowić powierzchnię czynną ściernicy.

W przypadku adaptacyjnego, stałowartościowego sterowania procesem szlifowania utrzymywana jest stała wartość jednej z wielkości wyjściowych, np. składowej normalnej siły szlifowania F_n :

$$F_n = f_F [v_p, w_F, z_F, t] = \text{const}, \quad (8.23)$$

Jeżeli utrzymanie stałej wartości wielkości F_n odbywa się za pomocą zmiany wartości parametru szlifowania, np. prędkości posuwu przedmiotu v_p to:

$$v_p = \xi_F [w_F, z_F, F_n, t], \quad (8.24)$$

Po uzależnieniu parametru v_p warunkiem $v_p \leq v_{p \text{ dop}}$ trwałość ściernicy wynosi:

$$T_s = \min \left[\begin{array}{l} T_F = \eta_F [F_n, v_{p \text{ dop}}, w_F, z_F, v_s, g, \dots] \\ T_i = \eta_i (y_{i \text{ dop}}, z_i, w_i, z_i) \end{array} \right], \quad (8.25)$$

Oznacza to, że trwałość ściernicy będzie równa najkrótszemu czasowi, po którym prędkość posuwu v_p (w wyniku sterowania i utrzymywania stałej wartości F_n) zostanie zmniejszona do wartości $v_{p \text{ dop}}$ lub przynajmniej jedna z pozostałych wielkości wyjściowych y_i osiągnie swoją wartość dopuszczalną $y_{i \text{ dop}}$. Jeżeli znane są zależności $T_F = f(v_{p \text{ dop}})$ oraz $T_i = f(y_{i \text{ dop}}, x_i)$ to model trwałości można zapisać:

$$T_s = \min \left[\begin{array}{l} T_F = f(v_{p \text{ dop}}) \\ T_i = f(y_{i \text{ dop}}, z_i) \end{array} \right], \quad (8.26)$$

8.6. Modelowanie kosztów eksploatacji narzędzi ściernych

W przypadku, gdy dąży się do uzyskania największej wydajności produkcyjnej lub najniższych kosztów obróbki K_{obr} , należy tak dobrać narzędzie, aby warunki ograniczające, dotyczące cech procesu szlifowania i wymagania odnośnie wyników były spełnione w całym okresie trwałości narzędzia. Ważnym problemem w takim przypadku jest właściwy wybór czasów T_j , które mogą wynikać z przyjętych założeń dotyczących wartości α_T (zależność 8.16, rys. 8.4). Korzystne jest więc przeprowadzenie analizy kosztów obróbki, z uwzględnieniem prawdopodobnych skutków zwiększania czasów T_j , czyli zwiększania α_T .

Po oznaczeniu przez t_{sz} – czasu szlifowania, C_{sz} – stałej zależnej od warunków szlifowania, K_{obc} – kosztów obciążania powierzchni i utraty wartości ściernicy, koszt obróbki odniesiony do jednego przedmiotu można wyrazić zależnością:

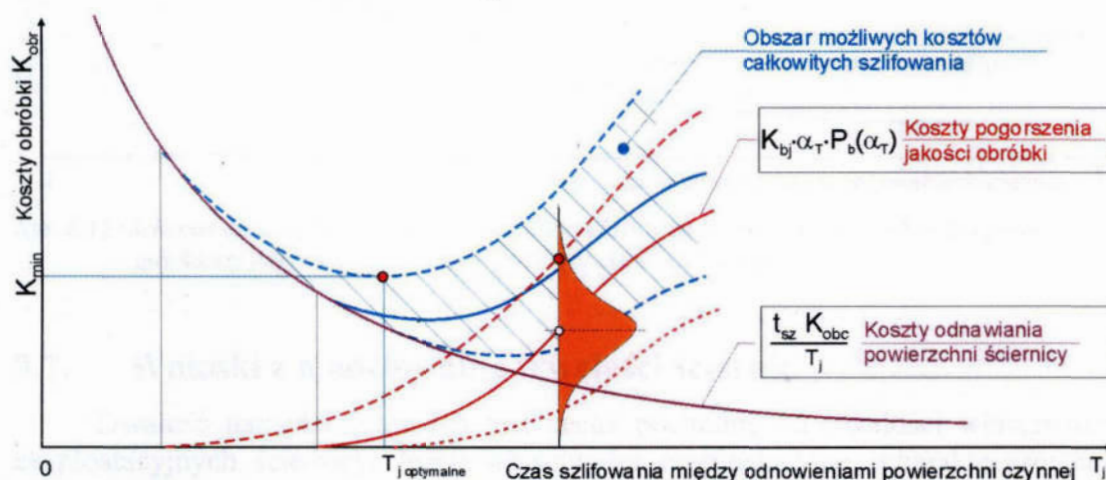
$$K_{\text{obr}} = C_{sz} t_{sz} + \frac{t_{sz} K_{\text{obc}}}{\min[T_j]} + \max[K_{bj}(T_j) \cdot \alpha_T(T_j) \cdot P_b(\alpha_T(T_j))], \quad (8.27)$$

gdzie K_{bj} jest kosztem występowania wad obrabianego przedmiotu, α_T oznacza prawdopodobieństwo, że okres trwałości będzie mniejszy od przyjętego,

natomiast P_b oznacza prawdopodobieństwo, że sytuacja ta spowoduje występowanie wad w procesie szlifowania.

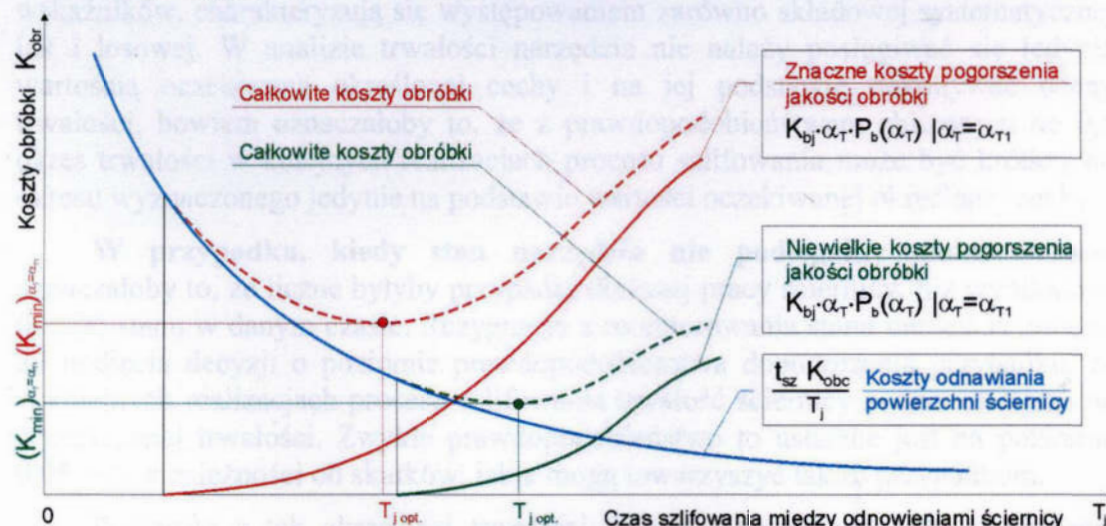
Wartości czasu T_j , dla którego koszt obróbki K_{obr} osiąga wartość najmniejszą można wyrazić zależnością (rys. 8.10):

$$\frac{d \left(K_{obr} = C_{sz} t_{sz} + \frac{t_{sz} K_{obc}}{\min[T_j]} + \max[K_{bj}(T_j) \cdot \alpha_T(T_j) \cdot P_b(\alpha_T(T_j))] \right)}{dT_j} = 0, \quad (8.28)$$

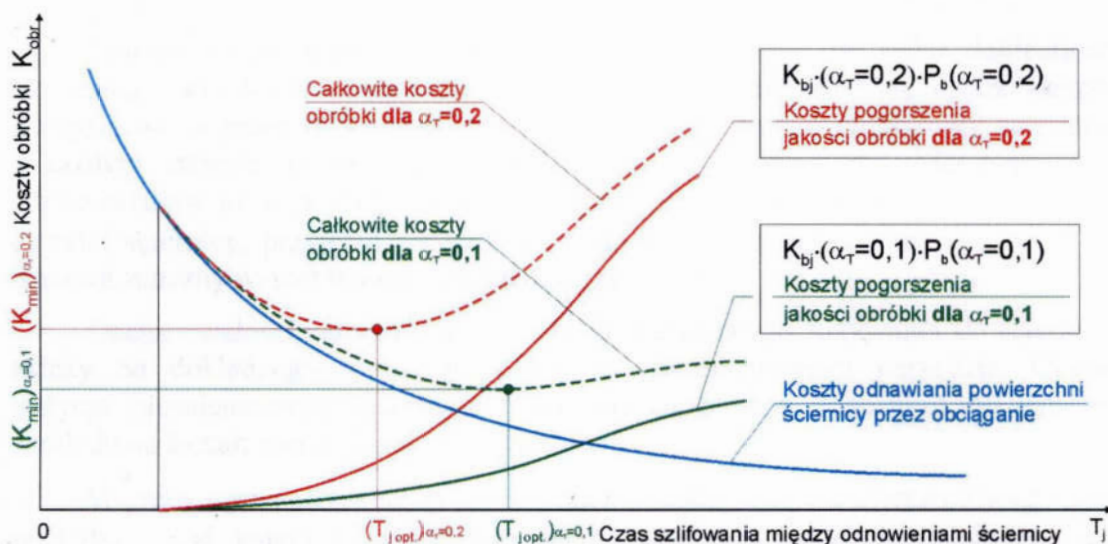


Rys. 8.10. Schemat do analizy zależności kosztów obróbki od czasu procesu szlifowania

Jeżeli iloczyn $\alpha_T \cdot P_b(\alpha_T(T_j))$ jest niewielki, co ma miejsce w operacjach mało wrażliwych na pogorszenie właściwości skrawnych ściernicy, na przykład operacjach szlifowania zgrubnego lub przecinania, to zwiększenie α_T do wartości np. 0,2 lub nawet większych nie powoduje znacznego wzrostu prognozowanych kosztów operacji. W operacjach obróbki precyzyjnej, gdy koszt uszkodzenia przedmiotu obrabianego K_b jest wysoki należy przyjąć mniejsze wartości α_T (rys. 8.11 i 8.12).



Rys. 8.11. Schemat do analizy zależności kosztów obróbki dla różnych składowych kosztów pogorszenia obróbki



Rys. 8.12. Schemat do analizy wpływu prawdopodobieństwa α_T na prognozowane koszty operacji, gdy koszty pogorszenia jakości obróbki (braków) są wysokie

8.7. Wnioski z modelowania trwałości ściernic

Trwałość narzędzi ściernych jest cechą pochodną od trwałości właściwości eksploatacyjnych ściernicy. Jeżeli właściwości eksploatacyjne scharakteryzowane zostaną przez zbiór określonych wielkości wyjściowych lub wskaźników od nich zależnych, to oznacza, że wraz z upływem czasu obróbki następuje ich zmiana, zazwyczaj niekorzystna.

Różnica pomiędzy trwałością właściwości eksploatacyjnych, a trwałością narzędzia, polega na tym, że trwałość narzędzia jest najkrótszym okresem, w którym wybrane wskaźniki (dla określenia trwałości) zachowują dopuszczalne wartości.

Zmiany rozpatrywanych wielkości wyjściowych, lub zależnych od nich wskaźników, charakteryzują się występowaniem zarówno składowej systematycznej jak i losowej. W analizie trwałości narzędzia nie należy posługiwać się jedynie wartością oczekiwaną określonej cechy i na jej podstawie dokonywać oceny trwałości, bowiem oznaczałoby to, że z prawdopodobieństwem zbliżonym do 0,5 okres trwałości w kolejnych realizacjach procesu szlifowania może być krótszy od okresu wyznaczonego jedynie na podstawie wartości oczekiwanej określonej cechy.

W przypadku, kiedy stan narzędzia nie podlegałby nadzorowaniu, oznaczałoby to, że liczne byłyby przypadki dłuższej pracy ściernicy, niż wynikałoby to z jej stanu w danym czasie. Rezygnacja z monitorowania stanu narzędzia zmusza do podjęcia decyzji o poziomie prawdopodobieństwa dopuszczenia przypadku, że w kolejnych realizacjach procesu szlifowania trwałość ściernicy będzie mniejsza od wyznaczonej trwałości. Zwykle prawdopodobieństwo to ustalane jest na poziomie $0,05 \div 0,1$ w zależności od skutków, jakie mogą towarzyszyć takim przypadkom.

Ponieważ o tak określonej trwałości decyduje postać rozkładu w obszarze wartości uznawanych za graniczne (dolne lub górne) w modelowaniu postaci rozkładu szczególną uwagę należy zwrócić na zgodność modelu z rzeczywistym rozkładem w tych właśnie obszarach, a nie w pobliżu wartości oczekiwanej. Wynika z tego, że liczba danych powinna być duża, po to, aby liczba wartości zbliżonych do wartości granicznych umożliwiła dokładne modelowanie postaci rozkładu.

Nadzorowanie stanu narzędzia znacznie poprawia nie tylko dokładność określania trwałości w kolejnych okresach, ale zapewnia znacznie niższe koszty narzędziowe, a przez to i koszty obróbki, bowiem potencjał obróbkowy ściernicy w każdym okresie trwałości jest maksymalnie wykorzystany. Matematycznie odpowiadałoby to, w porównaniu z procesem o uprzedzającej odnowie powierzchni czynnej ściernicy, przyjęciu wskaźnika α_K na poziomie 0,5 zamiast $0,05 \div 0,1$, co oznacza znaczny wzrost trwałości narzędzia (rys. 8.2).

Ocena trwałości narzędzia w warunkach kształtowego zużycia się ściernicy zależy od dokładnego wyznaczenia zużycia promieniowego narzędzia. Ocena zużycia promieniowego natomiast obciążona może być znacznym błędem ze względu na kształt zarysu ściernicy (rys. 8.7).

W pracy wyznaczono zastępczy kierunek pomiaru zużycia promieniowego ΔR_1 pochylony pod kątem $\alpha_{AR} = 45^\circ$ względem tworzącej zarysu nominalnego, dla pomiarów w strefie początkowego zużycia narzędzia (rys. 8.8).

W przypadku, gdy zużycie kształtowe osiąga coraz większe wartości, a strefa zużycia oddala się od płaszczyzny czołowej ściernicy, proponowana metoda pomiaru zużycia polega na pomiarze parametru $\Delta H_{0,5}$, czyli odległości od powierzchni czołowej ściernicy do punktu, w którym względny współczynnik zużycia promieniowego $\Delta R/g$ osiągnie połowę wartości maksymalnej (rys. 8.8).

Wśród kilku zazwyczaj cech lub wskaźników wykorzystywanych równocześnie do wyznaczenia okresu trwałości jeden, zależny od warunków obróbki, ma charakter decydujący. Jeżeli sytuacja taka jest stabilna, to znaczy, że przyjęty wskaźnik decyduje zawsze lub prawie zawsze o okresie trwałości, to postępowanie badawcze lub nadzorowanie stanu narzędzia może zostać ograniczone do tego wskaźnika.

Jeżeli iloczyn prawdopodobieństwa, że okres trwałości ściernicy będzie mniejszy od przyjętego okresu trwałości oraz prawdopodobieństwa, że sytuacja ta spowoduje występowanie wad w procesie szlifowania (czyli $\alpha_T \cdot P_b$) jest niewielki, co ma miejsce w operacjach mało wrażliwych na pogorszenie właściwości skrawnych ściernicy, to zwiększenie α_T do wartości np. 0,2 lub nawet większych nie powoduje znacznego wzrostu prognozowanych kosztów operacji. W operacjach obróbki precyzyjnej, gdy koszt uszkodzenia przedmiotu obrabianego K_b jest wysoki, należy przyjąć mniejsze wartości α_T (rys. 8.11 i 8.12).

ROZDZIAŁ 9

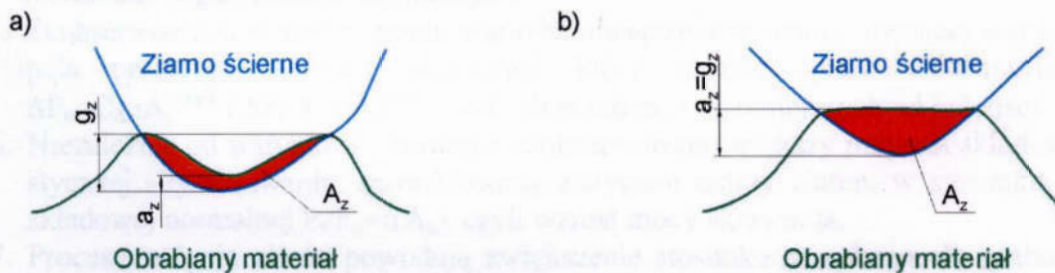
WNIOSKI

9.1. Wnioski poznawcze

Analiza zużycia narzędzi ściernych, z zastosowaniem opisu wykorzystującego probabilistyczny charakter zjawisk zachodzących w strefie szlifowania pozwala na wyjaśnienie zależności pomiędzy tymi zjawiskami i możliwości minimalizacji czynników wpływających niekorzystnie na efekty obróbki ścierniej.

9.1.1. Wnioski dotyczące obciążenia i zużycia ziaren ściernych

1. Tworzenie rys, polegające na pogłębianiu wcześniejszych wgłębień (śladów skrawania) następuje z większymi oporami skrawania niż w przypadku tworzenia rys, polegającym na usuwaniu wierzchołków nierówności. W pierwszym przypadku warstwa skrawana ma postać długiej wygiętej wstęgi, a drugim przypadku zbliżona jest do kształtu trójkąta (rys. 9.1).

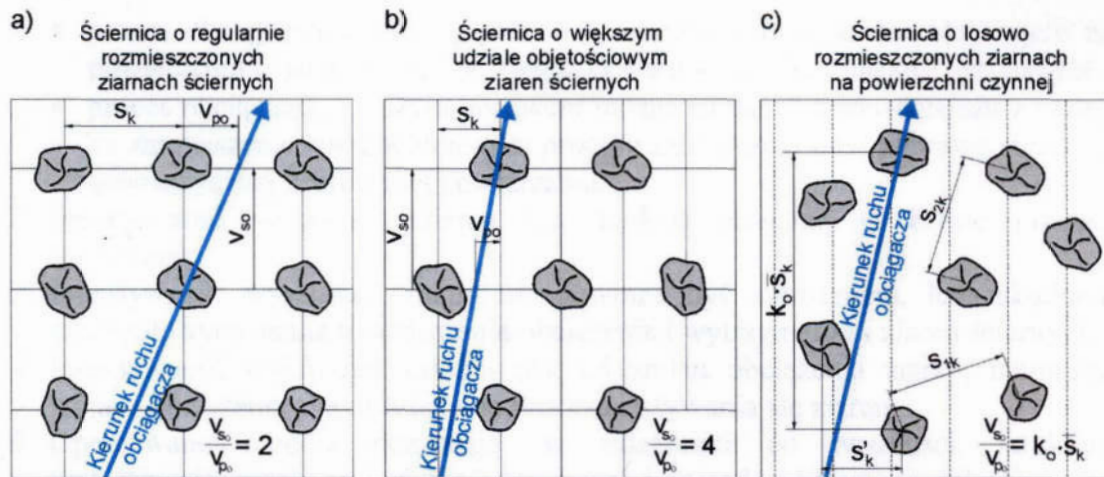


Rys. 9.1. Kształt warstwy skrawanej w przypadku: a) pogłębiania wcześniejszych śladów skrawania, b) tworzenia rys, polegającym na usuwaniu wierzchołków nierówności

Z wniosku pierwszego wynikają wnioski dotyczące parametrów obciążania ściernic, pozwalające na zapewnienie większej częstotliwości występowania sytuacji przedstawionej na rysunku 9.1b niż 9.1a.

Jeżeli odległość między sąsiednimi ziarnami w kierunku obwodowym wynosi s_k (rys. 9.2), to stosunek prędkości obwodowej ściernicy v_{so} podczas obciążania do prędkości posuwu v_{po} obciążacza jednoziarnistego wzdłuż tworzącej ściernicy powinien wynosić 2 dla przypadku przedstawionego na rysunku 9.2a oraz 4 dla przypadku 9.2b, a dla typowej ściernicy (rys. 9.2c) powinien wynosić $k_o \cdot \bar{s}_k$. Wówczas usunięciu ulegną sąsiadujące ziarna wzdłuż kierunku obwodowego. Efekt taki można uzyskać również dla mniejszej prędkości posuwu obciążacza v_{po} pod warunkiem, że wprowadzi się ruch drgający w kierunku promieniowym ściernicy, o częstotliwości zależnej od prędkości obwodowej.

Wytworzenie regularnej nieciągłości powierzchni czynnej ściernicy, o małej podziałce w przybliżeniu $k_o \cdot \bar{s}_k$ odległości między ziarnami może również przyczynić się do zmniejszenia energochłonności procesu szlifowania.



Rys. 9.2. Schemat do analizy modyfikacji parametrów obciążania ściernicy

2. Wyłytki boczne mają postać wiórów z wyraźną nieciągłością i nieregularnością.
3. Obciążenie ziarna można opisać zależnościami $F_n = C_n \cdot A_z^{n_n}$ i $F_t = C_t \cdot A_z^{n_t}$. Stwierdzono, że możliwe jest uzależnienie stałych C_n i C_t od warunków procesu skrawania, kształtu i pola przekroju oraz grubości warstwy skrawanej, a także parametrów opisujących geometrię ostrza ziarna. Stałe C_n i C_t mają wówczas interpretację fizyczną odpowiadającą oporom skrawania.
4. Rozrzuty wartości składowych normalnej i stycznej siły skrawania można opisać rozkładem logarytmiczno normalnym.
5. Zaobserwowano wzrost rozrzutu wartości obciążenia w funkcji rosnącej wartości pola przekroju warstwy skrawanej, który można opisać zależnościami $\Delta F_n = C_{\Delta n} \cdot A_z^{m_n/2}$ i $\Delta F_t = C_{\Delta t} \cdot A_z^{m_t/2}$ o wykładnikach m_n i m_t mniejszych od jedności.
6. Niezależnie od warunków skrawania zaobserwowano większy przyrost składowej stycznej siły skrawania, spowodowany zużyciem ostrzy ziaren, w stosunku do składowej normalnej $F_t/F_n = f(A_z)$, czyli wzrost mocy skrawania.
7. Procesy zużycia ziaren powodują zwiększenie stosunku szerokości do grubości warstwy skrawanej b_z/a_z .
8. Procesy mikrowykruszeń powodują, że w przypadku małych zagłębień, ostrze ziarna usuwa więcej niż jedną warstwę swoimi wierzchołkami, tworząc kilka równoległych rys, co jest przyczyną powiększania oporu skrawania.

9.1.2. Wnioski dotyczące symulacji zużycia ściernicy

Analiza wyników procesu symulacji procesu zużycia narzędzi ściernych pozwoliła na wyprowadzenie wniosków:

1. W symulacji procesu zużycia bardzo ważny jest dobór postaci i parametrów rozkładów obciążenia i wytrzymałości ziarna. Od ich wartości zależy intensywność wykruszeń w czasie symulacji procesu szlifowania.

Na rozkład obciążenia ziaren można wpływać następująco:

- zwiększenie prędkości obwodowej ściernicy zmniejsza wartość oczekiwaną siły w wyniku zmniejszania przekroju warstwy skrawanej, lecz zwiększa się też szybkość narastania obciążenia ziaren ściernych,
- wzrost prędkości posuwu przedmiotu zwiększa przekrój warstw skrawanych oraz wartość oczekiwaną siły, a także jej rozrzut,
- zwiększenie głębokości szlifowania zwiększa wartość oczekiwaną siły i zmniejsza zróżnicowanie obciążenia poszczególnych ziaren ściernych,

- proces obciążania, z dużą głębokością zmniejsza ilość ziaren aktywnych na powierzchni czynnej ściernicy, zwiększa wartość oczekiwaną siły i jej rozrzut,
 - proces obciążania, z dużym posuwem można uznać za korzystniejszy z uwagi na zmniejszenie energochłonności procesu szlifowania oraz poprawę struktury geometrycznej szlifowanej powierzchni.
2. Intensywność wykruszeń ziaren jest funkcją zmienną w czasie procesu szlifowania.
 3. Intensywność wykruszeń ziaren nie powinna być założeniem, lecz skutkiem szczegółowych analiz modelowania obciążenia i wytrzymałości ziaren ściernych.
 4. Intensywność wykruszeń zależna jest od zmian obciążenia ziaren, natomiast zmiana obciążenia ziaren zależy od procesu zużywania się ziaren.
 5. Opracowane modele pozwalają, w zależności od twardości, struktury i właściwości ziaren, tak dobrać parametry i metodę obciążania ściernicy aby wpływać na rozkład obciążenia i wytrzymałości ziaren, a także określić czas, po którym powinno nastąpić odnowienie powierzchni czynnej ściernicy.

9.1.3. Wnioski dotyczące oceny trwałości ściernicy

Analiza wyników modelowania i oceny trwałości narzędzi ściernych pozwoliła na wyprowadzenie wniosków:

1. Trwałość narzędzi ściernych jest cechą pochodną od trwałości właściwości eksploatacyjnych ściernicy, które z upływem czasu obróbki zmieniają swoją wartość na mniej korzystne. Trwałość narzędzia jest najkrótszym okresem, w którym wybrane wskaźniki oceny procesu lub jego wyników nie przekraczają dopuszczalnych granic.
2. Rozpatrywane wielkości wyjściowe lub zależne od nich wskaźniki charakteryzują się występowaniem składowych: systematycznej i losowej. Analiza trwałości narzędzia nie może ograniczać się jedynie do oceny wartości oczekiwanej określonej cechy, bowiem oznaczałoby to, że z prawdopodobieństwem zbliżonym do połowy okres trwałości w kolejnych realizacjach procesu szlifowania byłby krótszy niż przyjęty na podstawie ocen deterministycznych. O trwałości decyduje też postać rozkładu w obszarze wartości uznawanych za graniczne.
3. W modelowaniu postaci rozkładu szczególną uwagę należy zwrócić na zgodność modelu z rzeczywistym rozkładem w obszarach granicznych. Liczba danych do wyznaczenia zgodności modelu z rzeczywistym procesem powinna być na tyle duża, aby liczba wartości zbliżonych do wartości granicznych umożliwiała dokładne modelowanie postaci rozkładu.
4. Nadzorowanie stanu narzędzia znacznie poprawia nie tylko dokładność określania trwałości w kolejnych okresach, ale zapewnia znacznie niższe koszty narzędziowe, a przez to i koszty obróbki, dzięki maksymalnemu wykorzystaniu potencjału obróbkowego ściernicy w każdym okresie trwałości.
5. Analiza procesu zużycia kształtowego ściernicy pozwoliła na opracowanie metodyki zastępczego pomiaru zużycia promieniowego ΔR_1 , w kierunku pochylonym pod kątem $\alpha_{AR} = 45^\circ$ względem tworzącej zarysu nominalnego, dla pomiarów w strefie zużycia początkowego narzędzia oraz pomiar parametru $\Delta H_{0,5}$ dla znacznego zużycia promieniowego ściernicy, czyli odległości od powierzchni czołowej ściernicy do punktu, w którym względny współczynnik zużycia promieniowego osiąga połowę głębokości szlifowania wartości maksymalnej.

6. W sytuacji, w której wśród kilku cech lub wskaźników wykorzystywanych równocześnie do wyznaczenia okresu trwałości, jeden ma charakter decydujący o okresie trwałości, to postępowanie badawcze lub nadzorowanie stanu narzędzia może zostać ograniczone do tego wskaźnika.
7. W operacjach mało wrażliwych na pogorszenie właściwości skrawnych ściernicy, zwiększenie α_T do wartości np. 0,2 lub nawet większych nie powoduje znacznego wzrostu prognozowanych kosztów. W operacjach obróbki precyzyjnej, gdy koszt uszkodzenia przedmiotu obrabianego K_b jest wysoki należy przyjąć mniejsze wartości prawdopodobieństwa α_T , że okres trwałości będzie mniejszy od przyjętego.

9.2. Wnioski dotyczące wykorzystania wyników pracy

Analiza teoretyczna zagadnień zużycia narzędzi ściernych oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów pozwalają wnioskować, że probabilistyczny opis procesu zużywania się ściernicy jest wiarygodnym narzędziem, pozwalającym prognozować trwałość i żywotność ściernic.

Opracowanie może być wykorzystane w procesie projektowania i testowania nowych rozwiązań technologicznych produkcji narzędzi ściernych, dając możliwości weryfikacji na etapie wprowadzania nowych koncepcji bez konieczności ponoszenia kosztów badań rzeczywistych narzędzi.

9.3. Kierunki dalszych badań

Opracowana metoda modelowania oraz symulacji obciążenia i zużycia ziaren ściernych może być stosowana dla wielu innych analiz i prac badawczych, które mogą być kontynuowane w celu opracowania modeli procesów w znacznie szerszym zakresie cech narzędzi i układów kinematycznych. Ponadto możliwe jest zrealizowanie następujących zadań:

1. Opracowanie modeli dla zużycia nowych materiałów ściernych, szczególnie tych, których zużycie jest zdominowane przez procesy mikrowykruszeń, takich jak ziarna submikrokryształicznego korundu SG lub TG firmy NORTON.
2. Opracowanie nowych modeli opisujących wpływ właściwości obrabianego materiału na obciążenie ziaren ściernych.
3. Uwzględnienie procesów zużycia ziaren i narzędzia w wyniku adhezji i dyfuzji oraz zalepiania się powierzchni czynnej ściernicy.
4. Modyfikacje procedur obliczeniowych dla innych układów kinematycznych.
5. Zastosowania opracowanych modeli w symulacji innych procesów obróbki, np. wygładzania taśmami ściernymi, szczególnie dla testowania nowych materiałów ściernych, takich jak TRIZACT produkowanych przez firmę 3M.

Wdrożenie opracowanych modeli pozwoli na szybką i stosunkowo tanią weryfikację nowych koncepcji technologicznych w zakresie badanych narzędzi ściernych oraz testowania wpływu warunków procesu na ich trwałość.

LITERATURA

- [1] Averkamp Th.: Überwachung und Regelung des abbricht und Schleifprozesse beim Außenrundeinstechschleifen; RWTH Achen 1982
- [2] Bach K., Pai D. M., Ratterman E., Shaw M. C.: Grinding forces and energy; Journal of Engineering for Industry; 1988
- [3] Badger J.A., Torrance A.A.: A comparison of two models to predict grinding forces from wheel surface topography; Int.J.of Mach.Tools a.Manuf.; 40/8/2000
- [4] Bałasz B.: Analiza kształtowania topografii powierzchni przedmiotu i obciążenia ziaren aktywnych w procesie szlifowania; Praca doktorska; Koszalin 2003
- [5] Barylski A., Konke K.: Analiza kształtu i wymiarów mikroziaren ściernych z wykorzystaniem programu Multiscan; XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Gdańsk 1999
- [6] Bajkalov A.K.: Vvedenie v teoriju slifovanija materialov; Naukova Dumka; Kiev 1978
- [7] Bill Bernard: Measuring with Crystals; Principles and applications of the piezoelectric measuring technique; VERLAG MODERNE INDUSTRIE 2002
- [8] Blunt L., Ebdon S.: The Application of Three-dimensional Surface Measurement Techniques to Characterizing Grinding Wheel Topography; Int.J.of Mach.Tools a.Manuf.; 36/11/1996
- [9] Bock R.: Schleifkraftmodell für Außenrund-und Innenrundscheifen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren; 54; Vulkan Verlag; Essen 1987
- [10] Bokuczawa G. W., Gorszkow B. T., Słowiński B.: Kierunki zwiększenia efektywności szlifowania z dużymi głębokościami; VIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Koszalin 1985
- [11] Borkowski J., Kalisz M.: Ocena temperatury i jednostkowych sił skrawania w warunkach wysokopiędkościowej obróbki ścierniej; Postępy w technice wytwarzania; Kołobrzeg 1978
- [12] Borkowski J.: Analiza oporów skrawania ziarnami ściernymi; Prace Instytutu Budowy Maszyn; Wyższa Szkoła Inżynierska; Koszalin 1978
- [13] Borkowski J.: Naprężenia skrawania a jednostkowe zużycie energii w obróbce ścierniej; Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej; Koszalin 1978
- [14] Borkowski J.: Elementarne zjawiska zużycia ziarn i narzędzi ściernych; Monografia nr 16; Wyższa Szkoła Inżynierska; Koszalin 1983
- [15] Borkowski J.: Zużycie i trwałość ściernic; PWN; Warszawa 1990
- [16] Borkowski J., Szymański A.: Uses of Abrasives and Abrasives Tools; Ellis Horwood Limited; 1992
- [17] Borkowski J., Borkowski P., Prażmo J.: Fizykalne aspekty wytrzymałościowego zużycia ziaren ściernych; Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Nr 30; Tom 1; Politechnika Koszalińska 2002
- [18] Bosuray P.K., Sahay B., Lal G.K.: A Simple Model for Evaluating Surface Roughness in Fine Grinding; International Journal of Tool Desing and Research; Vol. 20; 1980
- [19] Brinksmeier E., Werner F.: Monitoring of Grinding Wheel Wear; Annals of the CIRP vol. 41/1/1992
- [20] Brown R.H., Saito K., Shaw M.C.: Local Elastic Deflections in Grinding; Annals of the CIRP vol. 19/1/1971
- [21] Brown H., Wager J., Watson J.: An Examination of Wheel-Work Interface using an Explosive Device to suddenly Interrupt the Surface Grinding Process; Annals of the CIRP vol. 26/1/1977
- [22] Brückner K.: Der Schleifvorgang und seine Bewertung durch die auftretenden Schnittkräfte; RWTH Achen 1962

- [23] Budniak Z., Markul J.: Wybrane zagadnienia podstaw budowy i zastosowania specjalnych narzędzi ściernicy; XV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Rzeszów 1992
- [24] Budniak Z., Markul J.: Matematyczny model skrawania specjalnym narzędziem ściernym; XVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Koszalin 1993
- [25] Budniak Z., Markul J.: Skrawanie swobodne orientowanym monokrystalicznym ziarnem ściernym; XVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Koszalin 1993
- [26] Budniak Z.: Matematyczny model skrawania specjalnymi narzędziami ściernymi dla wybranych sposobów i odmian obróbkowych; XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Gdańsk-Jurata 1999
- [27] Challen J.M., Oxley P.: An Explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models; *Wear* 53 / 1978; s. 229–243
- [28] Chen X., Rowe W.B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part I; Generation of the grinding wheel surface; *Int. J. of Mach. Tools a. Manuf.*; 1996; t.36; nr 8
- [29] Chen X., Rowe W.B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part II; Mechanics of grinding. *Int. J. of Mach. Tools a. Manuf.*; 1996; t. 36; nr 8
- [30] Chen X., Rowe W.B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part III; Comparison with experiment. *Int. J. of Mach. Tools a. Manuf.*; 1996; t. 36; nr 8
- [31] Chen X., Rowe W.B.: Analysis and simulation of grinding process, part IV; Effects of wheel wear. *Int. J. of Mach. Tools a. Manuf.*; 1998; t. 38; nr 1/2
- [32] Chiu N., Malkin S.: Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding. *Annals of the CIRP* vol. 42/1/1993
- [33] Decneut A.: Verantwoorde keuze van de slijpvoorwaarden; Katholieke Universiteit te Leuven 1974
- [34] Dębowski R.: Analiza komputerowa obrazu mikroskopowego w zastosowaniu do oceny zużycia czynnej powierzchni ściernicy; XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Rzeszów 2000
- [35] Dietrich M.: Wstęp do stochastycznej teorii maszyn; PWN; Warszawa 1972
- [36] Dong W.P., Sullivan P.J., Stout K.J.: Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three-Dimensional Surface Topography II: Statistical properties Of Parameter Variation; *Wear* 167 / 1993
- [37] Ernst W.: Erhöhte Schnittgeschwindigkeiten beim Außenrund-einsteichschleifen und ihr Einfluss auf das Schleifergebnis und Wirtschaftlichkeit; RWTH Aachen 1965
- [38] Filipowski R., Marciniak M.: Techniki obróbki mechanicznej i erozyjnej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000
- [39] Gołąbczak A.; Metody kształtowania właściwości użytkowych ściernic; Politechnika Łódzka Monografie; Łódź 2004
- [40] Gu D.Y., Wager J.G.: New evidence on the contact zone in grinding – contact length, sliding and cutting regions; *Annals of the CIRP* vol. 37/1/1988
- [41] Gu Y.D., Wager J.G.: Father Evidence on the Contact Zone in Surface Grinding; *Annals of the CIRP* vol. 39/1/1990
- [42] Hamrol A., Konieczny R., Weiss Z.: Wpływ warunków obciążania ściernicy CBN na jakość powierzchni obrabianej; XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Gdańsk 1991
- [43] Harasymowicz J., Rak Z.: Analiza mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym stopu tytanu; VI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Rzeszów 1983
- [44] Herman D.: Podstawy wytwarzania i zastosowań nowych spoiw ceramicznych w narzędziach ściernych z tlenku glinu; Monografie; Politechnika Koszalińska; 2003
- [45] Hou Z.B., Komanduri R.: On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process; *Int. J. of Mach. Tools a. Manuf.* 43; 2003

- [46] Inasaki I.: Grinding Process Simulation Based on the Wheel Topography Measurement; Annals of the CIRP vol. 45/1/1996
- [47] Kacalak W. i inni: Inteligentny system minimalizacji niedokładności i kompensacji zakłóceń w procesach precyzyjnego szlifowania; Sprawozdanie szczegółowe z Projektu Badawczego KBN Nr 7T07D 018 15; 2001
- [48] Kacalak W., Kapłonek St., Słowiński B.: Problemy wyboru kryteriów oceny własności eksploatacyjnych ściernic; Postępy w nauce wytwarzania; Narzędzia i technologia obróbki ścierniej; Kołobrzeg 1978
- [49] Kacalak W., Lewkowicz R., Słowiński B.: Energetyczny model czołowego szlifowania płaszczyszyn; Postępy w technice wytwarzania. Konferencja Naukowo-Techniczna; Kołobrzeg 1978
- [50] Kacalak W., Pluta Z.: Topografia śladów skrawania pojedynczymi ziarnami ściernymi zamocowanymi podatnie; Postępy w technice wytwarzania; Narzędzia i technologie obróbki ścierniej; Kołobrzeg 1978
- [51] Kacalak W., Kapłonek St.: Wybrane aspekty nieciągłości procesu powstawania wióra podczas skrawania ściernego; V Międzynarodowa Konferencja; Postępy w teorii i technice obróbki materiałów; Obróbka ścierna, materiały i narzędzia ściernie; Kraków 1979
- [52] Kacalak W., Kapłonek St.: Analiza wpływu zużycia ściernego i intensywności wykruszeń ziaren aktywnych na przebieg procesu szlifowania; Prace Instytutu Budowy Maszyn WSIInż.; Koszalin 1980
- [53] Kacalak W., Karpiński T.: Probabilistyczne ujęcie procesu zużycia narzędzi ściernych, Prace Instytutu Budowy Maszyn WSIInż.; Koszalin 1980
- [54] Kacalak W., Lewkowicz R.: Energetyczny model procesu szlifowania; Prace Instytutu Budowy Maszyn WSIInż.; Koszalin 1980
- [55] Kacalak W., Woźniak K.: Wpływ kształtu ziarna ściernego na przebieg i wyniki szlifowania; Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń; 1980
- [56] Kacalak W., Poletajew B.: Charakterystyka nowej metody kształtowania regularnej makrogeometrii szlifowanej powierzchni w postaci równomiernie rozmieszczonych wgłębień; VI Naukowa Szkoła Obróbki Ścierniej Rzeszów; 1983
- [57] Kacalak W.: Własności eksploatacyjne narzędzi ściernych i problemy ich oceny; VIII Naukowa Szkoła Obróbki Ścierniej; Koszalin 1985
- [58] Kacalak W., Pluta Z., Stępień P.: Nowe metody i narzędzia do kształtowania regularnej makrogeometrii na powierzchniach utwardzonych; X Naukowa Szkoła Obróbki Ścierniej; Wrocław 1987
- [59] Kacalak W., Lewkowicz R., Bałasz B., Zawadka W.: Optimierung der Schleifprozesse schwer zerspanbarer Werkstoffe bei niedrigen Temperaturen und im Vakuum; VDI Berichte 1276, BEARBEITUNG NEUER WERKSTOFFE – 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS; VDI Verlag; Düsseldorf 1996
- [60] Kacalak W., Lewkowicz R., Dziura Z.: Methoden und Probleme bei der Präzisionsbearbeitung kleiner Keramikformstücke. VDI Berichte 1276, BEARBEITUNG NEUER WERKSTOFFE – 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS; VDI Verlag; Düsseldorf 1996
- [61] Kacalak W., Kasprzyk M.: Opory przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania; XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ścierniej; Gdańsk 1999
- [62] Kacalak W., Lewkowicz R., Krzyżyński T.: Random Components Auto_Correlation and its Influence on Estimation of Grinding Process Models; Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik e.V conferene GAMM 1999; Metz 1999
- [63] Kacalak W., Lewkowicz R., Krzyżyński T.: Specific Energy Minimization in Processes of Abrasive Machining; Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik e.V conferene GAMM 1999; Metz 1999

- [64] Kacalak W., Lewkowicz R., Krzyżyński T., Bałasz B.: Random components auto correlation and its influence on estimation of grinding process models; *Z. Angew. Math. Mech.* 80; (Supplement 3), 2000
- [65] Kacalak W., Kasprzyk M.: Wybrane problemy modelowania stochastycznych procesów zużycia i trwałości ściernic; XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Rzeszów – Myczkowce 2000
- [66] Kacalak W., Krzyżynski T., Kukielka L., Kasprzyk M.: Material Movement Resistances in the Zone of Micro-Machining with Abrasive Grain Tool-Points; *Modern Techniques and Technologies; Scientific Book of the Department of Mechanical Engineering, No 29, Koszalin 2001*
- [67] Kacalak W., Kasprzyk M., Krzyżyński T.: On Modelling of Stochastic Processes of Abrasive Wear and Durability of Grinding Wheel; *Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik e.V conferene GAMM 2002; Augsburg 2002*
- [68] Kacalak W., Kasprzyk M., Gutnik M., Traczyk R.: Opory przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania; XXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; 2002
- [69] Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej; WNT; Warszawa 1971
- [70] Kakino Y. i in.: In-situ Measurement of Grinding wheel surface topography (1st report); Development of measuring system using laser stylus; *Int.J.of Japan Soc.Prec.Eng.*; 31/4/1997
- [71] Kakino Y. i in.: In-situ measurement of grinding wheel surface topography (2nd report); Cutting edges under various dressing conditions; *Int.J.of Japan Soc.Prec.Eng.*; 33/2/1999
- [72] Karpiński T., Kacalak W.: Siły w procesie szlifowania powierzchni śrubowych i ich wpływ na trwałość ściernicy; *Materiały Konferencji Naukowo – Technicznej; Technologia obróbki ścierniej ZG SIMP; Rzeszów 1974*
- [73] Karpiński T., Kacalak W., Plichta J., Stępień P.: Charakterystyka roboczej powierzchni ściernicy; *Zeszyty Naukowe WSIInż w Koszalinie; Prace Instytutu Budowy Maszyn nr 2; Koszalin 1978*
- [74] Karpiński T., Kacalak W., Słowiński B.: Rozkład mocy względnej w strefie szlifowania; *Zeszyty naukowe Nr 2; Wyższej Szkoły Inżynierskiej; Koszalin 1978*
- [75] Karpiński T., Kacalak W.: Model matematyczny trwałości ściernicy, *Obróbka Ścierna; III Konferencja Naukowo-Techniczna; Narzędzia; Łódź 1976*
- [76] Karpiński T., Kacalak W.: Rozkład mocy względnej w strefie szlifowania; *Prace Instytutu Budowy Maszyn WSIInż.; Koszalin 1980*
- [77] Karpiński T., Markul J., Drzycimski M.: Zależności właściwości skrawnych ziaren z regularnego azotku boru (CBN) od ich orientacji. I *Forum Prac Badawczych-„Kształtowanie części maszyn”*. Koszalin 1994
- [78] Karpiński T., Plichta J., Drzycimski M.: Badania porównawcze właściwości skrawnych mikrokrystalicznych ziaren z regularnego azotku boru (CBN) w warunkach skrawania ciągłego; I *Forum Prac Badawczych-„Kształtowanie części maszyn”*. Koszalin 1994
- [79] Karpiński T., Krzos J.: Mikrogeometria ziaren submikrokrystalicznego korundu spiekaneogo; XXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Łopuszna 2001
- [80] Kim N. K., Guo C., Malkon S.: Heat Flux Distribution and Energy Partition in Creep-Feed Grinding; *Annals of the CIRP*; 1997
- [81] Kondratowicz L. Modelowanie symulacyjne systemów; WNT; Warszawa 1978
- [82] König W., Lortz W. : Properties of cutting edges related to chip formation in grinding; *Annals of the CIRP vol. 24/1/1975*
- [83] König W.; Simulation – Techniques in Grinding; *Workshop CIRP T.H.; Aachen 1986*
- [84] König W., Lortz W.: Three dimensional measurement of the grinding wheel surface-evaluation and effect on cutting behaviour; *Annals of the CIRP vol. 25/1/1976*

- [85] König W.: Loading of the Grinding Wheel Phenomenon and Measurement; Annals of the CIRP vol. 27/1/1978
- [86] König W.: Fertigungsverfahren. Band 2; Schleifen, Honen, Läppen; Düsseldorf, VDI-Verlag 1980
- [87] König W., Steffens K.: A numerical method to describe the kinematics of grinding; Annals of the CIRP 31/1/1982
- [88] Koziarski A., Urbaniak M., Domżański M., Panak K.: Zastosowanie mikrokomputera do bezpośredniej analizy roboczej powierzchni ściernicy; IX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Kraków 1986
- [89] Koziarski A., Urbaniak M.: Nowe aspekty badania roboczej powierzchni ściernicy; V Konferencja Naukowo-Techniczna Obróbka Ściera; Narzędzia; Łódź 1986
- [90] Koziarski A.: Robocza powierzchnia ściernicy, stan obecny i perspektywy badań; X Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Wrocław 1987
- [91] Koziarski A.: Czynna powierzchnia ściernicy, tendencje badań; XVIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Wrocław 1995
- [92] Koziarski A.: Czynna powierzchnia ściernicy; Monografie Politechnika Łódzka; 1996
- [93] Krell, Blank P.: Advances In the grinding efficiency of sintered alumina abrasives; J.Am. Ceram. Soc.79; 1996
- [94] Królikowski T., Kacalak W., Bałasz B.: Badania symulacyjne wpływu topografii czynnej powierzchni ściernicy na energię właściwą w procesie szlifowania; XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Rzeszów 2000
- [95] Królikowski T., Bałasz B., Kacalak W.: The Influence of Micro- and Macrotopography of the Active Grinding Surface on the Energy Consumption in the Grinding Process; Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining; Metz France 2001
- [96] Królikowski T., Bałasz B., Kacalak W.: The Basis of Minimization of Specific Energy in the Grinding process; GAMM 2002; Augsburg, Niemcy 2002
- [97] Królikowski T.: Analiza wpływu mikro- i makrotopografii powierzchni czynnej ściernicy na cechy energetyczne procesów szlifowania; Praca doktorska; Koszalin 2004
- [98] Kruszyński B.: Model of Gear-Grinding Process; Annals of the CIRP vol. 44/1/1995
- [99] Kruszyński B., Midera S., Lorenz A., Jamiński J.: Wpływ warunków obróbki na siły skrawania podczas obwodniowo-podziałowego szlifowania kół zębatych; XIX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Łódź 1996
- [100] Kruszyński B., Lorenz A., Midera S.: Badanie sił skrawania podczas obwodniowo – podziałowego szlifowania kół zębatych; Arch. Technol. Masz. i Autom.; 1997; t. 17; nr 2
- [101] Kruszyński B.: Surface Integrity In Grinding; Technical University of Łódź A series of monographs; Łódź 2001
- [102] Krzyżynski T., Kacalak W., Kasprzyk M.: Selected Problems of Stochastic Processes Modelling of Abrasive Wear and Durability of Grinding Wheel; Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining – METZ 2001
- [103] Kumar K., Shaw M.: A new method of characterizing grinding wheels; Annals of the CIRP vol. 28/1/1979
- [104] Kumar K.V., Cozminca M., Tanaka Y., Shaw M.C.: A New Method of Studying the Performance of Grinding Wheel; ASME Journal of Engineering for Industry; Paper No. 79-WA/PROD-11; 1980
- [105] Kumar K.V., Shaw M. C.: The Role of Wheel-Work Deflection in Grinding Operations. ASME Journal of Engineering for Industry; Paper No. 80-WA/PROD-11; 1981
- [106] Kwapisz L., Rafałowicz J.: Szlifierki; Obrabiarki Ścierne; Wydawnictwa Naukowo – Techniczne; Warszawa 1991

- [107] Lindsay R.P.: On the metal removal and wheel removal parameters surface finish, geometry and thermal damage in precision grinding; Thesis Worcester Polytechnic Institute; 1971
- [108] Linsay R., Hahn R. S.: On the Surface Finish-Metal Removal Relationship in Precision Grinding. *Annals of the CIRP*, vol. 22/1/1973
- [109] Lipiński D.; Nadzorowanie jakości w procesach zautomatyzowanego szlifowania małych elementów ceramicznych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji; Praca doktorska; Koszalin 2005
- [110] Lortz W.: Model of the cutting mechanism in grinding; *Wear*; nr 53/1979
- [111] Malkin S., Lenz E.: Negative rake cutting to simulate chip formation in grinding; *Annals of the CIRP* vol. 28/1/1979
- [112] Malkin S., *Grinding Technology; Theory and Applications Machining with Abrasives*; Ellis Horwood Limited; 1989
- [113] Małolepszy A., Urbaniak M.: Model właściwości użytkowych czynnej powierzchni ściernicy; XXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Łopuszna 2001
- [114] Małolepszy A., Urbaniak M.: Neuronowy model czynnej powierzchni ściernicy; XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Rzeszów 2000
- [115] Marciniak M., Dąbrowski L., Zawora J.: Doświadczalna ocena intensywności zalepiania metalem czynnej powierzchni ściernicy; XXI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Warszawa 1998
- [116] Marciniak M.: Proces szlifowania w ujęciu fenomenologicznym; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; Warszawa 1999
- [117] Marciniak M., Dąbrowski L.: Badania teoretyczne i doświadczalne czynnej powierzchni ściernicy (CPS); XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Rzeszów-Myczkowce 2000
- [118] Marciniak M., Pacanowski K., Zawora J., Hoang Van Lang; Rola struktury ściernic w procesie szlifowania na sucho; XVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Koszalin 1993
- [119] Markul J.: Orientacja ziarna ściernego o określonej budowie geometrycznej jako czynnik kształtujący wybrane wielkości procesu skrawania; Praca doktorska; Gdańsk 1988
- [120] Markul J., Karpiński T.: Efektywność skrawania ziaren ściernych z materiałów supertwardych; XXI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Warszawa 1998
- [121] Maslow E. N.: *Teorija slifowanija materialov*; Moskwa; Masinostroenie; 1974
- [122] Matsuo T., Toyoura S., Oshima E., Ohbuchi Y.: Effect of grain shape on cutting force in superabrasive single-grit tests; *Annals of the CIRP* vol. 38/1/1989
- [123] Meldner B., Kruszyński B.: Wybrane problemy modelowania procesu szlifowania i ich adaptacja przy kształtowaniu kół zębatych; XII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Poznań 1989
- [124] Merchant M.E.: *Mechanics of the Metal Cutting Process*; I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip. *Journal of Applied Physics*; vol 16/5/1945
- [125] Merchant M.E.: *Mechanics of the Metal Cutting Process*; II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting. *Journal of Applied Physics*; vol 16/6/1945
- [126] Nassirpour F., Wu S.: Characterization and Analysis of Grinding Wheel Topography as a Stochastic Isotropic Surface; *Journal of Engineering for Industry* 101/5/1979
- [127] Netterscheid, Tch.: *Rechnerunterstützte extreme Schnittwertoptimierung beim Außenrundeinstechschleifen*; RWTH Aachen 1984
- [128] Niżankowski Cz.: Submikrokryształiczny korund spiekany – stan obecny o tendencje rozwojowe; XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Gdańsk 1999
- [129] Oczóś K.: Analiza procesu i metody pomiaru zużycia pojedynczych ziarn ściernych i ściernic; Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej; Rzeszów 1975
- [130] Oczóś K., Porzycki J.: *Szlifowanie; Podstawy i technika*; WNT; Warszawa 1986

- [131] Oczóś K.E., Dul-Korzyńska B.: Szlifowanie głębokie ceramiki technicznej; XV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Rzeszów 1992
- [132] Oczóś K., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych; Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2003
- [133] Ohbuchi Y., Matsuo T.: Force and Chip Formation in Single-Grit Orthogonal Cutting with Shaped CBN and Diamond Grains; Annals of the CIRP vol. 40/1/1991
- [134] Ono K.: Analysis of the grinding force; Bulletin of the Japan Society of Grinding Engineers; 1961
- [135] Ostrowskij W.J., Sawiczak W.G.: Analiz deformacji metala pri slifovani detalej priborov; Rezanije i Instrument nr 24; Charkov 1980
- [136] Pande S., Lal G.: Effect of Dressing on Grinding Wheel Performance; International Journal of Tool Desing and Research; vol. 19; 1979
- [137] Pandit S.M., Sathyanarayanan G.: A Model for Surface Grinding Based on Abrasive Geometry and Elasticity; ASME Journal of Engineering for Industry; vol. 104/1982
- [138] Perkowski P.: Technika symulacji cyfrowej; WNT; Warszawa 1980
- [139] Plichta J.: Próba oceny praktycznej przydatności parametrów stosowanych w badaniach topografii roboczej powierzchni ściernicy; Narzędzia skrawające i ściernice NASS'85; Lubniewice 1985
- [140] Plichta J.: Badania zużycia krawędziowego roboczej powierzchni ściernicy; Zeszyty Naukowe WSInż w Koszalinie nr 11; Koszalin 1987
- [141] Plichta J.: Badania zużycia obwodowego roboczej powierzchni ściernicy; Zeszyty Naukowe WSInż w Koszalinie nr 11; Koszalin 1987
- [142] Plichta J.: Próba kompleksowej oceny zmian stanu roboczej powierzchni ściernicy podczas szlifowania; Narzędzia skrawające i ściernice NASS'88
- [143] Plichta J.: Wpływ zmian stanu roboczej powierzchni ściernicy podczas jej pracy na wielkości siły w strefie szlifowania; Narzędzia skrawające i ściernice NASS'88
- [144] Plichta J.: Wpływ zużycia ściernicy na niestacjonarność topografii jej powierzchni; XI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Łódź 1988
- [145] Plichta J.: Modyfikacja kinematyki procesu obciążania ściernicy w celu zwiększenia efektywności kształtowania jej właściwości skrawnych; XII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Poznań 1989
- [146] Plichta J., Plichta S.: Metody kształtowania mikronieciągłości na czynnej powierzchni ściernic. XV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów 1992
- [147] Plichta J., Plichta S.: Wpływ mikronieciągłości czynnej powierzchni ściernicy na ich właściwości eksploatacyjne. XV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów 1992
- [148] Plichta J.: Mechanizm zużycia ściernic z mikrokrystalicznym ziarnem z regularnego azotku boru (CBN) ze spoiwem ceramicznym; I Forum Prac Badawczych–„Kształtowanie części maszyn”; Koszalin 1994
- [149] Plichta J.: Wybrane zagadnienia oceny topografii roboczej powierzchni ściernicy pracującej obwodem; Praca doktorska; Politechnika Wrocławska; Wrocław 1980
- [150] Pluta Z. Skrawanie pojedynczym ostrzem utwardzonym podatnie jako metoda oceny własności skrawnych ziarn ściernych i skrawalności materiału obrabianego; XII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Poznań 1989
- [151] Pluta Z.: Wybrane zagadnienia procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym utwardzonym podatnie; Praca doktorska; Politechnika Wrocławska; Wrocław 1987
- [152] Pluta Z.: Szczególne modele skrawania jednoostrzowego ziarnem ściernym utwardzonym podatnie; XV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Rzeszów 1992

- [153] Rahman J.F., Radhakrishnan V.: Measurement of Grinding Wheel Surface Topography Using Electro-Pneumatic Turbulence Amplifier System; Int. Jour. of Machine Tool Design and Research; 20/3/1980
- [154] Reichenbach G. S., Mayer I.E., Kalpakcioglu S., Shaw M.C.: The role of chip thickness in grinding; ASME Journal of Engineering for Industry 18; 1956
- [155] Rolka L.: Metody sztucznej inteligencji w ocenie zużycia ściernic; Praca doktorska; Politechnika Rzeszowska; Rzeszów 1998
- [156] Rowe W.B., Morgan M.N.: The Effect of Deformation on the Contact Area in Grinding; Annals of the CIRP vol. 42/1/1993
- [157] Saini D.P.: Elastic deflections in grinding; Annals of the CIRP vol. 29/1/1980
- [158] Saini D.P., Wager J.G., Brown R.H.: Practical significance of contact deflections in grinding; Annals of the CIRP vol. 31/1/1982
- [159] Saini D.P., Wager J.G.: Local contact deflections and forces in grinding; Annals of the CIRP vol. 34/1/1985
- [160] Saini D.P.: Wheel hardness and local elastic deflections in grinding; Int.J.Mach.Tools a.Manuf.; 30/4/1990
- [161] Salje E.: Grundlagen des Schleifvorganges; Werkstatt und Betrieb 86; 1953
- [162] Salje E.: Transfer of Grinding Research Data for Different Operations in Grinding. Annals of the CIRP vol. 31/2/1982
- [163] Sauer W., Shaw M.C.: The Mechanism in Fine Grinding; Annals of the CIRP vol. 21/1/1972
- [164] Shaw M.C.: Interpretation of grinding data; Carnegie-Mellon University; 1971
- [165] Shaw M.: Principles of Abrasive Processing; Oxford University Press; Oxford 1996
- [166] Shaw M. C., Komanduri R.: The Role of Stylus Curvature in Grinding Wheel Surface Characterization; Annals of CIRP; Vol. 25/1/1997
- [167] Skalmierski B., Tylikowski A.: Procesy stochastyczne w dynamicie; Małe Monografie PWN; Technika; Warszawa 1972
- [168] Snoeys R., Peters J., Decneut A.: The Significance of Chip Thickness in Grinding; Annals of CIRP vol 23; nr 2; 1974
- [169] Spur G., Özhan F.: Feinbearbeitung weichmagnetischer Werkstoffe. Tagungsband zum 4; Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium; 1984
- [170] Steffens K., König W.: Closed loop simulation of grinding; Annals of the CIRP 32/1/1983
- [171] Stępień P.: Analiza stanu dynamicznej równowagi ziaren ściernych podczas szlifowania; Zeszyty Naukowe WSInż w Koszalinie nr 11; Koszalin 1987
- [172] Stępień P.: Wybrane zagadnienia procesu kształtowania topografii powierzchni szlifowanej; Praca doktorska; Wrocław 1984
- [173] Stępień P.: Rozmieszczenie wierzchołków ziaren ściernych na roboczej powierzchni ściernicy; Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego nr 11; Koszalin 1989
- [174] Szymański A.: Mineralogiczno – petralogiczna analiza procesu wiązania elektrokorundowej ściernicy ceramicznej; Prace Komisji Ceramiki PAN; Ceramika 15; 1971
- [175] Szymański A.: Mineralogia Techniczna; Wydawnictwa Naukowe PWN 1997
- [176] Tamaki J., Kitagawa T.: Evaluation of surface topography of metal-bonded diamond wheel utilizing three-dimensional profilometry; Int.J.of Mach.Tools a.Manuf.; 35/10/1995
- [177] Tigerstrom L.: A Model for Determination of Number of Active Edges in Various Grinding Processes; Annals of the CIRP vol. 24/1/1975
- [178] Tonshoff H. K., Peters J., Inasaki I., Paul T.: Modelling and Simulation of Grinding Processes; Annals of the CIRP vol 41/2/1992

- [179] Tonshoff H. K., Karpuschewski B., Andrae P., Turich A.: Technical Report; Grinding Report Concerning CIRP Co-Operative Work in STC „G”; Annals of CIRP vol. 47/2/1998
- [180] Torrance A.: An approximate model of abrasive cutting; Wear nr. 118/1987
- [181] Torrance A.: The correlation of process parameters in grinding; Wear nr. 139/1990
- [182] Urbaniak M.: Identyfikacja geometrycznych właściwości czynnej powierzchni ściernicy (cz. 1); XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Gdańsk 1999
- [183] Urbaniak M.: Identyfikacja geometrycznych właściwości czynnej powierzchni ściernicy (cz. 2); XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów-Myczkowce 2000
- [184] Urbaniak M., Dębowski R.: Topografia ściernicy a siły skrawania i chropowatość powierzchni szlifowanej; XXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Łopuszna 2001
- [185] Urbaniak M.: Czynna powierzchnia ściernicy w początkowym okresie szlifowania; XXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Łopuszna 2001
- [186] Verkerk J.: The Real Contact Length in Cylindrical Plunge Grinding; Annals of the CIRP vol. 24/1/1975
- [187] Verkerk J., Peters J.: Final report concerning CIRP Cooperative work on the characterization of grinding wheel topography; Annals of the CIRP vol. 26/2/1977
- [188] Verkerk J.: Characterization of Wheelwear in Plunge Grinding; Annals of the CIRP vol. 25/1/1977
- [189] Verkerk J., Pikelharing A.J.: The Influence of the Dressing Operation on Productivity in Precision Grinding; Annals of the CIRP vol. 28/2/1979
- [190] Vickerstaff T.: The Influence of Wheel Dressing on The Surface Generated in The Grinding Process; International Journal of Tool Design and Research; vol. 16; 1976
- [191] Wager J.G., Saini D.P.: Local contact deflections in grinding; Groups of grains and single grains; Annals of the CIRP vol. 35/1/1986
- [192] Wager J.G., Gu D.Y.: Influence of Up-Grinding and Down-Grinding on the Contact Zone; Annals of the CIRP vol. 40/1/1991
- [193] Warneck G., Zitt U.: Kinematic Simulation for Analyzing and Predicting High-Performance Grinding Process; Annals of the CIRP vol. 47/1/1998
- [194] Weiss Z., Hamrol A., Napierała J.: Obróbka ścierna; Politechnika Poznańska; Poznań 1985
- [195] Weiss Z., Kramer J., Napierała J.: Jakość powierzchni szlifowanych w zależności od warunków obciążania; IX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej; Kraków 1986
- [196] Werner G.: Konzept und technologische Grundlagen zur adaptiven Prozessoptimierung des Außenrundscheifens; RWTH Aachen 1986
- [197] Wieczorkowski R., Zieliński R.: Komputerowe generatory liczb losowych; WNT; Warszawa 1997
- [198] Williams J., Xie Y.: The generation of wear surface by the interaction of parallel grooves; Wear 155/1992
- [199] Woźniak W.: Kształt ziarna ściernego i jego wpływ na własności wyrobów ściernych; Postępy w technice wytwarzania; Narzędzia i technologia obróbki ściernicy; Kołobrzeg 1978
- [200] Woźniak K.: Materiały ściernicze; Wytwarzanie i własności; WNT Warszawa 1982
- [201] Woźniak K.: Podstawy procesu wytwarzania ziaren ściernych w aspekcie regulowania ich kształtu; WSIInż Koszalin 1982
- [202] Woźniak K.: Nowe materiały ściernicze; WSIInż Koszalin 1985
- [203] Woźniak K.: Wpływ geometrii i wytrzymałości mechanicznej ziarna ściernego na jego zdolność ścierną; Zeszyty Naukowe WSIInż. Koszalin 1997
- [204] Xie Y., Williams J.: The generation of worn surface by repeated interaction of parallel grooves; Wear 164/1993

- [205] Xie Y., Williams J.: The prediction of friction and wear when soft surface slides against a harder rough surface; *Wear* 196/1996
- [206] Yoshikawa H., Sata T.: Simulated Grinding Process by Monte Carlo Method; *Annals of the CIRP* vol. 16/1/1968
- [207] Yoshikawa H., Peklenik J.: Three dimensional Simulation Technique of the Grinding Process – II Effects of Grinding Conditions and Wear on the Statistical Distribution of Geometrical Chip Parameters; *Annals of the CIRP* vol. 18/1/1970
- [208] Zeigler B.: *Teoria modelowania i symulacji*; PWN; Warszawa 1984
- [209] Zhou Z. X., Lutterwelt C. A.: The Real Contact Length between Grinding Wheel and Workpiece – A New Concept and a New Measuring Method. *Annals of the CIRP* 41/1/1992