



Politechnika Koszalska

Wydział Mechaniczny

mgr inż. Anna Zawada-Tomkiewicz

***Wykorzystanie wskaźników
cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej
do monitorowania zużycia ostrza w procesie toczenia***

Rozprawa doktorska

Promotor:

dr hab. inż. Borys Storch

Profesor Politechniki Koszalskiej

Koszalin 2001

OZNACZENIA	4
SKRÓTY	6
1. WPROWADZENIE	7
2. ANALIZA WZAJEMNEGO ODDZIAŁYWANIA NAROŻA OSTRZA I MATERIAŁU OBRABIANEGO	9
2.1. STAN OSTRZA SKRAWAJĄCEGO W PROCESIE TOCZENIA	10
2.1.1. <i>Przebieg zużycia</i>	10
2.1.2. <i>Fizykalne mechanizmy zużycia ostrza</i>	13
2.1.3. <i>Metody identyfikacji stanu ostrza skrawającego</i>	15
2.2. KONSTYTUOWANIE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI W TOCZENIU	18
2.2.1. <i>Chropowatość teoretyczna w toczeniu</i>	20
2.2.2. <i>Wpływ zużycia naroża ostrza na chropowatość powierzchni obrobionej</i>	23
2.3. METROLOGIA POWIERZCHNI OBROBIONEJ	25
2.3.1. <i>Kryterium Raleigha</i>	26
2.3.2. <i>Rozpraszanie światła z powierzchni chropowatej</i>	27
2.3.3. <i>Modelowanie powierzchni chropowatej</i>	29
2.3.4. <i>Pomiary chropowatości i aktywna kontrola chropowatości</i>	34
2.3.5. <i>Mikrostereometria powierzchni</i>	36
2.3.6. <i>Pomiary optyczne</i>	36
2.4. ZASTOSOWANIE OBRAZU POWIERZCHNI OBROBIONEJ DO OCENY CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI	39
2.4.1. <i>Cyfrowa reprezentacja obrazu</i>	39
2.4.2. <i>Cyfrowy obraz powierzchni obrobionej</i>	40
2.4.3. <i>Modelowanie obrazu powierzchni obrobionej</i>	41
2.4.4. <i>Sieci neuronowe w przetwarzaniu obrazów</i>	43
2.5. WNIOSKI Z PRZEGLĄDU LITERATURY	44
3. CEL I ZAKRES PRACY	45
3.1. UZASADNIENIE WYBORU TEMATU.....	45
3.2. TEZA NAUKOWA PRACY	45
3.3. CELE PRACY.....	46
3.4. ZAKRES PRACY	46

4. BADANIA WŁASNE.....	49
4.1. ZAPLANOWANIE I PRZEPROWADZENIE EKSPERYMENTU	49
4.1.1. <i>Plan badań.....</i>	49
4.1.2. <i>Metodyka badań doświadczalnych</i>	52
4.1.3. <i>Jakość płytek zastosowanych do badań.....</i>	53
4.1.4. <i>Zjawiska fizyczne obserwowane podczas eksperymentu.....</i>	55
4.1.5. <i>Model chropowatości powierzchni obrobionej i zużycia pomocniczej powierzchni przyłożenia noża tokarskiego</i>	65
4.1.6. <i>Wzorcowanie parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia ostrza</i>	72
4.2. ANALIZA CYFROWEGO OBRAZU POWIERZCHNI OBROBIONEJ	77
4.2.1. <i>System pomiarowy</i>	77
4.2.2. <i>Czynniki wpływające na jakość pozyskiwanego obrazu</i>	81
4.2.3. <i>Wskaźniki cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej.....</i>	84
4.3. ESTYMACJA PARAMETRU R_a CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI OBROBIONEJ I WSKAŹNIKA VB ZUŻYCIA OSTRZA Z WYKORZYSTANIEM SIECI NEURONOWEJ.....	95
4.3.1. <i>Przygotowanie wektora cech</i>	95
4.3.2. <i>Zastosowanie sieci neuronowej w estymacji.....</i>	106
4.4. WNIOSKI Z BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH	117
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE.....	119
5.1. WNIOSKI O CHARAKTERZE POZNAWCZYM	120
5.2. WNIOSKI UTYLITARNE	121
5.3. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ.....	121
LITERATURA	122

Oznaczenia

(a, b)	- współrzędne elementu macierzy sąsiedztwa policzonej dla danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
a_p	- głębokość skrawania [mm],
f	- posuw $\left[\frac{mm}{obrót} \right]$,
f_0	- częstotliwość, odpowiadająca posuwowi, wyznaczona z widmowej gęstości mocy macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej, $\left[\frac{mm}{obrót} \right]$,
$f(x, y)$	- funkcja opisująca macierz danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
$\hat{f}(x, y)$	- funkcja opisująca macierz danych reprezentujących obraz powierzchni odniesienia,
$h(r)$	- wysokość nierówności powierzchni mierzona od powierzchni odniesienia w punkcie obserwacji r [μm],
k	- liczba wielkości wyjściowych modelu,
m	- liczba wielkości wejściowych modelu,
n	- liczba pomiarów, liczba cech, liczebność zbioru,
p	- liczba parametrów modelu,
r_ε	- promień zaokrąglenia wierzchołka ostrza [mm],
r_n	- promień naroża ostrza [mm],
t	- czas skrawania [min],
v_c	- prędkość skrawania $\left[\frac{m}{min} \right]$,
(x, y)	- współrzędne elementu macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
AC	- zawartość strukturalna – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
AD	- średnia różnica – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
D	- wymiar fraktalny macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
F	- cecha policzona z macierzy sąsiedztwa danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
F10, F11, F12, F13	- cecha macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej - energia - policzona z macierzy sąsiedztwa dla kierunku 0,1,2,3,
F20, F21, F22, F23	- cecha macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej – entropia - policzona z macierzy sąsiedztwa dla kierunku 0,1,2,3,
F30, F31, F32, F33	- cecha macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej - maksymalne prawdopodobieństwo – policzona z macierzy sąsiedztwa dla kierunku 0,1,2,3,
F40, F41, F42, F43	- cecha macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej - kontrast - policzona z macierzy sąsiedztwa dla kierunku 0,1,2,3,

F50, F51, F52, F53	- cecha macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej - odwrotny moment różnicowy - policzona z macierzy sąsiedztwa dla kierunku 0,1,2,3,
F60, F61, F62, F63	- cecha macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej - współczynnik korelacji - policzona z macierzy sąsiedztwa dla kierunku 0,1,2,3,
IF	- zgodność – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
J	- funkcja kryterium optymalności, jakobian funkcji błędu,
L_g	- poziom jasności dla maksymalnej wartości histogramu macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
Lp1, Lp2, Lp3	- normy Minkowskiego – normy bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
MD	- maksymalna różnica – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
MSE	- błąd średniokwadratowy – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
NAE	- znormalizowany błąd bezwzględny – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
NK	- znormalizowana korelacja skośna – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
NMSE	- znormalizowany błąd średniokwadratowy – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
N_c	- liczba kolumn macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
N_g	- liczba poziomów jasności macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej, wymiar macierzy sąsiedztwa,
N_r	- liczba rzędów macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
Q	- macierz planu eksperymentu,
$P_{\phi,d}$	- macierz sąsiedztwa policzona dla kierunku ϕ i odległości d macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
PMSE	- szczytowy błąd średniokwadratowy – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
PSNR	- szczytowy stosunek sygnału do szumu – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
R_{zt}	- maksymalna teoretyczna wysokość nierówności profilu chropowatości [mm],
R_a	- średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej w przedziale odcinka elementarnego [μm],
$R_{\max t}$	- maksymalna teoretyczna wysokość nierówności profilu chropowatości [mm] wg [STO89],

R_{zt}	- maksymalna teoretyczna wysokość nierówności profilu chropowatości [mm] wg [KAW98],
SNR	- stosunek sygnału do szumu – norma bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia,
S_o	- skośność macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
VB	- średnia szerokość pasma zużycia ściernego na powierzchni przyłożenia ostrza [mm],
X	- wektor cech opisujących macierz danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
α	- poziom istotności,
ε_{\max}	- graniczny błąd przypadkowy,
γ	- kąt padania promieni świetlnych [rad],
λ	- długość fali padającego światła [m],
μ_o	- wartość średnia macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
σ_o	- odchylenie standardowe macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej,
$\hat{\sigma}_y^2$	- wariancja funkcji regresji,
$\hat{\sigma}_{y-\hat{y}}^2$	- wariancja resztowa,
ξ_{\max}	- graniczny błąd systematyczny,
Δh	- różnica wysokości mikronierówności [m],
$\Delta \phi$	- różnica faz odbitych promieni świetlnych,
$\Delta_{\max} \hat{R}_a$	- niepewność oszacowania R_a ,
$\Delta_{\max} \hat{VB}$	- niepewność oszacowania VB .

Skróty

ACF	- funkcja autokorelacji,
CAPD	- metoda katodowego odparowania łukowego nanoszonych warstw,
CCD	- matryca elementów fotoczułych,
OUPN	- obrabiarka – uchwyt – przedmiot – narzędzie,
PSD	- widmowa gęstość mocy,
RGB	- addytywny model kolorów, w którym kolor uzyskuje się przez zsumowanie kolorów podstawowych R,G,B,
SGP	- struktura geometryczna powierzchni.

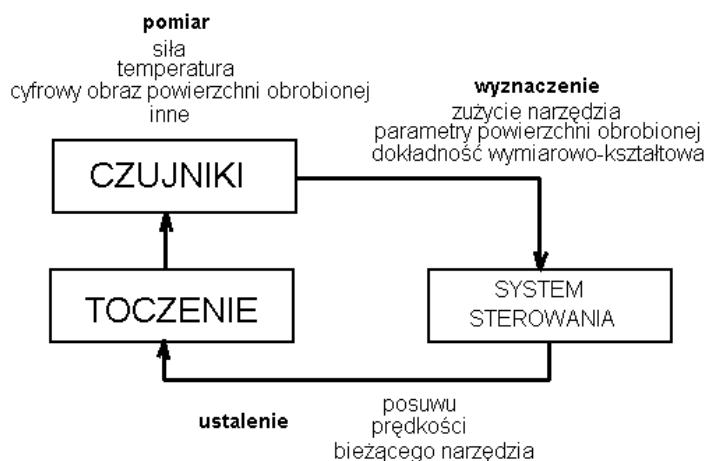
1. Wprowadzenie

Badanie zjawisk związanych z procesem skrawania charakteryzuje się stopniowym i ustabilizowanym postępem. Tworzenie coraz nowocześniejszych metod badawczych, sprzętu pomiarowego otwierają nowe możliwości identyfikacji procesów i ich związków podczas tworzenia powierzchni obrobionych.

Toczenie jest sposobem obróbki przedmiotu, w którym powstająca powierzchnia walcowa jest wynikiem odwzorowania niewielkiej powierzchni przyłożenia z otoczenia naroża noża tokarskiego. Dynamiczne zmiany w procesie toczenia, związane z drganiami, oddziaływaniem wióra, wahaniami temperatury skrawania, zniekształcają powstającą powierzchnię przedmiotu. Z kolei odwzorowanie zużytej powierzchni przyłożenia, nałożone na trajektorię ruchu naroża ostrza, tworzy powierzchnię obrobioną o bardzo złożonej strukturze.

W ten sposób powierzchnia obrobiona jest źródłem informacji o wielu jednocześnie zachodzących zjawiskach występujących podczas obróbki. Można uznać, że w powierzchni obrobionej zapisana jest wieloparametryczna informacja o skutkach tych procesów. Należy także oczekiwać, że postęp w badaniach nad obróbką skrawaniem pozwoli w przyszłości wydzielić udziały poszczególnych procesów elementarnych w tworzeniu topografii powierzchni obrobionej.

Nowoczesne systemy obróbki skrawaniem wymuszają stosowanie podsystemu przepływu informacji. Służy on do zautomatyzowania sterowania procesami roboczymi w systemie wytwórczym, do nadzorowania i diagnostyki w elastycznym systemie obróbkowym. Dla systemu sterowania konieczne jest monitorowanie. Stosowanych jest wiele rozwiązań monitorowania stanu narzędzia wykorzystujących bezpośrednio ocenę zużycia ostrza lub pośrednio pomiary innych wielkości jako skutków zużycia. Niedoskonałością istniejących układów jest niska wiarygodność wyników i ich duża złożoność w użytkowaniu. Prowadzi się zatem badania zmierzające do opracowania nowych układów nadzorowania oraz metod prognozowania stanu narzędzi i sterowania właściwościami warstwy wierzchniej przedmiotu w procesie skrawania ale z podwyższoną wiarygodnością wyników (rys. 1).



Rys. 1. Zintegrowana aktywna kontrola procesu

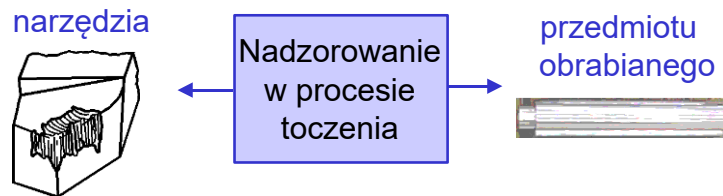
Przykładem prowadzonych badań nad nowoczesnymi i zobiektywizowanymi metodami monitorowania są prowadzone od wielu lat pod kierunkiem B. Storcha badania z zakresu zastosowania cyfrowej reprezentacji obrazu w nadzorowaniu skrawania. Jednym z kierunków badań jest nadzorowanie stanu ostrza i powierzchni obrobionej z wykorzystaniem informacji wyznaczonej z obrazu powierzchni obrobionej [ZAW97-1, ZAW97-2, ZAW98, ZAW01]. Na powierzchni obrobionej przez toczenie widoczne są pewne regularności tworzące chropowatość. Nie są one jednak prostym odwzorowaniem otoczenia naroża ostrza, ale wynikiem złożonych procesów, połączonych ze zmianą powierzchni przyłożenia w wyniku zużycia. Rozwinięcie nowoczesnych metod przetwarzania cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej jest genezą niniejszej pracy.

W pracy do opisu powierzchni obrobionej wykorzystano pojęcia topografia, struktura, chropowatość, a odwołując się do cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej użyto pojęcia tekstury [EWA99]. W odniesieniu do cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej używano pojęcia obraz cyfrowy, obraz, macierz danych reprezentujących obraz [SKA93, PAV87].

2. Analiza wzajemnego oddziaływania naroża ostrza i materiału obrabianego

Potrzeba prowadzenia badań skrawania wynika z wytwarzania wciąż nowych materiałów konstrukcyjnych i narzędziowych o podwyższonych właściwościach mechanicznych, zwiększonej odporności na zużycie w warunkach tarcia, jak też odpornych na oddziaływanie wysokich temperatur i czynników erozyjno-korozyjnych [ZEB85, STO01].

Prowadzone są także badania zmierzające do opracowania nowocześniejszych układów nadzorowania [SZA94, KOS96, NOV96, JEM98] oraz metod prognozowania stanu narzędzi i sterowania właściwościami warstwy wierzchniej po obróbce [NOW91, MIE96-1] (rys. 2).



Rys. 2. Nadzorowanie toczenia

Zagadnienia nadzoru pracy narzędzi na obrabiarkach dotyczą tematów związanych z oceną stanu narzędzia, prognozowaniem tych stanów oraz wykrywaniem nagłych katastroficznych zmian na powierzchni narzędzia, uniemożliwiających kontynuowanie skrawania [JEM97, GAW88, KON95]. Aktywna kontrola chropowatości obejmuje zagadnienia: bieżącej oceny chropowatości powierzchni, określenia czasu obróbki gwarantującego założoną gładkość powierzchni, wyznaczenia wpływu stanu zużycia naroża ostrza skrawającego na parametry chropowatości powierzchni obrobionej [NOW96].

W niniejszym rozdziale, poświęconym analizie literatury, przedstawiono zagadnienia modelowania chropowatości powierzchni przy zużywającej się powierzchni przyłożenia naroża ostrza. Zaprezentowano modele konstytuowania chropowatości powierzchni w toczeniu. Określono chropowatość powierzchni oraz sposoby jej pomiaru. Przedstawiono też możliwość zastosowania cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej do jej modelowania.

2.1. Stan ostrza skrawającego w procesie toczenia

Z upływem czasu skrawania na powierzchniach części roboczej ostrza pojawiają się ślady świadczące o zużyciu. Zużywanie się tych powierzchni ma różny charakter i przebiega z różną intensywnością.

Przyczyną zużycia powierzchni ostrza jest tarcie nasady wióra o powierzchnię natarcia oraz tarcie powierzchni przyłożenia o powierzchnię skrawaną i obrobioną. Zużycie ostrza może być także spowodowane wykruszeniem krawędzi, zmianami strukturalnymi materiału ostrza w wyniku wysokiej temperatury skrawania [WAN99], utleniania, zdzierania warstw materiału ostrza, itp.

Obliczenia trwałości narzędzi dla różnych parametrów skrawania, przy zmiennych właściwościach materiałów narzędziowych i materiałów skrawanych są obarczone błędami. Wynika to głównie z odmiennych właściwości materiałów narzędziowych oraz skrawanych, a także złożonego wpływu warunków skrawania [GAW00].

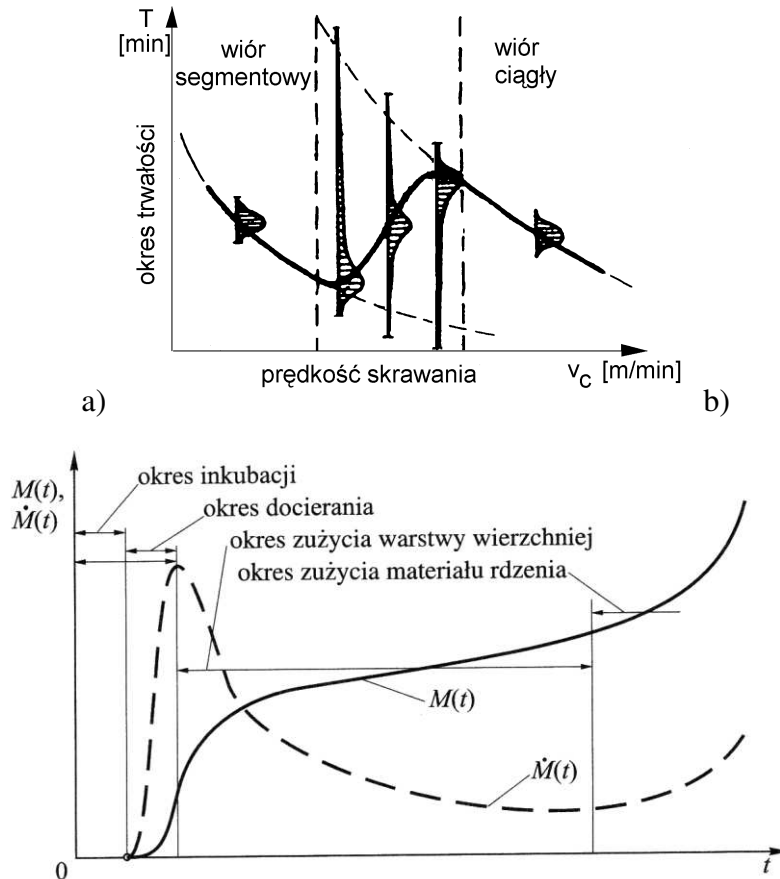
Dostrzeżona niemonotoniczność trwałości ostrza, zależna od prędkości skrawania, związana jest ze zmianami oporów skrawania i ciepła w obszarze styku ostrza z wiórem i powierzchnią obrobioną. W pewnych warunkach następuje wyraźne pogorszenie stabilności procesu skrawania i wzrost intensywności zużycia. Warunki te występują w obszarze nieokreślonego skrawania (rys. 3a) [MIE96-2].

W celu przeciwdziałania tym niekorzystnym zjawiskom opracowuje się materiały narzędziowe o lepszych właściwościach mechanicznych albo pokrywa się powłokami przeciwzużyciowymi narzędzia dotychczas stosowane.

2.1.1. Przebieg zużycia

Najczęściej przyjmowaną miarą zużycia jest szerokość starcia na powierzchni przyłożenia noża [według PN-ISO 3685 „Badanie trwałości noży tokarskich punktowych”]. Powierzchnia przyłożenia naroża ostrza bierze bezpośredni udział w tworzeniu chropowatości powierzchni obrobionej, natomiast zjawiska zachodzące na powierzchni natarcia nie wpływają bezpośrednio na tworzenie powierzchni obrobionej [KAC70, DMO84].

Intensywność zużycia powierzchni ostrza jest różna i zależy od upływu czasu jego pracy. Przebiegi zużycia mają postać krzywej Lorenza, która wyróżnia trzy okresy o zmieniającej się intensywności (rys. 3b).

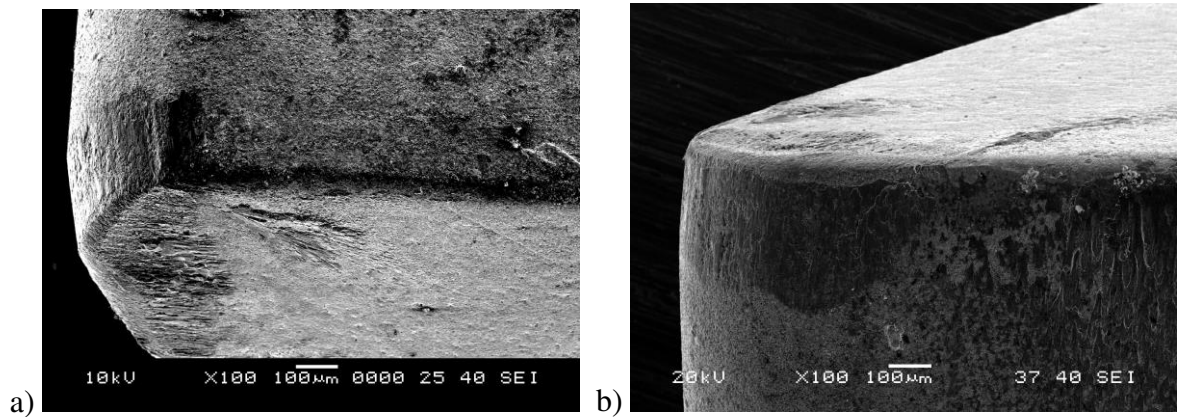


Rys. 3. a) Niemonotoniczny charakter okresu trwałości i prawdopodobieństwo rozrzutu wartości średnich [MIE89], b) Krzywa zużycia, gdzie: $M(t)$ - zużycie, $\dot{M}(t)$ - prędkość zużycia [SIT98]

Początkowy okres zużycia przyspieszonego polega na docieraniu elementów trybologicznej pary powierzchni ostrza i powierzchni obrobionej. Następnie widoczny jest okres o ustalonej intensywności zużycia, charakterystycznej dla stabilnej pracy narzędzia, który przechodzi w okres zużycia przyspieszonego prowadzący do całkowitego zużycia narzędzia [BIE56].

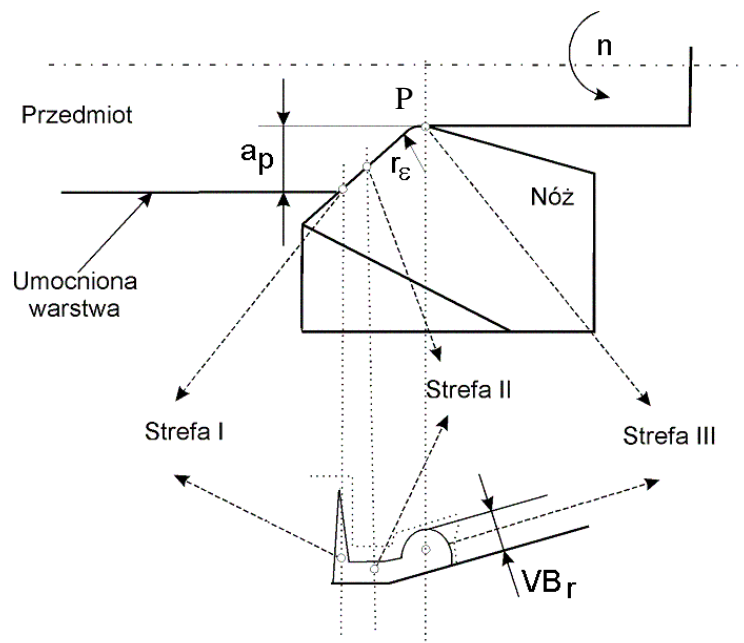
W okresie początkowym (po kilkunastu sekundach) pojawia się starcie powierzchni przyłożenia w otoczeniu naroża wierzchołka ostrza. W miarę upływu czasu skrawania, starcie rośnie i skraca się ostrze, a jednocześnie pojawia się większa liczba bruzd i wgłębień na krawędzi kształtującej [STO91-3].

Z upływem czasu skrawania na powierzchniach czynnych ostrza występują ślady zużycia. Obraz śladów zależy od geometrycznego ukształtowania naroża ostrza. Dla przypadku ostrza z narożem zaokrąglonym wycinkiem okręgu o promieniu $r_\varepsilon > 0$ oraz $\varepsilon_r < 90^\circ$, na powierzchniach przyłożenia zużytego ostrza obserwuje się trzy zdecydowanie różniące się strefy, charakteryzujące się odmienną mechaniką i obrazem powstawania tych śladów (rys. 4) [STO93-1, STO93-2].



Rys. 4. Ślady zużycia od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia (a) i głównej powierzchni przyłożenia (b) noża tokarskiego dla posuwu 0,08 mm/obr, prędkości 187,5 m/min i czasu skrawania 6 min

W miarę postępującego zużycia, w miejscu, w którym czynna krawędź skrawająca przecina się z warstwą odkształconą powierzchni obrabianej (rys. 5, punkt P), występuje raptowny zanik obciążenia. W wyniku złożonego stanu naprężeń, krawędź skrawająca tworzy wiór z materiału warstwy wierzchniej, odkształconego w poprzednim przejściu. Wysoka temperatura przy swobodnym dostępie tlenu zawartego w powietrzu sprzyjają pojawieniu się skoncentrowanego śladu zużycia na powierzchni przyłożenia.



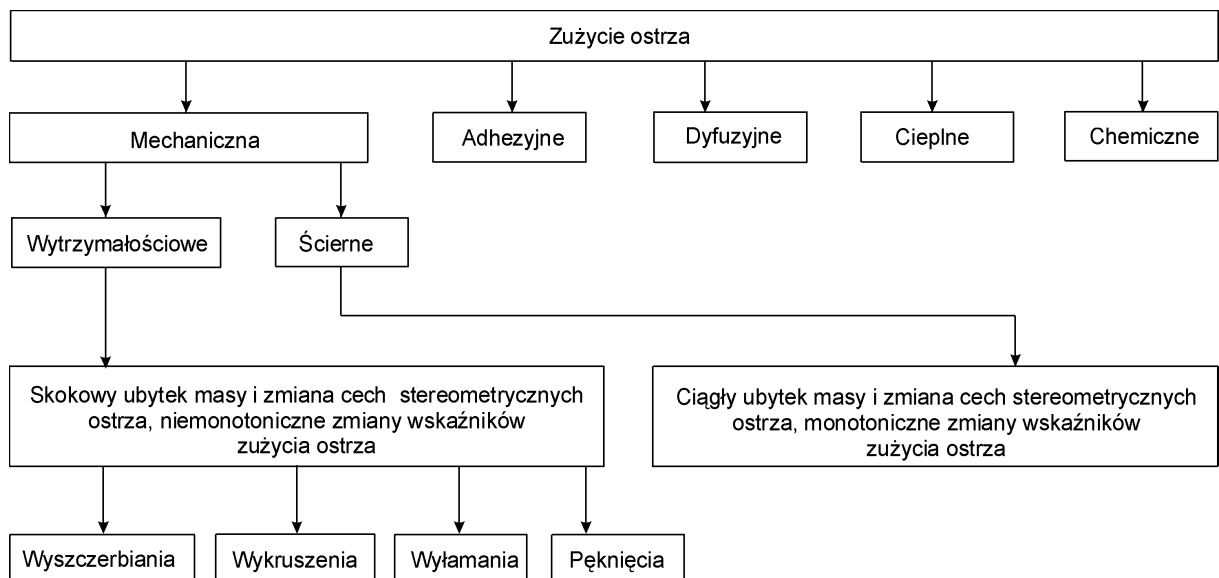
Rys. 5. Ślady zużycia na powierzchni przyłożenia [STO89]

Dalsze zużywanie się naroża ostrza to już tylko zwiększenie szerokości wcześniejszego śladu. W strefie III zmienia się grubość warstwy skrawanej tak, że $h < h_{\min}$ (h_{\min} - minimalna grubość warstwy skrawanej) szczególnie, gdy posuw jest niewielki, charakterystyczny dla obróbki wykańczającej (rys. 5). Zużycie na pomocniczej powierzchni przyłożenia przebiega tak, że granice widocznego śladu są zbliżone w kształcie do wycinka elipsy.

Dla ostrzy z węglików spiekanych daje się zauważyć przesuwanie się rzeczywistego wierzchołka w kierunku pomocniczej krawędzi ostrza oraz wzrost promienia jego zaokrąglenia [STO89].

2.1.2. Fizykalne mechanizmy zużycia ostrza

Zjawiska na styku naroże ostrza - przedmiot obrabiany opisano w wielu pozycjach literatury [BIE56, STO89, GRZ98, GAW98]. Różne zjawiska towarzyszące skrawaniu (siły, temperatura, zużycie ostrza i inne) były rozpatrywane odrębnie. Nie udało się stworzyć jednego modelu, który pozwoliłby zinterpretować złożoną mechanikę wzajemnego oddziaływania pracującego ostrza i materiału obrabianego. Elementarne procesy zużywania ostrza w zależności od temperatury i prędkości skrawania przedstawiono w wielu pracach [WYS97, GRZ98]. Wyróżniono zużycie mechaniczne, adhezyjne, dyfuzyjne, cieplne i chemiczne (rys. 6).



Rys. 6. Klasyfikacja zużycia ostrzy narzędzi skrawających [GAW88]

Zużycie mechaniczne występuje przy przekroczeniu doraźnej lub zmęczeniowej wytrzymałości ostrza oraz pod działaniem sił tarcia. Ścieraniu mechanicznemu towarzyszy ubywanie masy, zmiany wymiarów liniowych i kształtu ostrza, wywołane przez

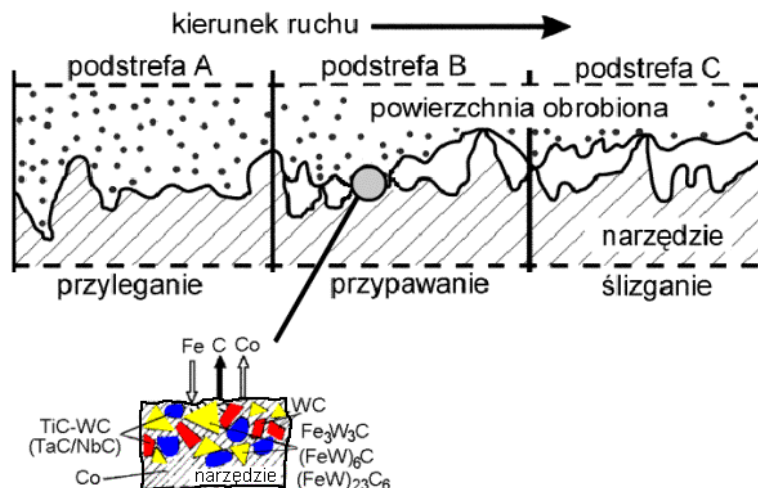
mikroskrawanie, rysowanie i bruzdowanie. W procesie ścierania biorą udział twarde wtrącenia w materiale obrabianym (cementyt, złożone węgliki, fazy międzymetaliczne), które zachowują dużą twardość w temperaturach kontaktowych, części okresowo zrywanego narostu i utlenione produkty zużycia. Zjawiska te widoczne są dla dużego obszaru zmian prędkości skrawania. Intensywność zużycia ściernego jest proporcjonalna do twardości materiałów obrabianego i narzędziowego w określonej temperaturze skrawania [GAW88].

Przyczyną zmęczenia mechanicznego jest tworzenie wióra oraz procesy przejściowe występujące w fazie wcinania się ostrza w materiał. Po pewnym czasie pracy ostrza pojawiają się mikrowykruszenia krawędzi, zwane szczyrbatością, większe wykruszenia w strefie styku, pęknięcia i wyłamania.

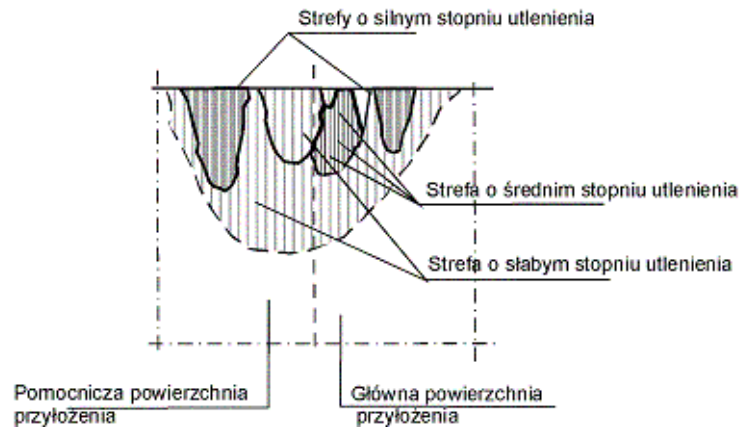
Dla większych prędkości skrawania dominuje zmęczenie cieplne materiału ostrza wywołane szokami termicznymi podczas wchodzenia i wychodzenia ostrza z materiału oraz wzrostem temperatury spowodowanym postępującym zużyciem. Zużycie cieplne to wynik przemian strukturalnych w warstwie wierzchniej ostrza oraz odkształcenia plastyczne krawędzi skrawającej pod wpływem silnego nagrzania i dużych nacisków kontaktowych (plastyczne płynięcie materiału i deformacja krawędzi skrawającej).

Zużycie adhezyjne polega na tworzeniu lokalnych szczepień metalicznych powierzchni ostrza i powierzchni obrabianej, następnie niszczenie tych połączeń, któremu towarzyszy odrywanie cząstek metalu lub jego rozmazywanie. Największą intensywność zużycia adhezyjnego widać w warunkach sprzyjających powstawaniu stabilnego narostu. Powstałe narosty mają ostre krawędzie i działają jak zamocowane mikroostrza [LEG95].

Zużycie dyfuzyjne wywołane jest przemieszczeniem mas atomów pierwiastka z materiału ostrza do materiału obrabianego (i odwrotnie) wskutek ruchów cieplnych spowodowanych osiągnięciem ich temperatury aktywności dyfuzyjnej (rys. 7).



Rys. 7. Przebieg dyfuzji w ostrzu z węglika spiekanego [GRZ98]



Rys. 8. Strefy utleniania [GAW88]

Podstawowym mechanizmem zużycia chemicznego jest utlenianie (rys. 8). Teoria zużycia przez utlenianie wykorzystuje zjawisko korozji węglików spiekanych podczas ich nagrzewania w obecności tlenu. Zwiększająca się porowatość materiału powoduje, że utlenianiu podlegają ziarna węglików rozmieszczonych nawet w pewnej odległości pod powierzchnią. Objawem jest niszczenie kruchej, utlenionej warstwy wierzchniej ostrza przy tarciu ślizgowym.

2.1.3. Metody identyfikacji stanu ostrza skrawającego

Stan narzędzia można określić jako n-wymiarową funkcję wektorową [GAW88, GAW98]:

$$x(t) = \{x_1(t), \dots, x_n(t)\}, \quad t_0 \leq t \leq t_k, \quad (1)$$

gdzie $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ - składowe wektora stanu narzędzia, reprezentujące odpowiednio właściwości fizyczne materiału ostrza, jego cechy stereometryczne, stan zużycia.

Metody identyfikacji (diagnozowania) stanu ostrza podzielono na metody bezpośrednie i metody pośrednie. Metody bezpośrednie wykorzystują wskaźniki związane ze zmianą geometrii ostrza, czyli bazują na pomiarze cech geometrycznych ostrza. Metody pośrednie wykorzystują zaś zjawiska spowodowane zużyciem ostrza. Wykorzystują więc pomiar skutków zużycia. Wskaźniki pośrednie po których można ocenić zużycie ostrza, to:

- wskaźniki fizyczne: wzrost odkształceń plastycznych, składowych siły i momentu skrawania [SAN97, SIC97], wzrost temperatury skrawania, wzrost amplitudy drgań, pojawienie się i narastanie sygnału emisji akustycznej [LIP92],
- wskaźniki technologiczne: wzrost chropowatości powierzchni, przekroczenie tolerancji wymiarowo-kształtowej, powstanie zadziórów na krawędziach, zmiany postaci i kształtu wióra [VEN96, DAV96] (tablica 1).

Metody bezpośrednie wierniej oddają stan rzeczywisty, ale są trudne do technicznej realizacji.

Jedną z bezpośrednich metod optycznych identyfikacji stanu naroża ostrza jest metoda wykorzystująca jego cyfrowy obraz. Optyczny układ pomiarowy dokonuje rejestracji obrazu krawędzi skrawającej w tej samej pozycji i odległości od kamery. W kolejnym kroku dokonywana jest filtracja obrazu, ustalenie pozycji krawędzi skrawającej na obrazie i wyznaczenie wartości zużycia [PAR91, STO91-1, STO91-2, STO99-1]. Informacja optyczna o stanie naroża ostrza skrawającego jest wykorzystywana do wyznaczania wartości zużycia ostrza [KOS96, GAW00].

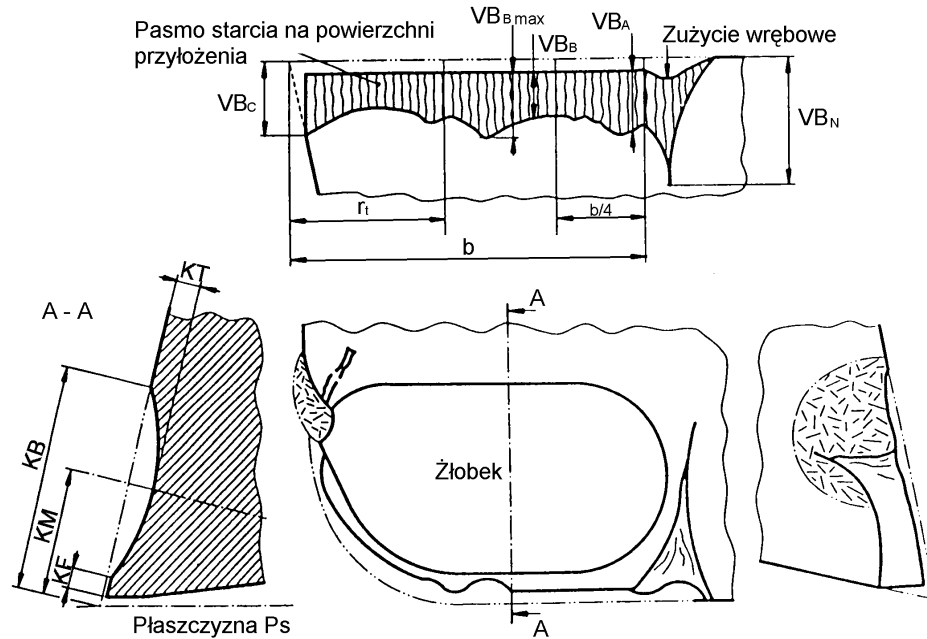
Metody pośrednie oceny stanu zużycia ostrza cechuje prostsza technicznie realizacja, ale wyniki są obarczone niepewnością wynikającą z nie rozpoznanych do końca zakłóceń [BER98, DAR97, SZA98].

Coraz powszechniej w nadzorowaniu stanu ostrza stosuje się sieci neuronowe. Najczęściej wykorzystuje się sztuczne sieci neuronowe w celu integracji cech stanu ostrza narzędzia [SOK99, SOK95, ZAW01, ZAW97-2, ZAW98, GAW97]. Porównanie sieci neuronowej z innymi metodami przetwarzania danych wskazuje na ich przewagę z punktu widzenia odporności na błędy i zakłócenia [CIC97, KAC94].

Tablica 1. Metody identyfikacji stanu ostrza

Metoda identyfikacji	Metoda pomiaru
bezpośrednia	dotykowa - pomiaru geometrii ostrza
	optyczna – pomiaru położenia lub kształtu naroża ostrza
	radiometryczna – pomiaru promieniowania ostrza
	indukcyjna – pomiaru geometrii ostrza (bezdotykowo)
	elektrooporowa – pomiaru przewodności ostrze-przedmiot
pośrednia	pomiaru sił skrawania
	pomiaru energii emisji akustycznej
	pomiaru mocy sygnału dźwiękowego
	pomiaru drgań narzędzi
	pomiaru temperatury na narzędziu
	pomiaru prądu lub mocy silnika

Fizyczne miary poszczególnych postaci zużycia są unormowane i spotykane pod nazwą wskaźników zużycia ostrza. Na rysunku 9 przedstawiono typowe postacie zużycia ostrza skrawającego oraz wskaźniki będące ich miarą. Kryteria stopienia ostrzy (fizyczne, technologiczne i ekonomiczne) wyznaczone są przez graniczne wartości odpowiednich wskaźników.



Rys. 9. Wskaźniki zużycia ostrza¹

Zależność dowolnego wskaźnika ściernego zużycia od parametrów skrawania ostrza przy ustalonych pozostałych warunkach obróbki można wyrazić:

$$VX = g(v_c, f, a_p, u), \quad (2)$$

gdzie:

u – niezależna zmienna reprezentująca czas lub drogę skrawania,

VX - wskaźnik zużycia ściernego.

Pochodna wskaźnika zużycia VX względem zmiennej niezależnej u określa dynamikę procesu zużycia. Jest to intensywność zużycia:

$$I(u) = \frac{\partial VX}{\partial u}. \quad (3)$$

Można wykorzystać pojęcie odwrotności intensywności jako miary odporności na zużycie. Wtedy trwałość ostrza można zdefiniować następująco:

$$T = \int_0^{VX_{kr}} \frac{du}{dVX}, \quad (4)$$

gdzie:

VX_{kr} - wartość graniczna wskaźnika zużycia.

¹ według PN-ISO 3685 „Badanie trwałości noży tokarskich punktowych”

Dla kryterium stępienia ostrza $VX = VX_{kr}$ przy stałej prędkości skrawania zakłada się, że trwałość jest ilorzem granicznej wartości wskaźnika zużycia i intensywności

$$T = \frac{VX_{kr}}{I_{vc}} \quad (5)$$

Przyjmuje się, że wartość graniczna wskaźnika zużycia jest stałą, więc zależność (5) sprowadza się do badania zmian intensywności zużycia [GAW98]. W rzeczywistości trudne jest utrzymanie stałej intensywności w warunkach produkcyjnych.

2.2. Konstytuowanie chropowatości powierzchni w toczeniu

Proces technologiczny powoduje ukonstytuowanie warstwy wierzchniej, która powiązana jest z parametrami realizacji tego procesu zależnością ogólną:

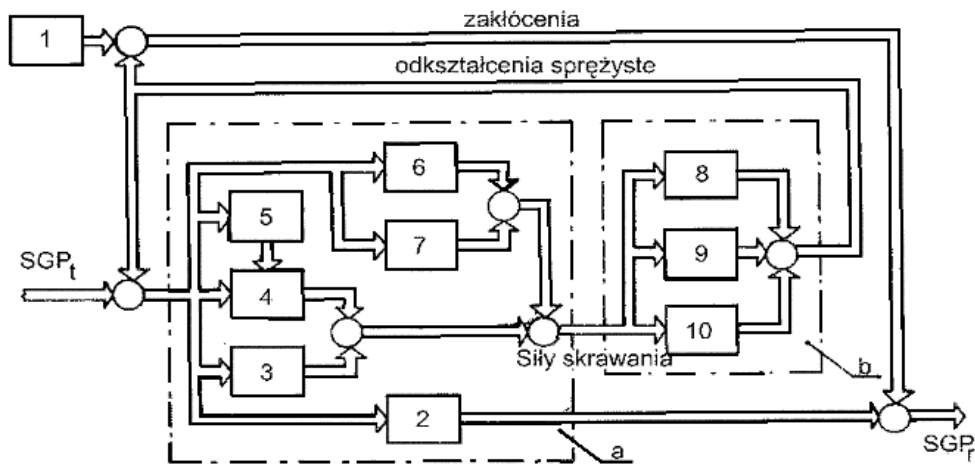
$$w_p = F_w(t_{e1}, \dots, t_{ei}), \quad (6)$$

gdzie:

w_p - wielkość charakteryzująca warstwę wierzchnią,

t_{e1}, \dots, t_{ei} - zbiór wielkości charakteryzujących proces technologiczny,

F_w - funkcja konstytuowania warstwy wierzchniej [GOR83].



Rys. 10. Ideowy schemat blokowy procesu konstytuowania SGP. a – proces skrawania, b – dynamiczna struktura obrabiarki, 1- układ napędowy, 2 – warstwa skrawana, 3 – anizotropia materiału, 4 – opór skrawania, 5 – zużycie ostrza, 6 – tarcie, 7 – płyn obróbkowy, 8, 9, 10, podsystemy przestrzennej, dynamicznej struktury obrabiarki zależne od trzech składowych siły skrawania: obwodowej, posuwowej i odporowej [KON91]

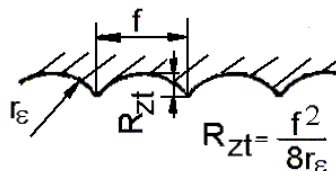
Znajomość funkcji konstytuowania warstwy wierzchniej (rys. 10) jest niezbędna do sterowania właściwościami warstwy wierzchniej, a składają się na nią trzy mechanizmy:

- tworzenie podstawowego kształtu powierzchni obrobionej odwzorowującego geometrię naroża ostrza narzędzia skrawającego i ustawień parametrów skrawania,
- drgania układu albo szczybatość narzędzia, spowodowane zmianą dynamiki sił skrawania, które przerysowują ślad ruchu wibracyjnego naroża ostrza na nominalnej powierzchni obrobionej,
- sprężysto-plastyczne wzajemne oddziaływania narzędzie - przedmiot obrabiany, które nie tylko deformują materiał, lecz także są przyczyną naprężeń resztkowych w częściach maszyn.

Stereometria powierzchni tworzonej w wyniku skrawania jest nieregularna i złożona [ZHA91, BOR97, GOR83, KAW98]. Głównymi czynnikami kształtującymi topografię powierzchni jest geometria narzędzia i parametry skrawania.

Istotnym parametrem związanym z geometrią ostrza jest promień zaokrąglenia wierzchołka ostrza, który bierze bezpośredni udział w odwzorowaniu kinematyczno – geometrycznym naroża wierzchołka ostrza na powierzchni materiału (rys. 11).

Parametry technologiczne: posuw i prędkość skrawania w różny sposób wpływają na stereometrię powierzchni obrobionej. Posuw oddziałuje na powierzchnię w sposób stereometryczno-kinematyczny (rys. 11) [STO89, GRZ98, NOW91]. Prędkość skrawania ma silny wpływ na chropowatość powierzchni obrobionej w zakresie tworzenia narostu na ostrzu. Tworzenie narostu ma charakter cykliczny, a częstotliwość jego wzrostu i zrywania zwiększa się wraz ze zwiększeniem prędkości skrawania. Odrywające się cząstki narostu nalepiają się na powierzchnię obrobioną, tworząc zadziory lub wgniecenia. Z kolei pulsacja siły skrawania jest źródłem wymuszonych drgań układu OUPN. Zmienia się grubość warstwy skrawanej, przez co traci się dokładność wymiarowo-kształtową.



Rys. 11. Odwzorowanie zarysu podczas toczenia – odwzorowanie teoretycznego profilu

Dla obróbki wykańczającej nie udało się wykazać, że wpływ głębokości skrawania jest istotny. Można wręcz uznać, że jest pomijalny. Dla obróbki zgrubnej ze wzrostem głębokości skrawania jest prawdopodobne, że może wzrosnąć amplituda drgań i przez co wywołać pogorszenie chropowatości. W przypadku obróbki zgrubnej nie jest to jednak zjawisko ważne i nie wpływa w większości przypadków na efekt końcowy obróbki.

Losowo rozłożone właściwości materiału, na przykład twardość w warstwie skrawanej na przedmiocie obrabianym, są jedną z przyczyn drgań podczas skrawania [ZHA95]. Do tej pory nie udało się ilościowo ocenić wpływu części losowej zmienności właściwości materiału na proces formowania nieregularności na powierzchni obrobionej. Inną przyczyną nieregularności na powierzchni obrobionej jest złożony mechanizm deformacji sprężysto - plastycznych obserwowany na styku narzędzie - przedmiot obrabiany [AST99, FAN96, LAT97, KUP97]. Przy zapewnieniu dostatecznej sztywności układu OUPN, powstająca powierzchnia może być kontrolowana podczas skrawania.

2.2.1. Chropowatość teoretyczna w toczeniu

Każde skrawanie można uznać za kształtowe, bowiem ślad po przejściu narzędzia to wynik odwzorowania naroża ostrza na tworzonej powierzchni. W profilu poprzecznym można zaobserwować powtarzający się zarys ostrza narzędzia odtwarzany z przesunięciem o wartość posuwu (rys. 10) [BOR97, STO99-2].

Przy założeniu, że ostrze ma promień r_ε i uwzględnieniu posuwu f cała część zaokrąglona naroża bierze udział w skrawaniu. Chropowatość może być opisana zależnością:

$$R_{zt} = r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - \frac{f^2}{4}} = r_\varepsilon \left(1 - \sqrt{1 - \frac{f^2}{4r_\varepsilon^2}} \right), \quad (7)$$

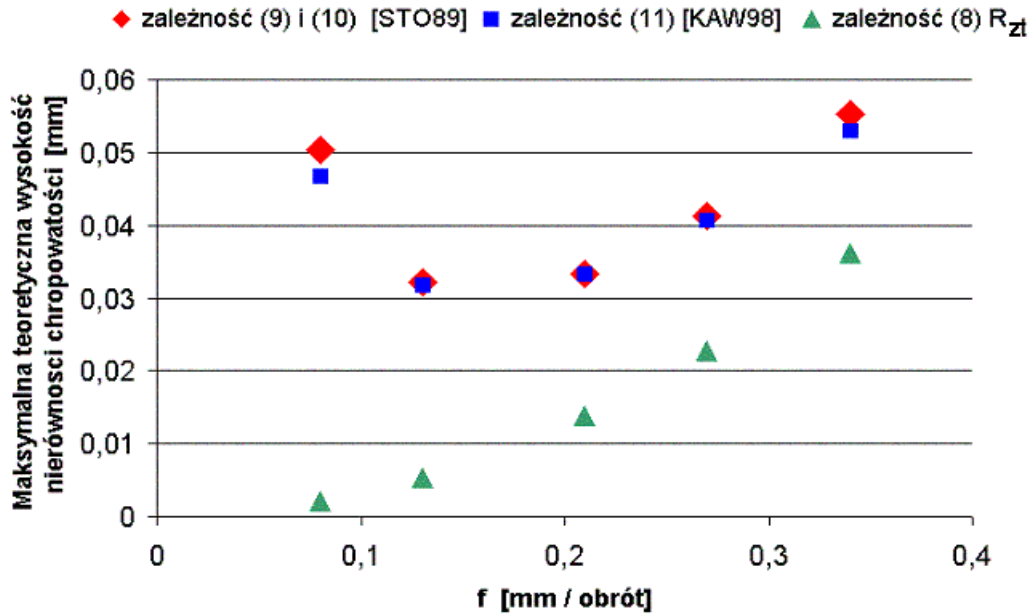
gdzie

R_{zt} - maksymalna teoretyczna wysokość nierówności profilu chropowatości [mm].

Przy założeniu, że promień zaokrąglenia naroża ostrza jest duży w porównaniu z posuwem, to można przyjąć, że

$$R_{zt} \approx \frac{f^2}{8r_\varepsilon}. \quad (8)$$

Z zależności (8) wynika, że zmiany parametrów chropowatości powierzchni są bardziej wrażliwe na posuw niż na promień zaokrąglenia. Zmiany wartości R_{zt} w funkcji posuwu przedstawiono na rysunku 12. Wyniki badań różnych autorów wskazują, że występują minimalne wysokości nierówności dla określonych wartości posuwu f . Tylko dla idealnej krawędzi skrawającej o promieniu zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n równym zero, możliwe jest uzyskanie wysokości nierówności o zerowej wartości.



Rys. 12. Zależność teoretycznej wysokości nierówności powierzchni od posuwu dla parametrów stosowanych w badaniach opisanych w rozdziale 4.1

W warunkach technicznych część warstwy skrawanej, której grubość jest zbyt mała, aby oddzieliło ją ostrze o promieniu $r_n > 0$ przemieszcza się w stronę powierzchni przyłożenia. Pomiędzy rozdziałem idealnym, gdy minimalna grubość warstwy skrawanej $h_{\min} = 0$ dla $r_n = 0$ oraz $h_{\min} > 0$ dla $r_n > 0$ mieści się linia rzeczywista rozdziału warstwy skrawanej.

Po dokonaniu rzutów strefy skrawania nieswobodnego na płaszczyznę podstawową można wyodrębnić trzy strefy skrawania w zależności od kąta ε_{p1} [STO89]. Kąt ten może przyjmować wartości z trzech zakresów $\varepsilon_{p1} \in (\frac{\pi}{2}, \pi)$, $\varepsilon_{p1} = \frac{\pi}{2}$, $\varepsilon_{p1} \in (\varepsilon_p, \frac{\pi}{2})$.

Dla $\varepsilon_{p1} = \frac{\pi}{2}$ wartość chropowatości teoretycznej będzie najmniejsza dla danego ostrza i wtedy:

$$R_{\max t} = h_{\min} = r_n \left(1 - \frac{A_f / A_v}{\sqrt{1 + (A_f / A_v)^2}} \right) \quad (9)$$

$$\text{dla posuwu } f = \sqrt{2r_n r_\varepsilon \left(1 - \frac{A_f / A_v}{\sqrt{1 + (A_f / A_v)^2}} \right) - r_n^2 \left(1 - \frac{A_f / A_v}{\sqrt{1 + (A_f / A_v)^2}} \right)^2},$$

gdzie:

A_f - tangens kąta pochylenia funkcji w zależności $F_f = g(h)$,

A_v - tangens kąta pochylenia funkcji w zależności $F_c = g(h)$,

F_f - składowa posuwowa całkowitej siły skrawania [N],

F_c - składowa obwodowa całkowitej siły skrawania [N],

r_ε - promień zaokrąglenia naroża ostrza [mm],

r_n - promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej [mm],

ε_{p1} - kąt opisujący położenie punktu P1 [°].

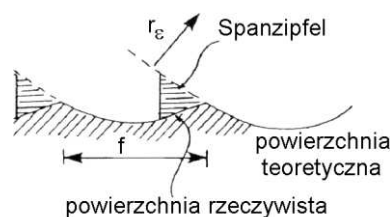
Dla pozostałych przypadków, gdy $\varepsilon_{p1} \in (\frac{\pi}{2}, \pi)$ oraz $\varepsilon_{p1} \in (\varepsilon_p, \frac{\pi}{2})$

$$R_{\max t} = r_\varepsilon (1 - \sin \varepsilon_{p1}) + h_{\min} \sin \varepsilon_{p1} \text{ [STO89]}. \quad (10)$$

Jest pewna minimalna grubość poniżej której wiór nie jest formowany. Wtedy część niezeskrawanej warstwy grubości h_{\min} odkształci się sprężyście po przejściu ostrza. P.H. Brammertz („wzór Brammertza”) podaje zależność na teoretyczną wysokość nierówności [KAW98]

$$R_{zt}' = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} + \frac{h_{\min}}{2} \left(1 + \frac{r_\varepsilon h_{\min}}{f^2} \right). \quad (11)$$

Drugi człon równania to „spanzipfel” (rys. 13). Dla toczenia bez cieczy chłodząco-smarującej wartość chropowatości teoretycznej może zwiększyć się o 25% [WHI94].



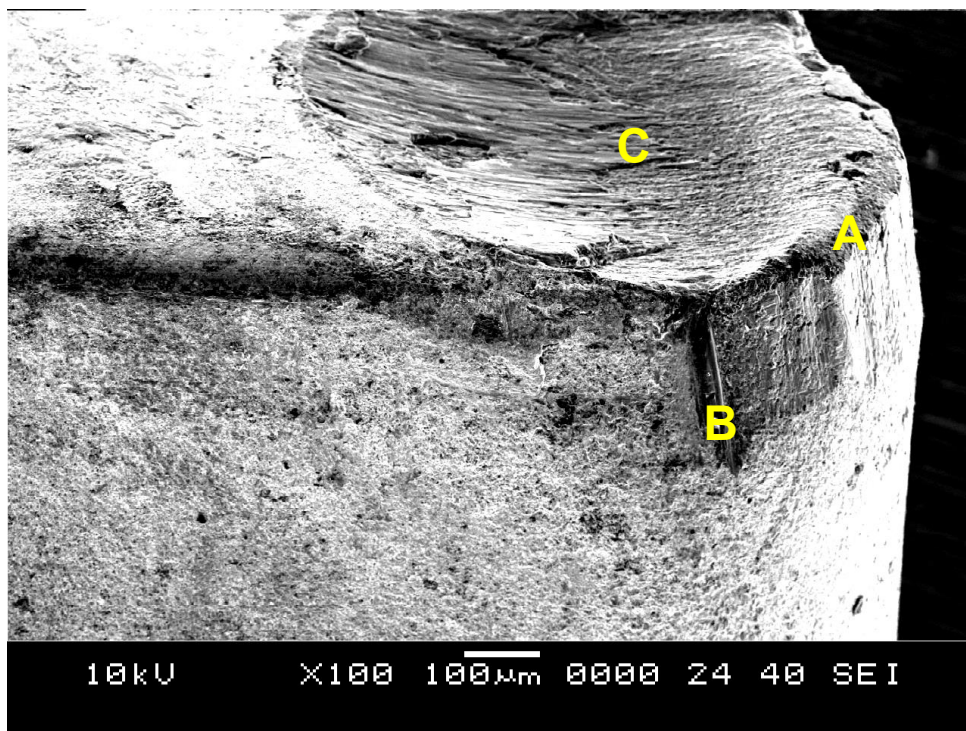
Rys. 13. Formowanie "Spanzipfel" na powierzchni

Rzeczywista wysokość nierówności powierzchni różni się od teoretycznej obliczonej z odwzorowania stereometryczno-kinematycznego. Różnicę pomiędzy rzeczywistą a teoretyczną wysokością nierówności przypisuje się wpływom zjawisk fizycznych i dynamicznych. Zalicza się do nich: narost na ostrzu [WHI94], tarcie powierzchni skrawania o ostrze [BIE56], drgania [ZHA91], wciskanie się cząstek materiału obrabianego lub ostrza pomiędzy powierzchnię skrawania i powierzchnię ostrza [KAC70].

2.2.2. Wpływ zużycia naroża ostrza na chropowatość powierzchni obrobionej

Na tworzoną powierzchnię największy wpływ ma zużycie na powierzchni przyłożenia. Widok naroża ostrza od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia uzyskany podczas badań pokazano na rysunku 14.

W obszarach A i B rysy i pęknięcia pojawiają się najczęściej. W regionie C zasadniczym typem zużycia jest żłobek, który może sprzyjać powstawaniu narostu. Każdy ze wskazanych obszarów zużycia na ostrzu inaczej kształtuje powstającą chropowatość powierzchni.

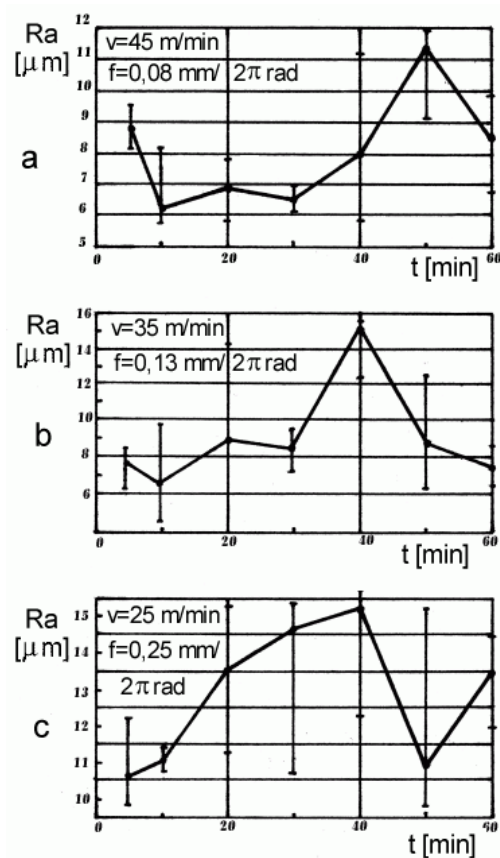


Rys. 14. Zużycie naroża ostrza bez pokrycia dla posuwu 0,21 mm/obr, prędkości skrawania 187,5 m/min i czasu skrawania 11 min (widok od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia)

Istnieje zależność między cechami geometrycznymi narzędzia kształtowanymi przez zużycie i geometrią przekazywaną przez narzędzie na powierzchnię. Jeśli występuje uszkodzenie na narożu ostrza, to utworzony profil jest odwzorowaniem tego uszkodzenia i wówczas kształt narzędzia i uszkodzenie powtarza się w odstępach posuwu. To zjawisko

pozwała na wykorzystanie zmian chropowatości powierzchni rzeczywistej w monitorowaniu zużycia narzędzia [WHI94].

Zmieniające się zużycie na powierzchni przyłożenia z każdym obrotem przedmiotu zmienia topografię powierzchni obrobionej. Wpływ wzajemnego oddziaływania jest tym większy, im większe jest zużycie na powierzchni przyłożenia. Obserwuje się trzy tendencje zmian parametrów chropowatości powierzchni obrobionej w zależności od czasu skrawania (rys. 15). W pierwszym okresie chropowatość maleje od wartości maksymalnej do wartości charakterystycznej dla warunków skrawania. W drugim okresie wartości chropowatości utrzymują się w pewnym zakresie. W trzecim okresie obserwuje się wzrost chropowatości aż do momentu zniszczenia ostrza [STO89].



Rys. 15. Przebieg zmian parametru R_a w czasie skrawania [STO89]

Dla ostrzy z węglików spiekanych zużycie nie ma charakteru ciągłego ze względu na mikrowykruszenia krawędzi. Dla noży z pokryciami, gdzie wykruszenia są mniejsze obserwuje się wpływ zużycia jak dla stali szybko tnącej, tzn. przy postępującym zużyciu zwiększa się promień zaokrąglenia i zmniejsza chropowatość [KAC70]. Następnie zwiększa się liczba rys i wyszczerbień na krawędzi, które niekorzystnie wpływają na chropowatość. Po osiągnięciu kryterium stopienia chropowatość znowu się zmniejsza. [GOR80, FIL00].

W pracy [FAT93] efekt zużycia na powierzchni przyłożenia na topografię powierzchni obrobionej jest opisywany jako zmiana kształtu naroża ostrza. Wzrastające zużycie objawiało się w węższych i głębszych śladach posuwu narzędzia. Ta zmiana w geometrii śladów posuwu powodowała wzrost średniej arytmetycznej wysokości profilu powierzchni.

2.3. Metrologia powierzchni obrobionej

Wytwarzanie powierzchni obrobionej o założonych parametrach chropowatości jest ważną częścią każdego procesu skrawania. Najczęściej, by upewnić się, że przedmiot obrobiony posiada zadane parametry chropowatości powierzchni, powierzchnia jest oceniana po zakończeniu procesu skrawania. Podstawową niedogodnością w ocenie po zakończeniu procesu jest to, że nie jest możliwa korekta w trakcie obróbki. Drugą niedogodnością jest brak możliwości wykrywania braków. Byłoby to możliwe przy sprawdzaniu każdej z wykonywanych części.

Potrzeba elastyczności i efektywności wytwarzania oraz wysokiej jakości produktu we współczesnym środowisku wytwórczym wymusza konieczność aktywnej kontroli chropowatości. Kontrola aktywna pozwala na identyfikowanie powierzchni obrobionej ze zdefiniowaną tolerancją bez potrzeby przerw w produkcji. Stworzenie systemu monitorowania jest kluczowym zagadnieniem w kontrolowaniu chropowatości powierzchni produktu.

W literaturze można znaleźć informację o wiele próbach zastosowania klasycznych metod off-line w aktywnej kontroli chropowatości. Jedno z zastosowań pozwala na wykorzystanie mikroskopu sił atomowych zamontowanej na maszynie współrzędnościowej do oceny jakości powierzchni obrobionej na dużych częściach maszyn [CHI99, BRA99].

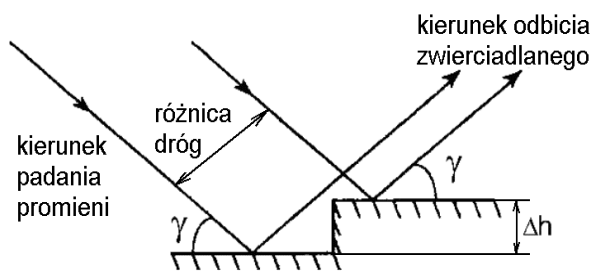
Do monitorowania chropowatości powierzchni stosuje się też [MIE96-1] sztuczne sieci neuronowe w celu integracji różnych sygnałów diagnostycznych. Największe osiągnięcia uzyskano stosując wartości charakterystyczne widmowej gęstości mocy sygnału wibroakustycznego [GAW00].

W pomiarach chropowatości powierzchni należy zwrócić uwagę na trzy aspekty: rozdzielczość definiowaną jako najmniejszą zmianę w rozmiarze, którą system może potencjalnie wykryć w idealnych warunkach, powtarzalność odnoszącą się do rozproszenia wartości pomiaru, dokładność odnoszącą się do bieżącego odchylenia między wartością prawdziwą i mierzoną [WEB99].

Otrzymana w wyniku pomiaru chropowatość powierzchni nazywana jest zmierzoną lub zaobserwowaną. W rozważaniach teoretycznych chropowatość jest traktowana jako realizacja stacjonarnego procesu ergodycznego.

2.3.1. Kryterium Raleigha

By można było mierzyć chropowatość musi być ona ściśle zdefiniowana. Powierzchnia może być rozważana jako optycznie chropowata lub gładka za pomocą kryterium Raleigha, które wykorzystuje model promienia świetlnego do opisanego zależności między długością fali padającego światła λ , kątem padania γ i różnicą wysokości mikronierówności powierzchni Δh . Rozważmy dwa padające promienie świetlne padające na tę powierzchnię (rys. 16). Promień świetlny padając na niższy stopień przebywa drogę dłuższą o $\Delta s = 2\Delta h \sin \gamma$ w porównaniu z drugim promieniem światła padającym na wyższy stopień.



Rys. 16. Kryterium Raleigha

Sumując promienie padające w jednej fazie, różnica drogi między promieniami jest wynikiem różnicy faz $\Delta\phi$ odbitych promieni

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s = \frac{4\pi \Delta h}{\lambda} \sin \gamma, \quad (12)$$

gdzie:

λ - długość fali padającego światła [m],

γ - kąt padania promieni świetlnych [rad],

Δs - różnica drogi promieni świetlnych [m].

Jeżeli nie ma różnicy faz między promieniami odbitymi, to całkowita energia jest sumą algebraiczną energii promieni padających, które kierowane są dokładnie pod kątem γ , przy założeniu gładkiej powierzchni $\Delta h = 0$.

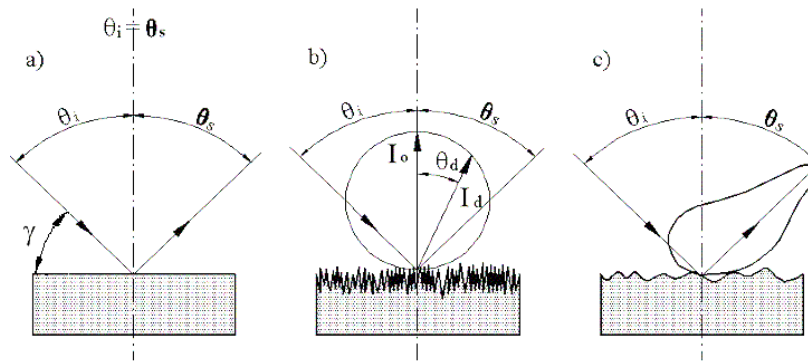
Jeżeli wysokość stopnia wzrasta i różnica faz wynosi π , to energia odbita w kierunku zwierciadlanym zbliża się do 0. Między tymi ekstremalnymi rozwiązaniami znajduje się takie, powyżej którego powierzchnia może być uważana za efektywnie chropowatą.

Proponowana wartość rozwiązania to $\Delta\phi = \frac{\pi}{8}$. Stosując tą wartość stwierdza się, że

powierzchnia jest efektywnie chropowatą, jeżeli $\Delta h > \frac{\lambda}{32 \sin \gamma}$.

2.3.2. Rozpraszanie światła z powierzchni chropowatej

Technika modelowania powierzchni jako zbioru dokładnie zwierciadlanych powierzchni została opisana w [BEC63, TOR67, OGI91]. Model ten jest prawdziwy tam, gdzie nierówności chropowatości są dużo większe niż długość fali światła.



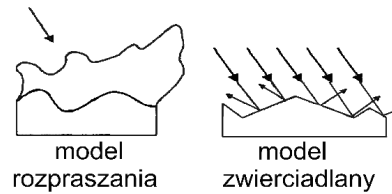
Rys. 17. Odbicie światła od powierzchni a) odbicie zwierciadlane, b) odbicie dyfuzyjne, c) odbicie od powierzchni rzeczywistej

Określenia "odbicie zwierciadlane" oraz "odbicie dyfuzyjne" są używane do opisu dwóch sytuacji ekstremalnych odbicia fal elektromagnetycznych od powierzchni materiału (rys. 17).

Odbicie zwierciadlane pojawia się jako wynik współdziałania wielokrotnie rozpraszanych i odbitych fal. Światło wykazuje czysto zwierciadlane odbicie z materiału gdy energia światła jest odbijana od materiału pod kątem równym kątowi padania. Faza odbicia zwierciadlanego jest koherentna.

Światło wykazuje się możliwością odbicia dyfuzyjnego, kiedy kierunek odbicia zwierciadlanego nie jest kierunkiem dominującym dla energii odbitej. Faza odbicia dyfuzyjnego nie jest koherentna. Mówi się o stałym przejściu od odbicia zwierciadlanego do dyfuzyjnego. Odbicie z powierzchni obrobionej toczeniem jest złożeniem obu typów odbicia.

Powierzchnię najczęściej modeluje się jako sieć połączonych płaskich zwierciadeł odbijających światło w czysto zwierciadlany sposób (rys.18). W tym modelu padające światło jest zbiorem promieni świetlnych z różnymi fazami. Promienie świetlne są odbijane z powierzchni przez pojedyncze zwierciadła powierzchni, w taki sposób, że kąt odbicia jest równy kątowi padania. Wynikiem jest odbite światło, które jest sumą wektorową, z uwzględnieniem faz, promieni w danym kierunku.



Rys. 18. Model zwierciadlany powierzchni

Model zwierciadlany nie rozpatruje pola rozproszonego inaczej niż przez przewidzenie kierunku odbicia zwierciadlanego dla każdego pojedynczego padającego promienia świetlnego na zwierciadło, podczas gdy model rozproszenia światła uwzględnia rozproszenie dyfuzyjne w zależności od lokalnej chropowatości powierzchni z wyróżnieniem kierunku energii odbicia zwierciadlanego (rys.18). Model zwierciadlany jest modelem geometrycznym, jeżeli chodzi o rozproszenie [ZAW95-1].

Rozpraszanie odnosi się do odbicia, które jest dyfuzyjne. Rozproszenie przejawia się dla różnych powierzchni chropowatych a jego wartość i natura jest funkcją chropowatości powierzchni materiału. Rozproszenie dyfuzyjne składa się z dwóch składowych: rozproszenie na nierównościach dużo większych niż długość fali światła i rozproszenie, gdzie długość fali jest porównywalna z chropowatością powierzchni. Pierwszy składnik jest wysoce kierunkowy, podczas gdy drugi jest izotropowy w swoim rozproszeniu.

Jedną z teorii rozproszenia światła jest teoria Backmanna, rozważająca statystyczne właściwości powierzchni do wyznaczenia natury odbitego światła od powierzchni. Zgodnie z nią średnia moc rozproszenia światła padającego jest funkcją chropowatości, długości fali światła padającego, kąta padania, kątów obserwacji, odległości korelacyjnej między wzniesieniami i dolinami powierzchni oraz płaskimi wymiarami powierzchni oświetlonej.

W teorii rozpraszania fal z powierzchni chropowatych używane są dwie aproksymacje – teoria zaburzeń i teoria Kirchhoffa. Teoria zaburzeń jest poprawna dla powierzchni z "małą chropowatością", gdzie pole rozpraszane jest rozpatrywane jako niewielki efekt chropowatości powierzchni. Jest sformułowana dla skalarnych i wektorowych fal oraz różnorodnych warunków brzegowych. Teoria Kirchhoffa stawia ograniczenia odnośnie właściwości powierzchni. Może być użyta dla łagodnie pofalowanych powierzchni. Skalarna teoria Kirchhoffa posiada różne sformułowania opisane w [OGI91].

2.3.3. Modelowanie powierzchni chropowatej

Mikronierówności występujące na powierzchniach rzeczywistych są najczęściej charakteryzowane za pomocą parametrów wyznaczonych dla profilu zaobserwowanego w jednej płaszczyźnie. Jest to linia przecięcia powierzchni rzeczywistej płaszczyzną prostopadłą do powierzchni przylegającej, poprowadzoną w jednym kierunku. Przy założeniu, że badana powierzchnia jest polem losowym, wariancja pierwszej pochodnej profilu (pochylenia zboczy nierówności) i drugiej pochodnej profilu (promienie zaokrąglenia wierzchołków nierówności) zależą od kierunku pomiaru. Literatura przedmiotu, w tym normy międzynarodowe, wprowadzają znormalizowane parametry dla opisu i oceny chropowatości [NOW91, SUT98].

Przyjęto wyróżniać [EWA99]:

- structured surfaces – powierzchnie funkcjonalne – powierzchnie z wzorem deterministycznym, ze zwykle wysokim współczynnikiem kształtu cech geometrycznych.
- engineered surface – powierzchnie po obróbce – powierzchnie ze optymalizowanym procesem technologicznym pod względem generowania odchyłeń w geometrii od powierzchni nominalnej.

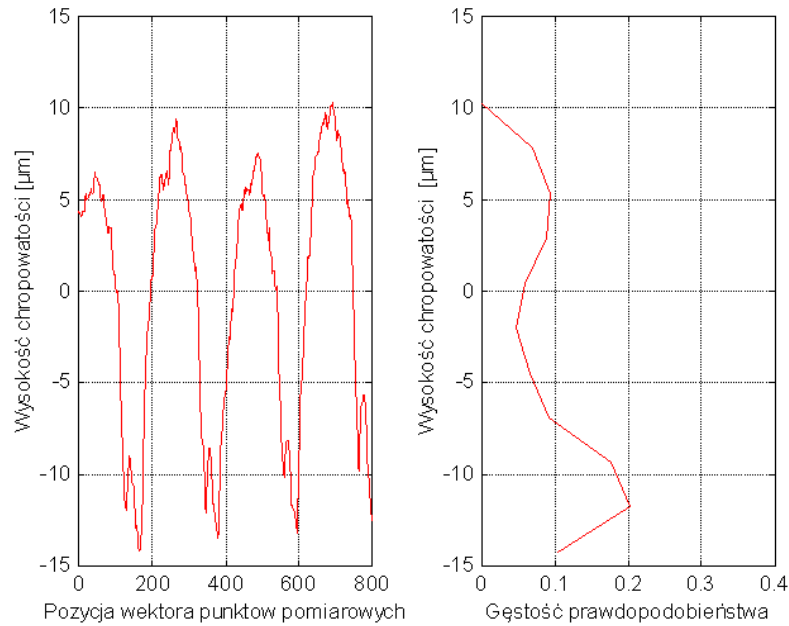
Opis powierzchni może być wykonany na różnych poziomach złożoności. Dla praktycznych zastosowań tworzone są modele wykorzystujące jeden parametr profilu.

Konwencjonalna obróbka skrawaniem to przenoszenie nierówności naroża ostrza na powierzchnię obrobioną. Postępy w toczeniu diamentem w latach siedemdziesiątych pozwoliły na otrzymanie funkcjonalnych powierzchni o wysoce zbliżonych parametrach chropowatości [KAW98, FAN98, DUC99].

Powierzchnie funkcjonalne są słabo opisywane parametrami chropowatości przyjętymi dla powierzchni obrobionych i trudno mierzalne z użyciem metod konwencjonalnych. Powierzchnie funkcjonalne różnią się od pozostałych wysokim współczynnikiem kształtu i nachylenia powierzchni [EWA99].

Wyróżniono w [PN-87/M-04256/02², GOR83, NOW91, DON94] ponad trzydzieści parametrów, rozkładów i funkcji opisujących cechy profilu chropowatości, które w zależności od właściwości klasyfikowane są następująco: cechy wysokościowe i horyzontalne, kształt nierówności, rozkłady statystyczne, parametry rozkładów, funkcje częstotliwościowe. Nie ma jednoznacznie wyróżnionej grupy parametrów, które byłyby ważniejsze lub dawały więcej informacji niż pozostałe. Nie ma jednoznacznie wybranej metody lub aparatury, którą należałoby zastosować w zautomatyzowanych systemach produkcyjnych [WIE96-1].

² PN-87/M-04256/02 „Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Terminologia ogólna”



Rys. 19. Profil powierzchni obrabianej dla odcinka elementarnego i gęstość prawdopodobieństwa wierzchołków w skrawaniu z użyciem noża bez pokrycia, dla posuwu 0,21mm/obr, prędkości skrawania 187,5 m/min i czasu skrawania 11 minut

Odchylenie rzeczywistej powierzchni od modelowej powierzchni odniesienia jest reprezentowane przez funkcję $h(r)$, gdzie h jest odległością powierzchni od powierzchni odniesienia a r jest pozycją wektora punktów na powierzchni odniesienia (rys. 19). Rozkład wysokości powierzchni jest opisywany przez statystyczny rozkład wysokości $p(h)$, gdzie $p(h)dh$ jest prawdopodobieństwem punktu powierzchni o wysokości między h i $h+dh$ od powierzchni średniej.

Wówczas jest spełniony warunek

$$\langle h \rangle_s = \int_{-\infty}^{+\infty} h \cdot p(h) dh = 0, \quad (13)$$

gdzie $\langle \dots \rangle_s$ oznacza proces uśredniania przestrzennego wzdłuż powierzchni.

Pierwiastek kwadratowy średniej wysokości powierzchni jest równy odchyleniu standardowemu i dany przez $\sigma = \sqrt{\langle h^2 \rangle_s}$.

Parametrem używanym do ilościowej oceny chropowatości powierzchni jest średnia arytmetyczna wartość bezwzględnych odchylen profilu od linii średniej w przedziale odcinka elementarnego [OGI91]

$$R_a = \int_{-\infty}^{+\infty} |h| p(h) dh. \quad (14)$$

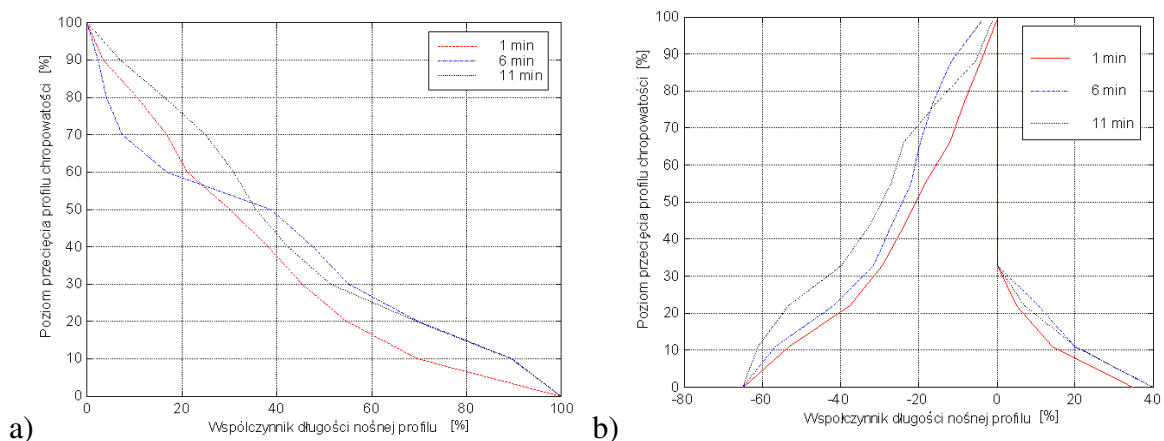
Parametr R_a jest związany z odchyleniem standardowym σ . Dla powierzchni z rozkładem normalnym wysokości nierówności $R_a \cong 0,8\sigma$. Z całej grupy parametrów chropowatości, R_a jest najczęściej używanym w kontroli technicznej. Jest to *średnie arytmetyczne odchylenie profilu*. Wartość liczbową wyliczana jest w technice cyfrowej z zależności:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n |h_r|. \quad (15)$$

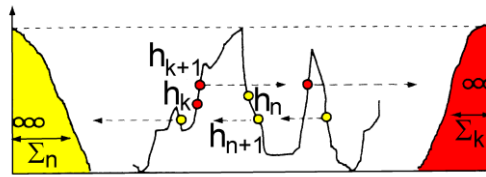
Wartość R_a mierzona jest wzdłuż jednego lub kilku odcinków elementarnych. Wartość R_a może zmieniać się wraz z kierunkiem pomiaru. Dla kątów pomiaru niewiele różniących się od kąta prostego względem śladów obróbki wartość tego parametru można uznać za niezależną od kierunku pomiaru. Interpretacją geometryczną tego parametru jest prostokąt o wysokości równej R_a wpisany w profil o długości odcinka pomiarowego.

Wartości liczbowe parametru R_a związane są w sposób pośredni z objętością materiału lub objętością smaru, które mogą być zawarte we wgłębieniach nierówności. Parametr ten wykazuje ścisły związek z odpornością na zużycie ściernie.

Według badań przeprowadzonych w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej uśrednione parametry amplitudowe takie jak R_a i R_z mają względnie stałe wartości dla różnych odstępów próbkowania w zakresie przebadanym $0,09-8\mu\text{m}$ dla powierzchni o charakterze losowym (szlifowanie i docieranie), jak i o strukturze periodycznej (toczenie, struganie i frezowanie) [TOM98].



Rys. 20. a) Udział nośny profilu chropowatości i b) częściowy udział nośny dla toczenia, z użyciem noża bez pokrycia, dla posuwu $0,21\text{mm/obr}$ i prędkości skrawania $187,5\text{ m/min}$

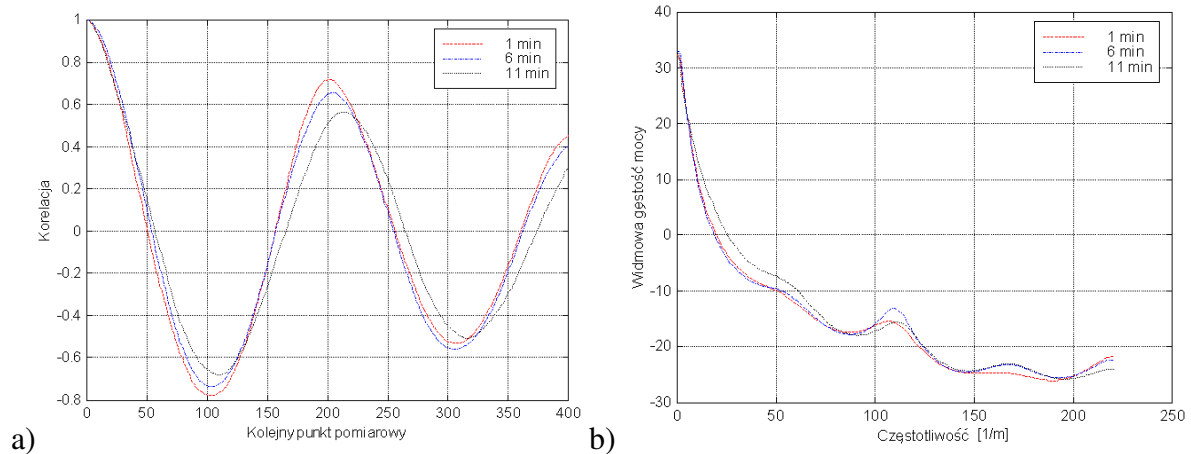


Rys. 21. Zasada tworzenia częściowego udziału nośnego [ZAW97-1]

Wśród statystycznych metod opisu chropowatości powierzchni jest metoda polegająca na analizie rozkładu długości profilu w funkcji poziomu jego wyznaczenia - zwana udziałem nośnym [STO95]. Klasyczne zestawienie udziału nośnego przedstawia rysunek 20a. Zaproponowano w literaturze tworzenie częściowego udziału nośnego. Istotę jego tworzenia przedstawiono na rysunku 21.

Po przetworzeniu profilu do postaci cyfrowej ze stałym krokiem dyskretyzacji na odcinku elementarnym, to jeżeli $h_k < h_{k+1}$ wtedy następuje wznoszenie profilu i tworzona jest pobocznica prawa. Jeżeli dla dwóch sąsiednich punktów spełniony jest warunek $h_n > h_{n+1}$, świadczy to o opadaniu profilu i tworzona jest pobocznica lewa (rys. 21). Częściowy udział nośny umożliwia nowy sposób modelowania, daje wgląd w naturę i historię powierzchni. Całkowity udział nośny złożony z lewego i prawego, częściowych udziałów nośnych, uwidacznia niesymetryczność powierzchni obrobionej w toczeniu oraz słabą zgodność z rozkładem Gaussa. Powierzchnie po toczeniu zawsze mają pozytywną skośność (rys. 20b) [STO98, STO95].

Rozkład prawdopodobieństwa wysokości dwóch punktów umożliwia opis korelacji i struktury w obrębie profilu powierzchni. Funkcja autokorelacji ACF i widmowej gęstości mocy PSD (rys. 22) są stosowane do opisu profilu powierzchni. Funkcja autokorelacji jest najbardziej popularnym podejściem w inżynierii produkcji, podczas gdy widmowa gęstość mocy jest bardziej rozpowszechniona w modelowaniu rozproszenia ze względu na silne związki widmowej gęstości mocy powierzchni i intensywności rozproszenia światła z powierzchni [ZAW95-2].

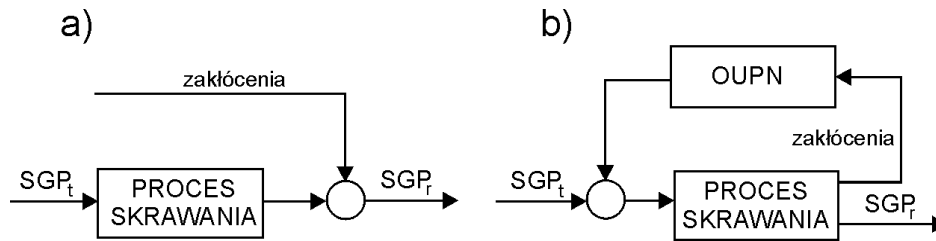


Rys. 22. a) Funkcja autokorelacji chropowatości powierzchni obrabianej b) widmowa gęstość mocy powierzchni obrabianej estymowana metodą Burga, dla toczenia z użyciem noża bez pokrycia, dla posuwu 0,21 mm/obr, prędkości 187,5 m/min

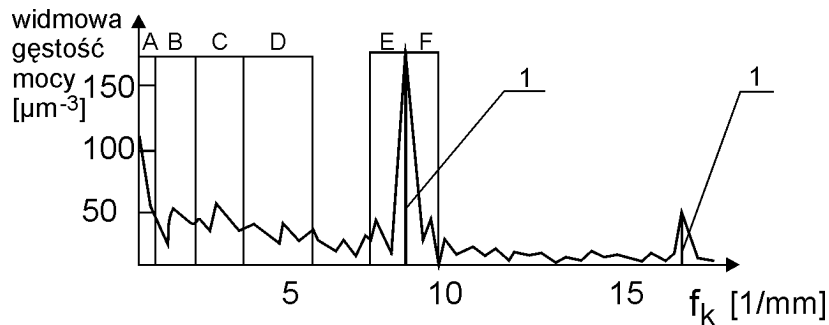
Dla powierzchni anizotropowych podstawowa energia widma mocy jest skoncentrowana prostopadle do kierunkowości. Dla powierzchni okresowej wartość maksymalna widma mocy jest skoncentrowana na częstotliwości okresowości i wzdłuż tego samego kierunku.

Jeśli zjawiska na powierzchni są okresowe, to i funkcja autokorelacji wykazuje okresowość. Dla powierzchni anizotropowych funkcja autokorelacji ma większy spadek w poprzek kierunkowości i mniejszy spadek wzdłuż kierunkowości. Współczynnik zanikania funkcji autokorelacji jest zdominowany przez znaczące składowe częstotliwości [DON94, WIE96-2].

W pracy [FEL91] przedstawiono metodę diagnozowania stanu technicznego obrabiarki i monitorowania procesu skrawania wykorzystującą założenie, że funkcjonowanie obrabiarki, związane z wykonywaniem powierzchni przedmiotu, jest procesem kodowania informacji o stanie technicznym obrabiarki i przebiegu procesu skrawania. Uznano, że odwzorowanie stereometryczno-kinematyczne jest superpozycją układu OUPN z zakłóceniami wprowadzanymi przez ten układ. Stwarza to warunki do monitorowania procesu skrawania przez badanie zależności „metodą wejście-wyjście” między składowymi strukturą geometrycznej powierzchni rzeczywistej (SGP_r) i teoretycznej (SGP_t) (rys. 23). Częstotliwości poszczególnych uszkodzeń charakteryzują się zróżnicowanym co do wartości pasmem częstotliwości, pozwalając tym samym na selektywną identyfikację źródeł uszkodzeń oraz na wydzielenie składowych związanych z procesem skrawania (rys. 24).



Rys. 23. Ideowy schemat blokowy układu konstytuowania SGP a) układ otwarty, b) układ zamknięty [FEL91]



Rys. 24. Widmowa gęstość mocy powierzchni toczonej z zaznaczonymi pasmami częstotliwościowymi uszkodzeń i prążkami odwzorowania stereometryczno-kinematycznego, 1-odwzorowanie stereometryczno-kinematyczne, A – ugięcie tulei wrzeciona, B – uszkodzenie bieżni wewnętrznej łożyska wrzeciona, C – uszkodzenie bieżni zewnętrznej łożyska wrzeciona, D – uszkodzenie elementu tocznego łożyska, E – niestabilność posuwu suportu [FEL91]

Identyfikacja pracującego nieprawidłowo elementu obrabiarki i określenie stanu zużycia narzędzia opiera się na porównaniu widmowych gęstości mocy profilu powierzchni obrabianej z wzorcowymi. „Widmowa gęstość mocy powierzchni obrabianej wyznaczana na podstawie badań doświadczalnych ma charakter ciągły, prążki odpowiadające poszczególnym oddziaływaniom układu OUPN i procesu obróbki są rozmyte, w wielu przypadkach występuje przykrywanie się składowych harmonicznymi wyższych rzędów” [NOW91].

2.3.4. Pomiary chropowatości i aktywna kontrola chropowatości

Metody wyznaczania chropowatości powierzchni obrabianej wymagają najczęściej bezpośredniego kontaktu z powierzchnią. Ogranicza to w znaczący sposób listę metod przydatnych w aktywnej kontroli, gdyż wymagane jest, aby nie było trudności z:

- szybkością pomiaru, ograniczoną potrzebą fizycznego kontaktu z powierzchnią,
- nieciągłością powierzchni, którą jest trudno kontrolować, gdyż wierzchołek igły profilometru musi być kierowany dookoła każdej nierówności [ZHA92],
- rysowaniem powierzchni przez igłę profilografometru,
- izolacją przyrządu od wibracji, co jest trudnym wymogiem w środowisku obróbkowym,

- wyznaczeniem parametrów chropowatości dla dowolnej liczby przejść, które byłyby reprezentatywne dla całej powierzchni,
- oczyszczeniem powierzchni z cieczy chłodząco-smarujących, kurzu i innych zanieczyszczeń. Najczęściej powierzchnia jest czyszczona, mierzona i znowu smarowana, co jest kosztowne w zastosowaniu [GOC99, NOW91].

Urządzenia do pomiaru chropowatości dają możliwość wyznaczenia profilu 2D lub obszaru 3D. Niektóre umożliwiają jednoczesną ocenę zarówno parametrów profilu, jak i stereometrycznych cech chropowatości. Należy uwzględnić, że przenoszenie wyników pomiarów z metod powierzchniowych na liniowe obarczone jest znacznym błędem [KAC95].

Większość metod pozwala ocenić jakość powierzchni przedmiotu obrabianego jedynie po zakończeniu obróbki, a ograniczeniem są gabaryty przedmiotu, jego waga i nawet zakres chropowatości. Dokładność metody pomiarowej wpływa istotnie na wiarygodność pomiarów [PAJ00].

Tablica 2. Zestawienie zakresów pomiarowych różnych metod pomiaru chropowatości [NOW91]

Metoda pomiaru	Zakres pomiarowy [μm]
Profilometr (mechaniczny)	$R_a = 0,01-10$
Wielopunktowa	$R_a \geq 0,3$
Przenikania	$R_a \geq 0,6$
Przekroju świetlnego	$R_z = 0,8-60$
Interferencyjna	$R_t = 0,02-1,5$ oraz $R_t = 0,005-10$
Reflektometryczna	$R_a < 1,0$
Kontrastu plamek	$R_a = 0,01-3,0$
Dyfrakcyjna	$R_a < 0,2$
Pneumatyczna	$R_a > 0,5$
Pojemnościowa	$R_a = 0,05-2,5$

Aby daną metodę lub przyrząd można było zastosować w aktywnej kontroli chropowatości musi ona dawać możliwość łatwego włączania w systemy sterowania obrabiarek i łatwość wzorcowania na obrabiarce. Czas pomiaru powinien wynosić 0,1 - 1s przy niedokładności pomiaru rzędu 10-20%.

Przeгляд aktywnych metod pomiaru chropowatości pozwala na uszeregowanie ich w grupy: stykowe, elektryczne, pneumatyczne, ultradźwiękowe, optyczne (reflektometryczne, plamkowe, dyfrakcyjne, igły optycznej, rastrowe) [NOW91].

2.3.5. Mikrosteriometrija powierzchni

Trójwymiarowa metoda pomiaru chropowatości powierzchni obrabianej wymaga wykonywania dużej liczby pomiarów na określonej powierzchni przez wielokrotne uzyskiwanie profili powierzchni, przez tak zwane skanowanie [NOW91]. Najczęstszym sposobem prezentacji wyników pomiarów są rysunki izometryczne lub warstwiczne mapy topograficzne. Istotną zmianą w prezentacji wyników pomiarów jest sposób przekazywania prognozowanej powierzchni styku [KAC95].

Różnice wartości wyznaczanych parametrów dwuwymiarowych i trójwymiarowych wynikają z faktu, że różna jest liczba punktów pomiarowych oraz, że w ocenie trójwymiarowej uwzględniana jest anizotropowość mikrostruktury powierzchni.

Pomiary mikrosteriometrii powierzchni realizowane są za pomocą profilometrów stykowych lub z igłą optyczną, wyposażonych w stoliki pomiarowe, umożliwiające przemieszczenie w kierunku poprzecznym, mikrointerferometrów, przyrządów wykorzystujących struktury ciekłych kryształów, skaningowych mikroskopów tunelowych. Dane o mikrosteriometrii powierzchni (topografii, stereometrii) są coraz powszechniej wykorzystywane [JON97, KAC86, KLI96, OCZ98-1, OHL94, KAC99, CHI00].

Przyrządy, które pozwalają wyznaczyć parametry mikrosteriometrii, dają wyniki oznaczane symbolem S (surface), np. SR_a .

Dodatkowe funkcje przyrządów pozwalają wyznaczyć rozkłady objętości wierzchołków i wgłębień, wymiary liniowe i pola powierzchni elementarnych wierzchołków i wgłębień oraz ich rozkłady, współczynniki opisujące anizotropię powierzchni, powierzchniową gęstość wierzchołków, względne rozwinięcie rzeczywistej powierzchni.

W badaniach mikrosteriometrii nie udało się osiągnąć zadowalających wyników odnośnie ujednoliconych parametrów opisujących cechy mikronierówności, zasady doboru pól pomiarowych, zasady filtracji powierzchni [DON94, CHI00].

2.3.6. Pomiary optyczne

Systemy profilometrii laserowej oraz tablice liniowe diod, przez pomiar intensywności światła rozproszonego, dają możliwość uzyskiwania szybszych pomiarów niż metody profilometryczne, ale ich niedostatkim jest brak możliwości kompleksowego charakteryzowania topografii powierzchni.

Pomiar optyczny powinien łączyć w sobie oczekiwanie dużej szybkości systemów laserowych, dokładności porównywaną z dotykowymi technikami pomiaru profilu,

możliwości wyznaczania statystycznych danych wyższego rzędu powierzchni ze śladów powierzchni oraz dużego obszaru obserwacji.

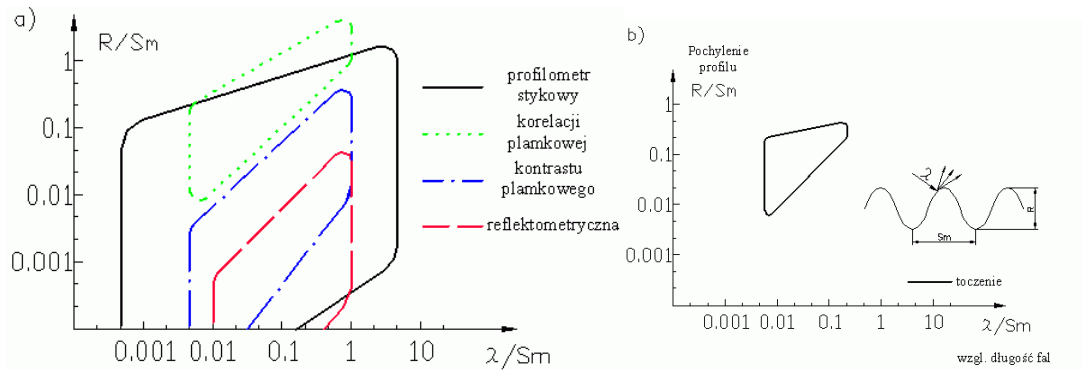
Większość metod optycznych wykorzystuje światło koherentne (laserowe) do oświetlenia punktu na powierzchni ocenianej, a tablica (liniowa lub siatkowa) fotodetektorów pozwala ocenić intensywność światła odbitego w różnych punktach dookoła powierzchni. Techniki optyczne dzielą się na dwie kategorie: profilowe i obszarowe. Optyczne techniki profilowe podzielono na trzy podkategorie: przekroju optycznego, interferometrii i detekcji ogniskowej. Optyczne pomiary obszarowe wykorzystują w modelach teorię rozpraszania światła. Zależność chropowatości powierzchni i kąтового rozkładu światła jest ustalana metodami empirycznymi [WHI94] lub przez zastosowanie bezpośrednio teorii rozpraszania [CHU79].

Ograniczenie użycia optycznych metod w aktywnej kontroli wynika z trudności związanych z rejestracją obrazu strefy obróbki oraz z zakłóceń powstających przede wszystkim z obecności cieczy obróbkowych. Znane metody pomiaru to:

- reflektometryczna, która zastosowana została w przemyśle. Ocena chropowatości opiera się na analizie natężenia światła odbitego od mierzonej powierzchni, przy użyciu liniału CCD. Analiza komputerowa rozkładu natężenia tego światła umożliwia wyznaczenie optycznego parametru chropowatości, w którym występują statystyczne związki z wysokością chropowatości. Ocena nierówności powierzchni metodami rozproszenia światła dokonywana jest na podstawie pomiarów: natężenia światła odbitego zwierciadlanie, całkowitego natężenia światła, kąтового rozkładu natężenia światła odbitego od powierzchni. Zakres metody obejmuje nierówności $0,1 \div 1,0 \mu m$ [KAR00, LUK00, OGI91],
- plamkowa, która wykorzystuje efekt interferencji światła spójnego odbitego od chropowatej powierzchni. W przestrzeni nad powierzchnią, wskutek interferencji światła odbitego od mikropowierzchni usytuowanych w różnych miejscach i pochyłonych pod różnymi kątami powstaje obraz w postaci jasnych i ciemnych plamek. Miarą chropowatości jest kontrast tych obszarów definiowany jako stosunek rozstępu natężenia światła do jego wartości średniej. Zakres metody obejmuje nierówności $0,03 \div 0,25 \mu m$ [NOW90],
- interferencyjna, wykorzystująca zjawisko interferencji światła odbitego od powierzchni mierzonej oraz powierzchni odniesienia, które umożliwia wizualizację profilu chropowatości oraz pomiar jego wysokości, podziałki i innych, zbliżonych w swoim charakterze parametrów. Zakres metody obejmuje nierówności $0,02 \div 1,5 \mu m$ [WHI94],

- przekroju świetlnego, polegająca na oświetleniu powierzchni chropowatej pod pewnym kątem α przez wąską szczelinę. Powierzchnia obserwowana przez mikroskop ustawiona jest pod dwukrotnie większym kątem 2α względem układu oświetlającego. W mikroskopie obserwacyjnym widoczny jest zdeformowany przez mikronierówności obraz szczeliny układu optycznego mikroskopu oświetlającego. Deformacje mają charakter zbliżony do profilu chropowatości. Na ich podstawie można określić położenie kształt i wymiary mikronierówności. Zakres metody obejmuje nierówności $0,8 \div 63 \mu m$ [NOW91],
- dyfrakcyjna, polegająca na tym, że powierzchnię mierzoną oświetla się wiązką światła koherentnego, która ulega modulacji fazowej i po transformacji przez układ optyczny otrzymuje się w płaszczyźnie Fouriera widmowy rozkład światła. Rozkład kątowy natężenia światła, któremu odpowiadają odległości między jasnymi plamkami, zależy od podziałki chropowatości, natomiast natężenie oświetlenia plamek zależy od wysokości nierówności. Zakres metody obejmuje nierówności $R_a \leq 0,1\lambda$ [WHI94],
- igły optycznej, która jest metodą szybką i bezkontaktową pomiaru profilu. W metodzie tej ostrze igły zastąpiono bardzo silnie rozogniskowaną wiązką światła. Zakres metody obejmuje nierówności $0,1 \div 20 \mu m$ [NOW91],
- aktywnej oceny chropowatości powierzchni z wykorzystaniem geometrii fraktalnej, polegająca na tym, że system zbiera zdjęcia powierzchni z wykorzystaniem kamery CCD. Z obrazu szacowana jest wartość wymiaru fraktalnego. Istnieje silna korelacja między policzonym obszarowym wymiarem fraktalnym a parametrem R_a . System z wykorzystaniem wymiaru fraktalnego jest mniej wrażliwy na zmienność ustawień oświetlenia niż systemy z wykorzystaniem innych parametrów optycznych. Prototyp urządzenia pomiarowego z wykorzystaniem geometrii fraktalnej pracował z prędkością 254 m/min. Sprawdzano go dla $R_a = 0,23 \div 0,7 \mu m$ [ZHA94].

Istniejące przyrządy wykorzystujące teorię rozpraszania światła dają się wykorzystać w różnych obszarach zmian parametrów (rys. 25a). Zakresy zestawiono do dwóch stosunków: wysokości profilu do jego podziałki i długości fali stosowanego źródła światła do podziałki chropowatości. Widać, że zakres profilometru stykowego jest większy niż metod optycznych.



Rys. 25. a) Zakres potencjalnych zastosowań optycznych metod pomiaru chropowatości, b) zakres cech profilu powierzchni obrabianych za pomocą toczenia [NOW91]

Dodatkowo na rysunku 25b przedstawiono zakres cech profilu chropowatości powierzchni obrabianych za pomocą toczenia. O ile można je zmierzyć za pomocą profilometru stykowego, to może być niemożliwym zastosowanie niektórych metod optycznych.

2.4. Zastosowanie obrazu powierzchni obrabianej do oceny chropowatości powierzchni

Obraz powstaje wskutek odbicia promieni świetlnych od powierzchni chropowatej. Obraz trafia do kamery, gdzie przetwarzany jest na sygnały elektryczne. Na powstający w kamerze obraz mają wpływ: widmowe współczynniki odbicia, przepuszczania i pochłaniania światła oraz kształt i relacje topologiczne między mikronierównościami, cechy przestrzenne i widmowe źródła oświetlenia, odwzorowanie obrazu źródłowego jako rzutu perspektywicznego na płaszczyźnie przetwornika optoelektrycznego [MAT91].

Jasność lub cień na powierzchni zależy od jej kształtu. Pozwala to na matematyczne odwzorowanie kształtu mikronierówności na podstawie jasności obrazu płaskiego, jeśli znane są: położenie źródła światła oraz współczynnik odbicia powierzchni [FIS99, SAT94, STO94].

2.4.1. Cyfrowa reprezentacja obrazu

Cyfrową reprezentację obrazu stanowi macierz liczb całkowitych reprezentowanych przez określoną liczbę bitów. Jest wynikiem procesu dyskretyzacji obrazu rzeczywistego. Na proces ten składają się próbkowanie i kwantowanie [PAV87, SKA93, TAD97, WOZ96, SON99].

Próbkowanie polega na podziale całego obrazu na małe, jednakowej wielkości, regularnie rozmieszczone fragmenty. W ten sposób ciągły obraz zostaje zamieniony na macierz punktów - liczb. Z twierdzenia Shannona o próbkowaniu wynika, że minimalna gęstość próbkowania nie powodująca utraty informacji ma wartość dwukrotnie większą od maksymalnej częstotliwości występującej w widmie.

Kwantowanie polega na zastąpieniu ciągłego przedziału liczbowego, odpowiadającego wartościom jasności punktów nieskwantowanego obrazu od bieli do czerni, skończonym zbiorem wartości z tego przedziału. Liczbę poziomów jasności można wyrazić jako 2^N , gdzie N oznacza liczbę bitów w reprezentacji binarnej [MAR99, SYD88].

Skarbek [SKA93] definiuje matematycznie obraz cyfrowy I jako funkcję z przestrzeni pikseli P do przestrzeni kolorów $C: I:(P) \rightarrow C$, gdzie (P) jest skończonym zbiorem pikseli. Wyprecyzowanie nośnika przestrzeni kolorów C prowadzi do wyróżnienia pewnych klas obrazów: obrazy k-spektralne, obrazy RGB, obrazy z poziomami szarości, obrazy binarne.

2.4.2. Cyfrowy obraz powierzchni obrobionej

Cyfrowy obraz powierzchni stali obrobionej toczeniem uwidacznia ślady trajektorii naroża ostrza z dostrzegalną deformacją plastyczną (rys. 26).

Z teksturą na obrazie lub jego wybranego obszaru mamy do czynienia jeśli intensywność w obrębie tego obszaru jest w pewien sposób regularna. Tę regularność tekstury, w analizie obrazów można wykryć różnymi metodami, zawierającymi analizę widma fourierowskiego obrazu, geometrię krawędzi, albo przez progowanie. Taka analiza daje informację o obecności tekstury nawet dla nieznanego powiększenia lub niezdefiniowanego bloku podstawowego [TAU98, TOM96].

Rzeczywiste tekstury są złożone, element podstawowy rzadko jest prostokątny, a jego regularność jest stochastycznej natury. Człowiek prosto i łatwo analizuje tekstury. Rozpoznaje on teksturę w ten sposób, że najpierw wyławia szczegóły, które następnie łączy w struktury. Może skoncentrować się na szczegółach, odkryć globalne trendy, różnice gęstości, zaburzenia w jednorodności. Czasem – szczególnie dla słabych tekstur – poziomy jasności lub rozkład jasności są informacją decydującą o rozpoznaniu [MAL90-1, ROG95].



Rys. 26. Cyfrowy obraz powierzchni obrobionej dla posuwu 0,21mm, prędkości 187,5 m/min i czasu skrawania 6 min dla różnych sposobów oświetlenia a) oświetlenie dwustronne b) oświetlenie przeciwne do kierunku posuwu c) oświetlenie zgodne z kierunkiem posuwu

Tekstura odnosi się do właściwości, które reprezentują powierzchnię lub strukturę obiektu. Jest powszechnie używana i intuicyjnie zrozumiała. Nie ma jednak precyzyjnej definicji ze względu na zróżnicowanie cech wykorzystywanych do jej określenia. Można zdefiniować teksturę jako całość lub część obrazu składającą się z wzajemnie powiązanych elementów i widoczne jest wówczas, że zależna jest od powiększenia [YOS98].

W ten sposób zdefiniowana tekstura składa się z elementów tekstury (texals). Są nimi grupy pikseli lub elementy porównywalne z rozmiarem piksela. Jeśli elementy tekstury są małe i jeśli ich tonalne różnice między sąsiednimi elementami są duże to używa się określenia gładkiej tekstury (fine). Jeśli elementy tekstury są większe i składają się z kilku pikseli to określa się ją jako teksturę szorstką (coarse). Charakterystyki szorstkości tekstury zależą znacząco od powiększenia [AKS00, KAR99-1].

Tekstura może być klasyfikowana, w zależności od „siły oddziaływania” (wyrazistości elementu podstawowego), jako słaba lub silna. Słabe tekstury mają małe przestrzenne wzajemne zależności i mogą być opisane przez częstotliwość pojawiania się typów elementów w sąsiedztwie przestrzennym. Ze względu na to wiele tekstur statystycznych jest określonych z wykorzystaniem modelu słabych tekstur. W silnych teksturach przestrzenne wzajemne zależności między elementami są regularne. Dla silnych tekstur, częstotliwość pojawiania się par elementów w sąsiedztwie przestrzennym jest znacząca [HAR79]. Rozpoznawanie silnych tekstur jest połączone z definicją elementów podstawowych tekstur i ich przestrzenną współzależnością.

W tej pracy uznano za definicję tekstury jedną z siedmiu definicji zamieszczonych w pracy [CHE98] oraz podaną w [SON99]. „Obszar obrazu posiada stałą teksturę jeśli zbiór jej lokalnych właściwości w tym obszarze jest stały, wolnozmienny lub aproksymacyjnie okresowy”. Zbiór lokalnych właściwości może być rozumiany jako typ elementu i jego przestrzenne powiązanie. Ważną częścią tej definicji jest to, że właściwości są powtarzalne wewnątrz pola tekstury, a rozdzielczość obrazu (skala) jest stałym elementem opisu tekstury.

2.4.3. Modelowanie obrazu powierzchni obrobionej

Klasyfikacja tekstur oznacza tworzenie mapy klasyfikacji obrazu wejściowego, gdzie każdy jednolity obszar jest identyfikowany z klasą tekstury do której należy [TUC98]. Klasyfikacja tekstur polega na wyznaczeniu, która z wcześniej zdefiniowanych tekstur jest najbardziej podobna w sensie miar statystycznych do zadanej. Klasyfikacja jest o tyle trudna, że ta sama tekstura może pojawić się w różnej skali, odległości, oświetleniu, punkcie obserwacji [BOS99, KUR97, MAL90-1, TAD91, SCH92].

Klasyfikator składa się z algorytmów wyznaczających zależne komponenty sygnału, z mechanizmu do przetwarzania tych komponentów i z mechanizmu dyskryminacji do klasyfikowania na bazie tych informacji. Proces klasyfikacji dzieli się na trzy etapy: pomiar, ekstrakcję cech i dyskryminację.

Pomiar polega na pozyskaniu obrazu cyfrowego. Ma fizyczne znaczenie ale jego wynik jest w swojej formie niewystarczający do klasyfikacji i dlatego wymagane jest jego dalsze przetwarzanie.

Wykorzystuje się dwie techniki modelowania tekstur – statystyczne i strukturalne. W metodach statystycznych obliczane są wartości właściwości tekstur dla elementu tekstury porównywalnego z rozmiarem piksela [GIM99, HAR86]. Metody strukturalne i hybrydowe (złożenie statystycznych i strukturalnych) bardziej pasują do opisu tekstur, gdzie elementy mogą być oznaczone typem elementu podstawowego. Elementy te są opisywane z użyciem większej liczby właściwości niż tylko tonalne (np. opis kształtu) [SUK98]. Z uwagi na charakter obrazu cyfrowego powierzchni obrobionej w badaniach zastosowano statystyczne metody opisu tekstur.

W metodach statystycznych przyjmuje się, że piksel z jego poziomem szarości jest najprostszym prymitywem obrazu cyfrowego. Rozkład poziomów jasności piksela jest opisany przez statystyki pierwszego rzędu takie jak średnia, wariancja, skośność czy kurtoza lub drugiego rzędu, takie jak prawdopodobieństwo dwóch pikseli posiadających pewne poziomy szarości w przestrzennych zależnościach. Te informacje są sumowane w dwuwymiarowych macierzach sąsiedztwa, liczonych dla różnych odległości i kierunków. Stwierdzono, że tak wyznaczone macierze dla szorstkich tekstur zmieniają się niewiele z odległością, podczas gdy dla gładkich tekstur zmieniają się gwałtownie z odległością [WAL97, AKS98].

Przydatność cechy tekstury ocenia się na podstawie jej zdolności do klasyfikacji tekstur. Cechy są funkcjami pomiarów, które umożliwiają rozróżnienie jednej klasy od drugiej w obrębie tej samej kategorii. W klasyfikacji tekstur cecha może być funkcją opisującą ziarnistość, regularność lub jasność. Zgodnie z powyższym ekstrakcja cech może służyć dwóm celom: redukcji wymiarowości lub opracowania cech bardziej przydatnych do procesu decyzyjnego [SWO97, NAL00, PAY99].

W wyniku zastosowania metod opisu tekstury otrzymywany jest wynikowy wskaźnik, który jest w swojej formie idealny w dyskryminacji. Używanych jest zwykle wiele cech związanych z pikselem, a traktowanych jako ortogonalne i grupowane razem jako wektor cech. Funkcja dyskryminacyjna jest stosowana do wektora cech stowarzyszonego z każdym pikselem i alokuje etykietę do piksela odnośnie do estymowanej klasy [IVE94, OJA96, HAR73].

2.4.4. Sieci neuronowe w przetwarzaniu obrazów

W literaturze [TAD93, ZUR96, NAL00] wskazano, że sieci neuronowe wykorzystuje się do klasyfikacji. Udowodniono, że każde zadanie, które można wykonać tradycyjną metodą analizy dyskryminacyjnej, może być zrealizowane przez sieć neuronową [NAL00].

Sieć neuronowa w tym zastosowaniu jest uniwersalnym układem aproksymującym odwzorowującym wielowymiarowe zbiory danych. Umożliwia tworzenie modeli nieliniowych procesów [BIA00]. W teorii sieci neuronowych neuron opisywany jest następująco:

- do neuronu dociera pewna liczba sygnałów wejściowych,
- każda wartość wprowadzana jest do neuronu przez połączenie o pewnej wadze,
- każdy neuron posiada jedną wartość progową,
- w neuronie obliczana jest ważona suma wejść,
- sygnał reprezentujący łączne pobudzenie neuronu przekształcany jest przez ustaloną funkcję aktywacji neuronu [NAL00, TAD93, SKO94, KAC94].

Wyróżnia się sieci neuronowe o strukturze jednokierunkowej, rekurencyjnej i komórkowej. W sieci jednokierunkowej informacja przepływa w jednym kierunku od wejść, poprzez kolejne neurony ukryte, do wyjść. Struktura takiej sieci charakteryzuje się stabilnym zachowaniem [ZUR96].

Aproksymacja przez sieć neuronową obrazu pierwotnego jest nieefektywna lub nawet niemożliwa. Związane jest to z ograniczeniem rozmiaru wektora wielkości wejściowych występujących w układzie aproksymującym. Wymagane jest zatem wykorzystanie bloku przetwarzania wstępnego, którego zadaniem jest transformacja zarejestrowanych obrazów do takiej reprezentacji, która będzie stosowna do wykorzystania na wejściu sieci neuronowej. Wykorzystuje się ekstrakcję cech, która powoduje znaczną zmianę rozmiaru pierwotnego obrazu oraz wzmocnienie kontrastu między próbkami. Wybór metody ekstrakcji zależy od sposobu reprezentacji danych i celu przetwarzania.

W dalszej kolejności prócz ekstrakcji cech stosuje się też selekcję cech. Wybór cech jest ściśle związany z tym, jakiego typu tekstury mają być rozpoznawane. Reprezentacją obiektu jest wektor cech. Wartości wektora cech określają położenie badanego obiektu w przestrzeni cech. Wymiar przestrzeni cech jest liczbą cech przyjętych do opisu obiektu.

2.5. Wnioski z przeglądu literatury

Między powierzchnią przyłożenia naroża ostrza a powierzchnią obrobioną zachodzą związki wzajemnego oddziaływania, przy czym związki te są tym bardziej widoczne, im szersze jest wytarcie na ostrzu. Początkowo, podczas docierania trybologicznej pary ostrze – powierzchnia obrobiona chropowatość powierzchni nieznacznie się zmniejsza i osiąga pewien poziom, który jest charakterystyczny dla zużycia ostrza przebiegającego ze stałą intensywnością. Chropowatość powierzchni obrobionej utrzymuje się na tym poziomie do czasu, gdy ostrze przechodzi w stan zużycia przyspieszonego. Wtedy chropowatość rośnie wraz ze wzrostem wytarcia na ostrza. Tendencje zmian chropowatości powierzchni obrobionej są zatem informacją o zużyciu powierzchni przyłożenia ostrza.

Powierzchnia obrobiona może być więc rozważana jako „odcisk palca” fizycznych procesów zachodzących w strefie styku noża i powierzchni obrobionej. Obraz powierzchni obrobionej przekazuje informację o tym jak nóż współpracował z tą powierzchnią. Cyfrowy obraz powierzchni obrobionej może być wystarczającym źródłem informacji nie tylko o samej powierzchni, ale i o zużyciu naroża ostrza skrawającego.

Cyfrowy obraz powierzchni obrobionej jest zatem jednolitym przedstawieniem topografii tej powierzchni. Obraz taki może być rozważany jako obraz tekstury i przetwarzany z wykorzystaniem statystycznych metod modelowania tekstur. Cyfrowy obraz powierzchni obrobionej nie może być rozpatrywany w izolacji ale w kontekście procesu fizycznego, którego jest częścią.

Po zastosowaniu metod statystycznych modelowania tekstury obrazu uzyskuje się zbiór wskaźników, które opisują topografię powierzchni i stan naroża ostrza skrawającego. Znajomość parametrów technologicznych, które wpłynęły na ukonstytuowanie powierzchni pozwala na wzorcowanie metody, by można ją było wykorzystać w aktywnej kontroli chropowatości powierzchni obrobionej i monitorowaniu zużycia ostrza.

3. Cel i zakres pracy

Rozwój obróbki skrawaniem wskazuje na potrzebę monitorowania jakości powierzchni obrobionej i zużycia naroża ostrza tworzącego tę powierzchnię.

Przeanalizowany w rozdziale drugim przegląd literatury pozwala wnioskować, że nadrzędnym zadaniem w automatyzacji produkcji jest opracowanie metody monitorowania zużycia naroża ostrza oraz metody oceny jakości powstającej powierzchni.

Temat pracy wymagał rozwiązania trzech zadań cząstkowych:

- dokonanie oceny wpływu zużycia ostrza na chropowatość powierzchni obrobionej,
- wyznaczenie wpływu chropowatości powierzchni obrobionej i zużycia naroża ostrza na cyfrowy obraz powierzchni obrobionej,
- przetworzenie sygnałów pomiarowych cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej do postaci przydatnej w diagnostyce.

3.1. Uzasadnienie wyboru tematu

Po analitycznym przeglądzie literatury oceniono zasadność wyboru tematu, ponieważ uznano, że monitorowanie skrawania jest konieczne w warunkach gdy chcemy utrzymać wysoką jakość produktu przy maksymalnej wydajności.

Dynamiczny rozwój technologii komputerowej i automatyki (w tym rozwój elastycznych centrów obróbkowych) wymusza dostarczania ciągłej, wiarygodnej informacji o procesie, przedmiocie i narzędziu.

Ponadto niezbędne jest aby podczas toczenia ostrze było monitorowane także ze względu na losowy charakter zużycia. Istotne jest i to, że wraz z rosnącą prędkością skrawania powyżej 1000 m/min, do kilku minut spadła trwałość ostrza, a zużycie wpływa w bezpośredni sposób na jakość powierzchni obrobionej.

3.2. Teza naukowa pracy

Wykorzystując analizę literatury oraz własne prace badawcze sformułowano następującą tezę naukową:

Stopień zużycia powierzchni przyłożenia naroża ostrza i zmiany w stereometrii powierzchni obrobionej można oceniać na podstawie danych z estymacji charakterystyk pomiarowych uzyskanych z komputerowej analizy tekstury cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej.

3.3. Cele pracy

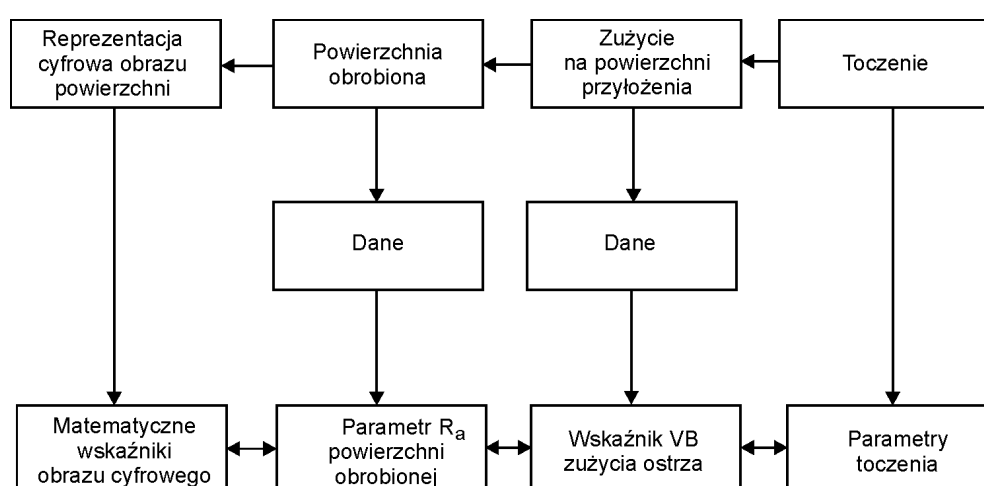
Celem pracy było opracowanie metodyki aktywnej kontroli chropowatości powierzchni obrobionej i stanu zużycia ostrza narzędzia. Do monitorowania zastosowano identyfikację obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej z wykorzystaniem metod przetwarzania obrazów (w tym analizy tekstur). Do realizacji badań zaprojektowano i wykorzystano optyczny układ pomiarowy.

Przeprowadzono analizę mocy dyskryminacyjnej różnych matematycznych wskaźników cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej jako cech wejściowych do procesu estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia powierzchni przyłożenia ostrza narzędzia.

3.4. Zakres pracy

W pracy uwzględniono wiedzę z zakresu skrawania, metrologii, analizy obrazów, sztucznych sieci neuronowych oraz statystyki matematycznej i badań inżynierskich.

W trakcie badań doświadczalnych dla potwierdzenia tezy pracy wykorzystano teorię eksperymentu. Dla przyjętych parametrów toczenia stworzono odpowiednio modele dla parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia ostrza. Dane modelowe R_a i VB porównano z matematycznymi wskaźnikami cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej w celu wyznaczenia estymaty R_a i VB z cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej (rys. 27).



Rys. 27. Zestawienie parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej, zużycia VB na powierzchni przyłożenia ostrza oraz matematycznych wskaźników cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej dla danych parametrów toczenia

Szczegółowy zakres pracy obejmował:

1. Opracowanie architektury układu pomiarowego do akwizycji obrazów powierzchni obrobionej, w tym:
 - Wyznaczenie zadań dla układu pomiarowego i jego założeń wyjściowych. Dotyczyło to głównie doboru układu optycznego, jego powiększenia, sposobu oświetlenia próbki oraz jej mocowania.
 - Konfigurację sprzętową wraz z komputerem. Zbudowany układ wyposażono następnie w kamerę cyfrową oraz podłączono do komputera wyposażonego w kartę akwizycji obrazów.
 - Opracowanie, do analizy i wizualizacji danych, własnych funkcji i skryptów wykorzystujących możliwości pakietu Matlab z toolboxami: Statistical Toolbox, Image Processing Toolbox, Neural Network Toolbox.
2. Budowę układu pomiarowego zużycia na powierzchni przyłożenia. Zadaniem układu było wyznaczenie szerokości śladu wytarcia na powierzchni przyłożenia VB trójkątnej płytki wielostrzowej. Wykorzystano układ pomiarowy do akwizycji obrazów powierzchni obrobionej przy czym skonstruowano i zastosowano dodatkowy statyw do mocowania płytek.
3. Zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentu. Dla każdego z pokryć noża (noże bez pokrycia, pokryte TiN oraz TiCN) wykonano niezależny eksperyment zachowując przy tym stałość punktów w przestrzeni obserwacji. Celem było zebranie danych do uzyskania modelu zmian parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia na powierzchni przyłożenia płytki wielostrzowej w zależności od posuwu, prędkości i czasu skrawania. Eksperyment służył uzyskaniu cyfrowych obrazów powierzchni obrobionej.
4. Ocenę jakości płytek zastosowanych w badaniach i wpływu pokrycia noża na chropowatość powierzchni obrobionej i zużycie ostrza noża tokarskiego.
5. Stworzenie modelu parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej dla każdego z pokryć noża (liniowy, interakcyjny, kwadratowy i pełny kwadratowy).
6. Stworzenie modelu wskaźnika VB zużycia ostrza dla każdego z pokryć noża (liniowy, interakcyjny, kwadratowy i pełny kwadratowy).
7. Statystyczną ocenę wiarygodności i niepewności pomiarowej wszystkich 24 modeli opisujących parametr R_a i wskaźnik VB .

8. Obliczenie na podstawie modeli parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia ostrza dla wszystkich obrazów cyfrowych pozyskanych w trakcie eksperymentu.
9. Ekstrakcję i analizę cech sygnału pomiarowego. Sygnałem pomiarowym była cyfrowa reprezentacja obrazu powierzchni obrobionej. Z sygnału pomiarowego wyznaczono matematyczne wskaźniki, które po zestawieniu razem utworzyły wektor cech.
 - Zoptymalizowano wielkość okna obrazu do obliczenia matematycznych wskaźników cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej w celu uzyskania największej wartości dyskryminacyjnej.
 - Dokonano analizy porównawczej 3 sposobów normalizacji danych w celu wybrania sposobu normalizacji o największej wartości dyskryminacyjnej.
 - Przeprowadzono ekstrakcję cech przez wyliczenie matematycznych wskaźników cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej.
 - Przeprowadzono analizę doboru cech z wykorzystaniem kryteriów optymalności oraz zmniejszono liczbę cech z wykorzystaniem definicji wzrastającej użyteczności.
10. Estymację parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wielkości zużycia VB z cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej przy użyciu sieci neuronowej.
 - Dokonano wyboru architektury sieci neuronowej.
 - Wybrano algorytm uczenia sieci neuronowej.
 - Zoptymalizowano czas uczenia sieci neuronowej, by sumaryczny błąd kwadratowy zbioru testującego był jak najmniejszy.
 - Zoptymalizowano architekturę sieci neuronowej, w tym liczbę neuronów w warstwie ukrytej.
 - Zbiór 198 wektorów cech wskaźników matematycznych cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej prezentowano na wejście sieci neuronowej w celu dobrania wag w ten sposób, by sumaryczny błąd kwadratowy między odpowiedzią sieci neuronowej i wartością zadaną był jak najmniejszy. Przy czym celem uczenia była wielkość parametru R_a lub wskaźnika VB obliczona z modeli: liniowego, interakcyjnego, kwadratowego i pełnego kwadratowego dla trzech rodzajów pokryć płytki wieloostrowej.
 - Zestawiono wartości błędów estymacji parametru R_a i wskaźnika VB z obrazu cyfrowego powierzchni obrobionej dla zbioru testującego dla każdego z pokryć noża i dla każdego z modeli opisujących wzorzec.

4. Badania własne

W celu poznania wpływu parametrów technologicznych na proces zużycia naroża ostrza oraz tworzoną chropowatość na przedmiocie obrobionym zaplanowano i przeprowadzono eksperyment (p. rozdział 4.1). Uzyskane w trakcie badań cyfrowe obrazy powierzchni obrobionej opisano za pomocą matematycznych wskaźników obrazu (p. rozdział 4.2).

Celem badań było wyznaczenie związków między wskaźnikami uzyskanymi dla cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej, a jej chropowatością oraz przebiegającym równolegle zużyciem na powierzchni przyłożenia naroża ostrza.

Cechy zestawiono w formie wektora cech. Wektor ten następnie zoptymalizowano pod względem liczby cech, wielkości okna do obliczeń każdej z cech, sposobu normalizacji. W dalszej części przeprowadzono uczenie sieci neuronowej do wyznaczenia parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia na powierzchni przyłożenia noża tokarskiego z cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej (p. rozdział 4.3).

4.1. Zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentu

W tym podrozdziale omówiony został sposób przygotowania i przeprowadzenia badań w celu stworzenia modelu procesu skrawania do wyznaczenia zużycia naroża ostrza na powierzchni przyłożenia i chropowatości powierzchni obrobionej.

Budowę modelu systemu rozpoczęto od przyjęcia modelu matematycznego. Wyodrębniono przy tym sygnały wejścia i wyjścia zapewniające związki między obiektem a jego otoczeniem [GOR98]. Uporządkowano dostępną wiedzę na temat modelowanego obiektu w formie katalogu typowych zależności wejście – wyjście. Dla modelu wybrano takie formuły i zależności matematyczne, które są w stanie opisać zarejestrowane zależności. Do modelu matematycznego systemu konieczne było wprowadzenie parametrów, które nie były znane w momencie rozpoczęcia konstruowania modelu. Zadanie identyfikacji polegało na ich ustaleniu przez analizę wyników obserwacji rzeczywistego systemu [POL77].

4.1.1. Plan badań

Optymalizowano badania doświadczalne przez wykorzystanie metody planowania eksperymentu. Planowanie eksperymentu prowadzi do aktywnej zmiany systemu. Ogranicza ono liczbę niezbędnych prób, nie umniejszając jakości uzyskanych informacji. Można także podczas planowania eksperymentu wpływać na jakość informacji [MAN76].

Przy założeniu, że model matematyczny obiektu badań wyodrębnia w nim m wielkości wejściowych o wartościach ustalonych przez eksperymentatora, oznaczanych symbolem x_μ , $\mu \in [1, 2, \dots, m]$, oraz k wielkości wyjściowych y_κ , $\kappa \in [1, 2, \dots, k]$. Planowanie eksperymentu polega zatem na ustaleniu wartości dla przyjętych czynników, przy których powinny być dokonywane obserwacje oraz ich kolejności. Wstępna znajomość obiektu badań, a także analiza badań oraz nałożonych na nie ograniczeń, umożliwiają ustalenie zakresów zmian czynników:

$$x_\mu \in \langle \xi_{\mu \min}, \xi_{\mu \max} \rangle, \mu \in [1, 2, \dots, m], \quad (16)$$

Plan eksperymentu jest tablicą:

$$Q = [x_{\nu, \mu}], \nu \in [1, 2, \dots, l], \mu \in [1, 2, \dots, m], \quad (17)$$

gdzie $x_{\nu, \mu}$ oznacza x_μ wartość przyjętą w ν pomiarze.

Plan Q eksperymentu cząstkowego, opisany zależnością (17), jest przydatny wówczas, gdy ze względu na zbyt dużą liczbę doświadczeń nierealne jest realizowanie pełnego eksperymentu. Jest to więc macierz utworzona z wybranych wierszy pełnego planu eksperymentu według kryteriów: zachowania ortogonalności kolumn macierzy Q , symetrycznego testowania poszczególnych czynników w serii prób, jednakowej częstości testowania każdego czynnika [KUL93].

Do badań wykorzystano program rotabilny. Należy on do programów statycznych zdeterminowanych selekcyjnych – wieloczynnikowych. Umożliwia on uzyskanie jednej funkcji obiektu, w skład której wchodzi wszystkie wybrane czynniki badane oraz czynnik wynikowy. Funkcja ta jest modelem matematycznym obiektu badań identyfikującym obiekt rzeczywisty. Przyjęto model w postaci wielomianu:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{\mu=1}^m b_{\mu} x_{\mu} + \sum_{\mu=1}^m b_{\mu\mu} x_{\mu}^2 + \sum_{\substack{\mu, \eta=1 \\ \mu < \eta}}^m b_{\mu\eta} x_{\mu} x_{\eta}, \quad (18)$$

gdzie:

\hat{y} - wielkość wyjściowa,

x_μ, x_η - wielkość wejściowa ($\mu = 1, 2, \dots, i; \quad \eta = 2, 3, \dots, i; \quad \mu < \eta$),

m - liczba wielkości wejściowych,

$b_\mu, b_{\mu\mu}, b_{\mu\eta}$ - współczynniki regresji.

W praktycznych realizacjach w ograniczonym stopniu wykorzystuje się wielomiany w postaci ogólnej (zależność (18)). Ostatecznie przyjęto za najbardziej ogólny wielomian zawierający trzy czynniki badane:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (19)$$

Do planów wykorzystujących cechę quasi-optimalności, będących szczególnie efektywnymi planami, których liczba układów planu tylko nieznacznie przekracza liczbę współczynników wielomianu aproksymującego, należą tak zwane plany Hartleya. Obejmują one następujące układy wartości wielkości wejściowych: jądro planu stanowiące wybrane układy odpowiadające regularnemu planowi, układy stanowiące odpowiedniki punktów gwiazdnych, układy odpowiadające centrum planu [POL84, MAT98, KUK00].

Parametry funkcji regresji wyznaczone są metodą najmniejszych kwadratów (zależność (20 – 22)).

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N (y_n - \hat{y}_n)^2 &= (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T \cdot (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b})^T \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b}) = \\ &= \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X}\mathbf{b} - \mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{b} = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2 \mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{b} = \min, \end{aligned} \quad (20)$$

dla

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{10} & x_{11} & \dots & x_{1s} \\ x_{20} & x_{21} & \dots & x_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n0} & x_{n1} & \dots & x_{ns} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = [b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_s], \quad \mathbf{y} = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_n], \quad \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\mathbf{b}.$$

Warunek optymalności otrzymuje się przyrównując do zera różniczkę sumy kwadratów odchyłek względem \mathbf{b} (zależność (20)). Wtedy pierwszy warunek można zapisać jako

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{b} = \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (21)$$

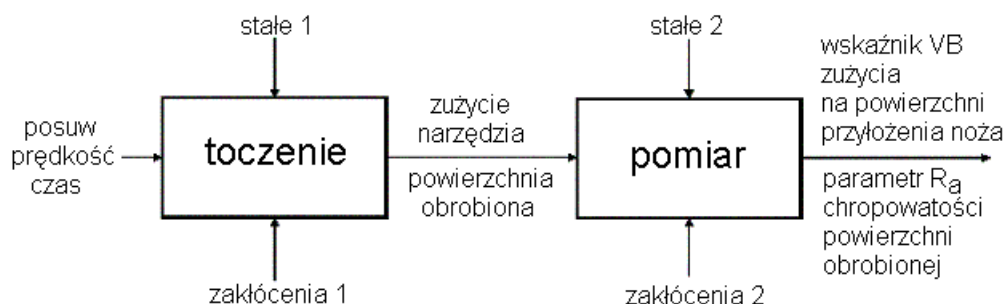
Aby otrzymać rozwiązanie wyznacznik $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ musi być różny od zera

$$\det \mathbf{X}^T \mathbf{X} \neq 0. \quad (22)$$

Z równań (21) oraz (22) wynika, że w macierzy wejść elementy jednej kolumny nie mogą być liniowo zależne od elementów innych kolumn oraz że liczba wierszy liniowo niezależnych powinna być nie mniejsza niż $s + 1$ współczynników niezależnych.

4.1.2. Metodyka badań doświadczalnych

W rozdziale omówiono model obiektu badań (rys. 28) i warunki w których przeprowadzono badania. W dalszej części opisano kolejne etapy analizy wyników badań.



Rys. 28. Model obiektu badań

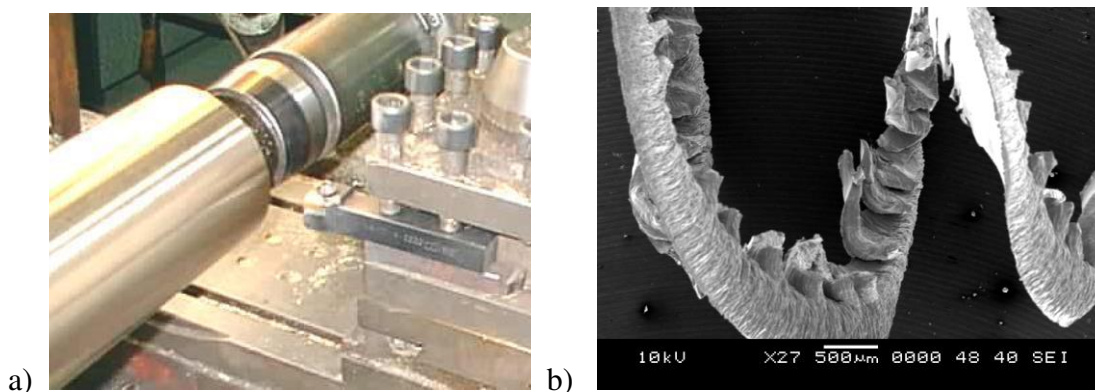
Badania przeprowadzono dla następujących warunków:

- obrabiarka: tokarka uniwersalna TUR 50S (rys. 29),
- narzędzia: nóż tokarski składany typu hR117.16-2020, płytki wielostrzowe TNUN160404 z węgliku spiekanego gatunek S20S firmy Baildonit S.A. bez pokrycia, pokryte warstwami TiN, TiCN i TiC metodą fizyczną (PVD) katodowego odparowania łukowego CAPD (podrozdział 4.1.3),
- materiał obrabiany: skrawano wałki o średnicy ϕ 113–80 i długości 550mm wykonane ze stali węglowej 45 o twardości 90–93HRB (wg PN-93/H-84019 $R_m = 560MPa$, $Re = 275MPa$),
- parametry skrawania ustalono w badaniach wstępnych i dostosowano do parametrów w planie eksperymentu. Zakresy zmian wielkości wejściowych zgodnie z zależnością (16) zestawiono w tablicy 3. Ustalono, że głębokość skrawania będzie wielkością stałą i równać się będzie 0,5 mm .

Tablica 3. Zakresy parametrów skrawania objętych eksperymentem

Wielkość wejściowa	Parametr	Oznaczenie	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Miano
x_1	posuw	f	0,08	0,34	[mm/obr]
x_2	prędkość	v_c^*	125	250	[m/min]
x_3	czas	t^*	1	11	[min]

*) w obliczeniach eksperymentu stosowano prędkość skrawania v_c w [mm/s], a czas skrawania t w [s]



Rys. 29. a) Narzędzie i przedmiot obrabiany zamocowane na obrabiarce b) wiór

W trakcie badań jednocześnie:

- za pomocą układu optycznego mierzono zużycie na powierzchni przyłożenia po każdorazowym zakończeniu skrawania,
- mierzono parametr R_a na wykonywanych w Duracryl-u replikach powierzchni obrobionej za pomocą profilometru stykowego CARLZEISS Jena ME-10. Z literatury było wiadomo, że błąd odtworzenia cech wysokościowych jest mniejszy niż 1% [NOW91],
- zbierano wióry i fotografowano je,
- w trakcie procesu wykonywano z wykorzystaniem układu optycznego cyfrowe obrazy powierzchni obrobionej z częstotliwością co 1 minutę.

4.1.3. Jakość płytek zastosowanych do badań

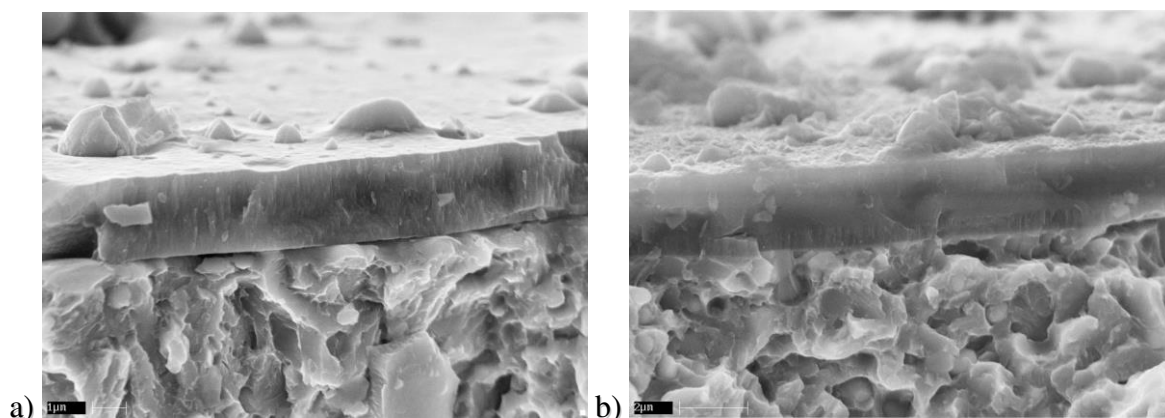
Badania przeprowadzono bez użycia cieczy obróbkowych. Skrawając na sucho dobrano ostrza z uwagi na rodzaj spieku twardego, geometrię jego ostrza i rodzaj pokrycia [OCZ98-2, PRE95].

Pokrycie zachowuje się jak „smar stały” zmniejszając adhezję a także spełnia rolę izolatora ciepła. Ogólnie stwierdza się, że narzędzia pokrywane warstwami przeciwzużyciowymi wykazują wzrost trwałości. Wpływ na to ma duża twardość pokryć, duża odporność na ścieranie oraz łączący się z tym mały współczynnik tarcia. Na pokrycia stosowane są głównie trudnotopliwe związki węgla, azotu i boru z metalami przejściowymi, niektóre tlenki a także prowadzone są badania nad pokryciami diamentowymi [WYS97, BUR95, DOB98].

Stwierdzono, że różna jest wydajność skrawania dla różnych narzędzi z takimi samymi pokryciami i różna dla takich samych narzędzi z różnymi pokryciami [KLO99, ERR96].

Przyjęty zapis charakterystyki jako TiC_xN_{1-x} warstw nanoszonych na płytki skrawające informował o tym, że x zmienia się w zakresie od $x=0$ dla azotku tytanu, do $x=1$ dla węgliku tytanu, poprzez składy pośrednie $0 < x < 1$ dla węglazotków tytanu. Mikrotwardość tych warstw mierzona przez autorów prac [KNO93, KAR99-2, HAB89] zmieniała się w zakresie od 10 GPa do ponad 40 GPa. Siła krytyczna, charakteryzująca adhezję warstw do podłoża, określona metodą rysy, zmieniała się od około 20 N do ponad 100 N [KNO93].

Płytki z węgliku spiekane użyte w badaniach pokrywane były warstwami TiN i TiCN. Najwyższą mikrotwardość 32,6GPa uzyskano dla warstw typu TiCN. Zbliżoną w swojej wartości, lecz niższą uzyskano dla pokrycia TiN. Wszystkie warstwy posiadały dobrą adhezję do podłoża. Wartości siły krytycznej charakteryzującej adhezję dla wszystkich badanych warstw przekraczały 70 N.



Rys. 30. Przelomy warstw dla pokrycia a) TiN , b) TiCN

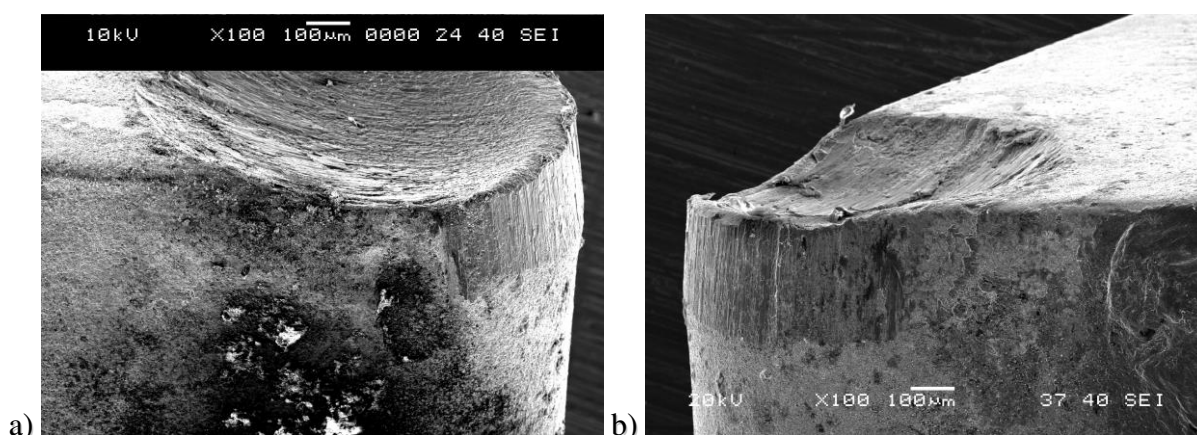
Obserwacje przełomów potwierdziły dobrą adhezję warstw do podłoża (rys. 30). W czasie wykonywania przełomów warstwy nie oddzielały się od podłoża a topografia powierzchni warstw odzwierciedlała topografię powierzchni pokrywanych próbek. Warstwy posiadały na powierzchni mikrokrople, charakterystyczne dla metody łukowej nanoszenia powłok. Szerzej jakość płytek stosowanych w badaniach opisano w [ZAW00].

4.1.4. Zjawiska fizyczne obserwowane podczas eksperymentu

Wykruszenia, nagła utrata zdolności skrawnych, obraz śladów zużycia są ocenami jakościowymi. Techniki związane z analizą obrazu powierzchni ostrza umożliwiają jakościową ocenę zjawisk stykowych zachodzących podczas skrawania.

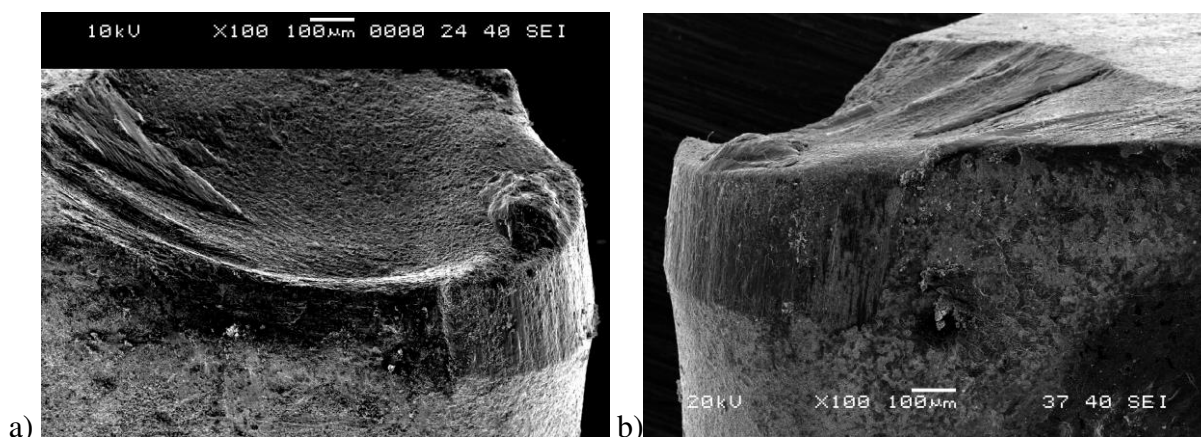
Podczas pracy ostrze rozgrzewało się i tworzył się wiór piłożebny (rys. 29), natomiast chropowatość powstającej powierzchni obrobiona zależała od parametrów skrawania, czasu skrawania i stosowanego pokrycia narzędzia.

Ostrze zużywało się na powierzchni natarcia i przyłożenia (rys. 31, 32). Dla noży bez pokrycia przy wyższych parametrach skrawania obserwowano wykruszenia.



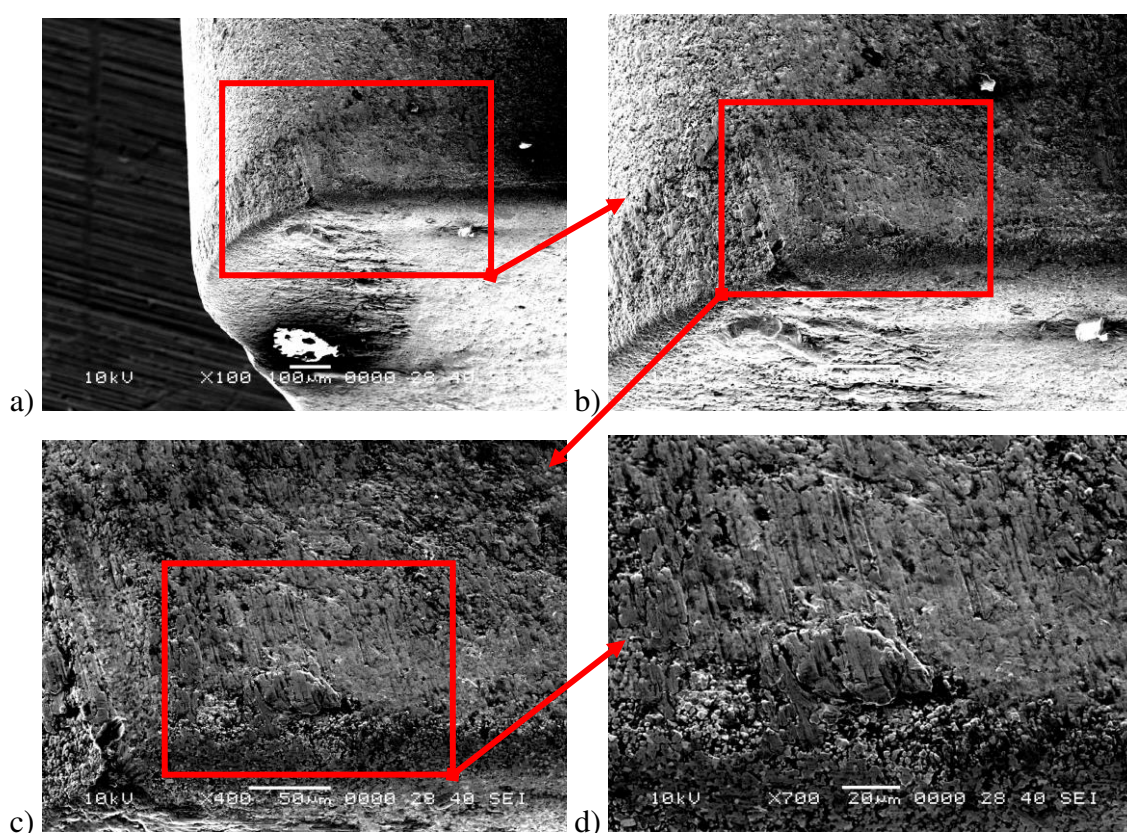
Rys. 31. Ślady zużycia od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia (a) i głównej powierzchni przyłożenia (b), dla noża tokarskiego bez pokrycia, dla posuwu 0,21 mm/obr, prędkości 250 m/min i czasu skrawania 6 min

Wykruszenia i wyszczerbienia są wynikiem zużycia wytrzymałościowego, ujawniające się po przekroczeniu doraźnej lub zmęczeniowej wytrzymałości krawędzi skrawającej. Takie zużycie ostrzy jest ściśle związane z warunkami eksploatacyjnymi i wyjściowymi cechami stereometrycznymi. Przy dużych prędkościach skrawania widoczne były liczne pęknięcia termiczne (rys. 31). Przy dużych posuwach ślady zużycia na ostrzu świadczyły o występujących podczas obróbki udarach mechanicznych (rys. 32).

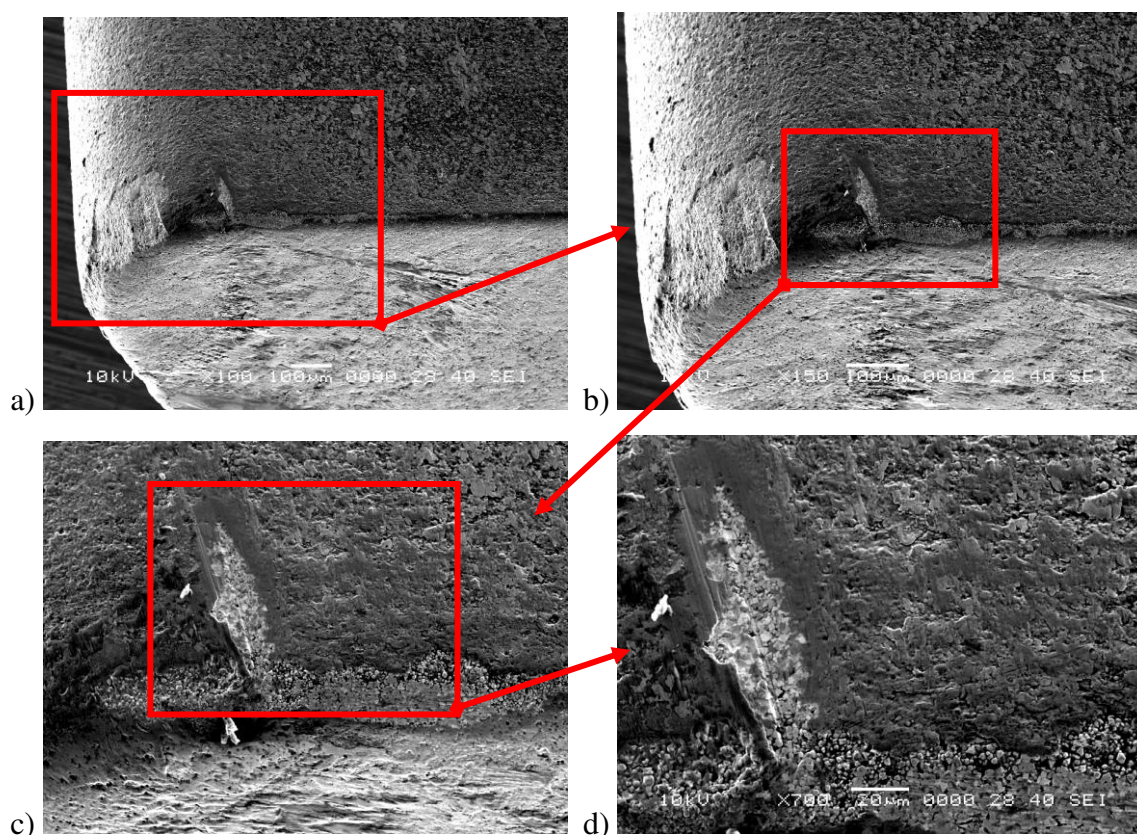


Rys. 32. Ślady zużycia od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia (a) i głównej powierzchni przyłożenia (b) dla noża tokarskiego z węgla spiekanego bez pokrycia, dla posuwu 0,34 mm/obr, prędkości 187,5 m/min i czasu skrawania 6 min

Na powierzchni przyłożenia zaobserwowano ślady zużycia skoncentrowanego. Główną jego przyczyną jest ściernie działanie lokalnych, nierównomiernie występujących, utwardzeń materiału obrabianego [KAW80]. Można wnioskować też o obecności zjawiska unoszenia twardych cząstek materiału ostrza (rys. 33, rys. 34).



Rys. 33. Widok noża bez pokrycia od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia dla posuwu 0,13 mm/obr, prędkości 150 m/min i czasu skrawania 9 min, przy powiększeniach odpowiednio a) 100x, b) 200x, c) 400x i d) 700x

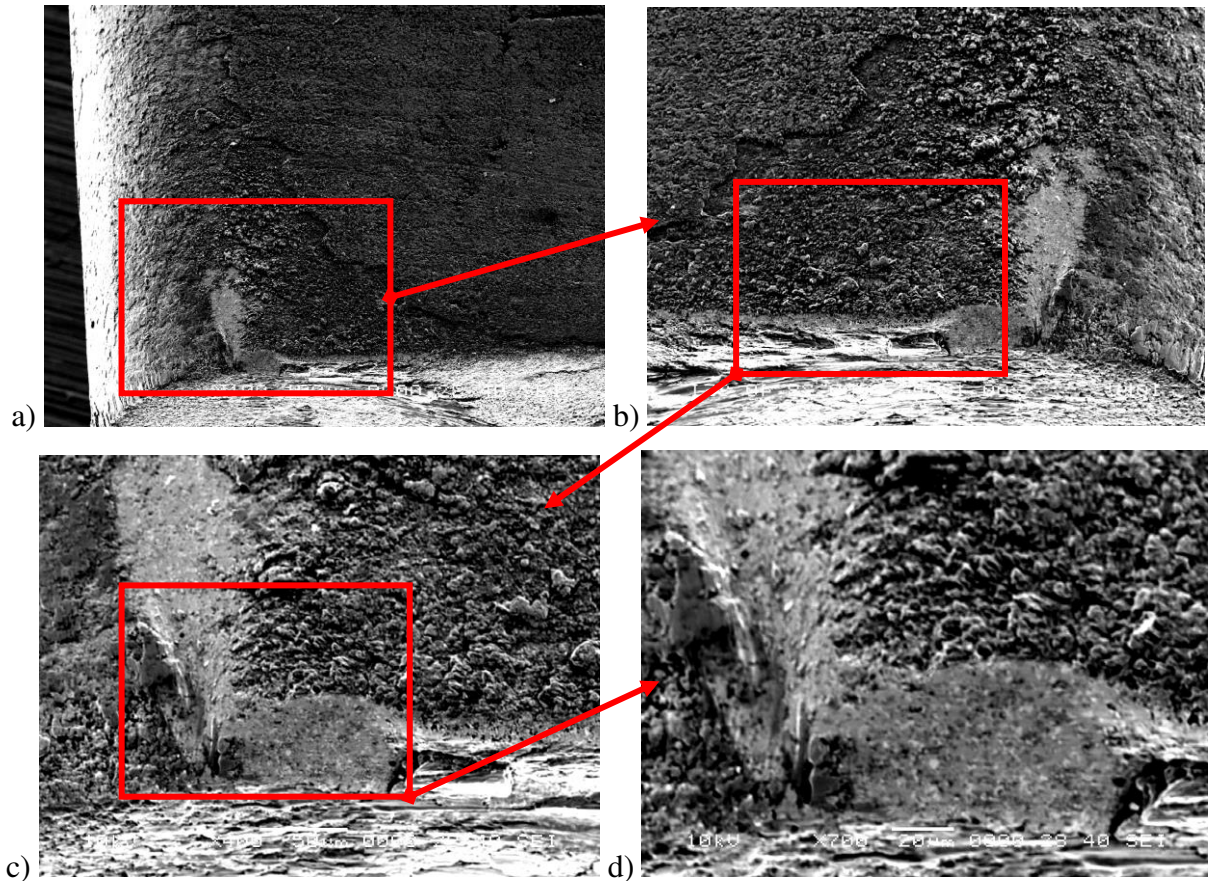


Rys. 34. Widok noża pokrytego TiN od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia dla posuwu 0,21 mm/obr, prędkości 125 m/min i czasu skrawania 6 min (pokryty TiN), przy powiększeniach odpowiednio a) 100x, b) 150x, c) 400x i d) 700x

Warstwy, którymi było pokryte ostrze zapobiegały jego wykruszeniu. Warstwa TiN, dzięki powolnemu ścieraniu, powodowała większą trwałość ostrza (rys. 34). Warstwa TiCN dla wyższych parametrów technologicznych skrawania (większej prędkości skrawania i większego posuwu) gwałtownie odpryskiwała, odkrywając podłoże węglikowe (rys. 35).

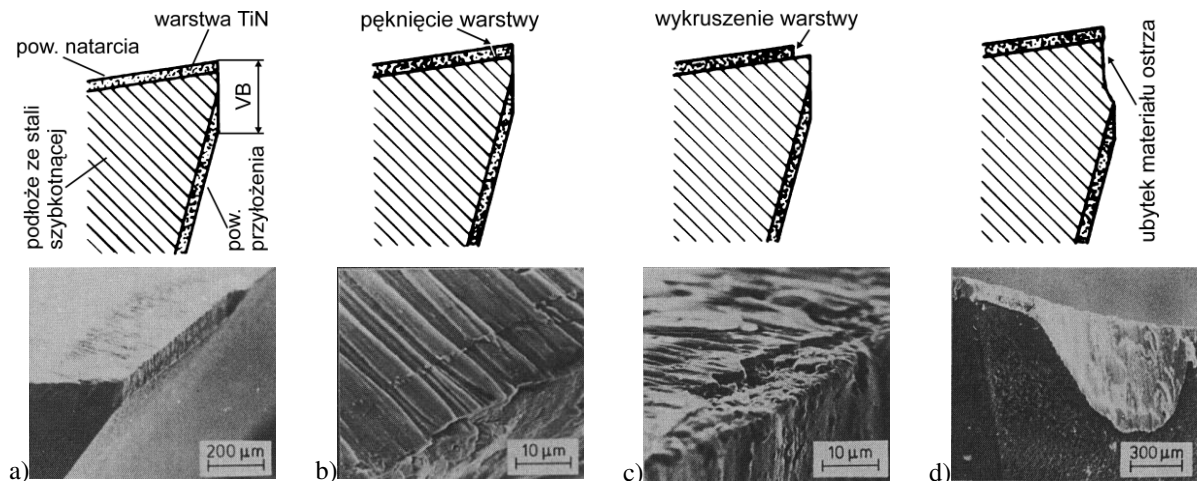
Na początku wiór oddzielany jest przez ostrze pokryte warstwą. Temperatura jest na tyle niska, że materiał podłoża nie zmienia swoich właściwości. Zużycie jest wynikiem ścierania lub rozpuszczania.

Z upływem czasu skrawania ciepło zmienia twardość podłoża w taki sposób, że pokrycie i podwarstwa nie mogą dłużej przenosić obciążenia skrawaniem. Warstwa łamie się w miejscu, gdzie podłoże zdeformowało się plastycznie. Ukruszone fragmenty warstwy są odtransportowywane z wiórem pozostawiając podłoże odkryte na dalsze oddziaływanie wióra i ciepła. W ten sposób pokrycie jest stopniowo usuwane przez wiór, odkrywając coraz bardziej podłoże.



Rys. 35. Widok noża pokrytego TiCN od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia dla posuwu $0,34 \text{ mm/obr}$, prędkości $187,5 \text{ m/min}$ i czasu skrawania 6 min , przy powiększeniach odpowiednio a) $100x$, b) $200x$, c) $400x$ i d) $700x$

Objawy zużycia ostrza skrawającego pokrytego azotkiem tytanu, przedstawione zostały w [HAB93]. W wyniku oddziaływań między pokryciem narzędzia a materiałem obrabianym widoczne było zużycie ostrza w postaci wytarcia na powierzchni przyłożenia (rys. 36a), pęknięcia (rys. 36b) i wykruszenia warstwy na powierzchni natarcia (rys. 36c) oraz ubytek materiału na powierzchni przyłożenia (rys. 36d).



Rys. 36. Schematy oraz obrazy zużycia ostrza narzędzia skrawającego pokrytego twardą warstwą TiN, zaobserwowane podczas frezowania [HAB93]

4.1.4.1. Testowanie hipotez statystycznych

Dla wyznaczenia wpływu pokrycia na wartość wskaźnika VB zużycia ostrza zastosowano testowanie hipotezy porównania średnich w dwóch zbiorach. Testowanie hipotezy to zbiór reguł postępowania wykorzystujący statystykę matematyczną, pozwalający podjąć decyzję dotyczącą słuszności hipotezy [BRA98, SZC98, PIO00, MAT98]. Testowanie odbywa się w następujących etapach:

1. Sformułowanie hipotezy

- hipoteza zerowa

$$H_0 : \mu_A = \mu_B, \sigma_A = \sigma_B = \sigma, \quad (23)$$

- hipoteza alternatywna

$$H_1 : \mu_A > \mu_B \text{ lub } \mu_A < \mu_B. \quad (24)$$

2. Określenie sprawdzianu hipotezy

$$t = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}}}. \quad (25)$$

Ocenę wariancji populacji oblicza się jako średnią ważoną z dwóch populacji

$$s^2 = \frac{(n_A - 1) \cdot s_A^2 + (n_B - 1) \cdot s_B^2}{(n_A - 1) + (n_B - 1)}. \quad (26)$$

3. Przyjęcie poziomu istotności

$$\alpha = 0,05.$$

4. Wyznaczenie obszaru krytycznego

$$P(|t| > t') = \alpha,$$

gdzie

t' - jest wartością odczytaną z tablic rozkładu t-Studenta,

5. Obliczenie wartości t sprawdzianu hipotezy. Ze względu na wartość t można przyjąć lub odrzucić hipotezę o równości średnich.

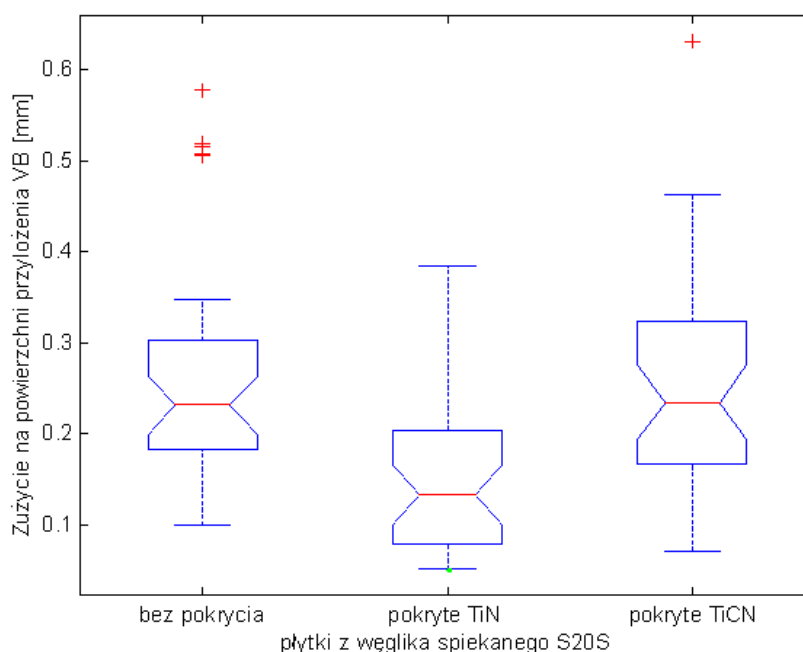
4.1.4.1.1. Analiza wpływu typu pokrycia ostrza na wartość wskaźnika VB zużycia ostrza

Przeprowadzono test t-Studenta dla wyznaczenia, czy dwa zbiory o rozkładzie normalnym mogą mieć tą samą średnią, gdy nieznanie jest odchylenie standardowe, przypuszczalnie równe (zależności (23) do (26)). Dla $H=1$ ($\mu_A \neq \mu_B$) można odrzucić hipotezę zerową na poziomie istotności 0,05. Tylko w przypadku porównania zbiorów wartości wskaźnika VB zużycia dla noży bez pokrycia i pokrytych TiCN średnia była zbliżona i hipotezę przyjęto (tablica 4).

Tablica 4. Sprawdzenie równości średnich wskaźnika VB zużycia ostrza dla różnych pokryć

Noże	Wartość hipotezy	Istotność obliczona	Przedział ufności	
bez pokrycia – pokryte TiN	1	0,000268	0,052	0,166
bez pokrycia – pokryte TiCN	0	0,659	-0,046	0,072
pokryte TiN – pokryte TiCN	1	0,000624	-0,150	-0,043

Analizując przedział ufności można wysnuć wniosek, że wskaźnik VB zużycia dla noży pokrytych TiN w stosunku do noży bez pokrycia był mniejszy od 0,05 do 0,17 mm, a w stosunku do noży pokrytych TiCN mniejszy od 0,04 do 0,15 mm. Zużycie na powierzchni przyłożenia dla noży pokrytych TiCN i bez pokrycia było porównywalne. Podobne wnioski można wysnuć analizując wykres ramkowy (rys. 37), na którym zestawiono zbiory wyników wskaźnika VB zużycia dla noży bez pokrycia oraz pokrytych TiN i TiCN.



Rys. 37. Wykres ramkowy rozproszenia wskaźnika VB zużycia dla noży bez pokrycia, pokrytych TiN i pokrytych TiCN. Punkt środkowy – mediana, ramka – pierwszy i trzeci kwartył, górny wąs – największa wartość obserwacji leżąca jeszcze w przedziale od trzeciego do 1,5 rozstępu kwartylnego krzyżki - obserwacje ekstremalne (outliers) leżące dalej niż 3 x odstęp kwartylny

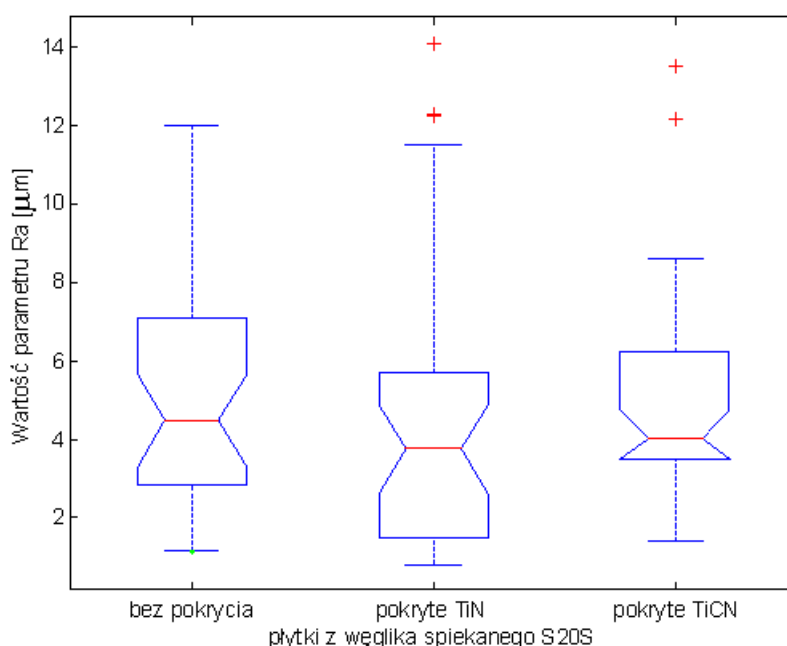
4.1.4.1.2. Analiza wpływu typu pokrycia ostrza na wartość parametru R_a chropowatości

Analizę wpływu zastosowania powłoki azotku tytanu na chropowatość powierzchni obrabianej omówiono w [KUP98]. W pracy dla zbadania wpływu pokrycia na wartość parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej zastosowano testowanie hipotezy porównania średnich. Przeprowadzono test t-Studenta. Parametr R_a chropowatości powierzchni obrabianej ma wartość zbliżoną dla noży bez pokrycia, pokrytych TiN i TiCN

(tablica 5). Analizując wykres ramkowy można zaobserwować brak wpływu pokrycia na wartość parametru R_a chropowatości powierzchni (rys. 38).

Tablica 5. Sprawdzenie równości średnich parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej dla różnych pokryć ostrza skrawającego

Noże	Wartość hipotezy	Istotność obliczona	Przedział ufności
bez pokrycia – pokryte TiN	0	0,41	-1,00 2,44
bez pokrycia – pokryte TiCN	0	0,76	-1,22 1,66
pokryte TiN – pokryte TiCN	0	0,54	-2,12 1,12



Rys. 38. Wykres ramkowy rozproszenia chropowatości powierzchni obrabianej dla noży bez pokrycia, pokrytych TiN i pokrytych TiCN

4.1.4.1.3. Analiza zależności czynników wejściowych na wartości R_a i VB

Dla zbadania wpływu poszczególnych czynników wejściowych (posuwu, prędkości i czasu skrawania) na wartość wskaźnika VB zużycia ostrza i parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej zastosowano współczynnik korelacji między zmiennymi. Równy on jest stosunkowi kowariancji tych zmiennych do dodatniego pierwiastka kwadratowego z iloczynem ich wariancji. Jest miarą ich względnej wzajemnej zależności

$$\zeta(y, z) = \zeta(z, y) = \frac{\nu(y, z)}{\sqrt{\nu(y, y)\nu(z, z)}} = \frac{\nu(y, z)}{\sigma(y)\sigma(z)}. \quad (27)$$

Estymatą współczynnika korelacji opisanego zależnością (27) jest równanie (28)

$$r(y, z) = r(z, y) = \frac{s(y_i, z_i)}{\sqrt{s^2(y_i) s^2(z_i)}} = \frac{s(y_i, z_i)}{s(y_i) s(z_i)}. \quad (28)$$

Współczynnik korelacji jest liczbą z zakresu $-1 \leq r(y_i, z_i) \leq +1$ [WYR99].

Wykorzystano właściwości przeorganizowania zbiorowości, jako środka do pozyskania informacji o niepewności estymatorów statystycznych. Zastosowano próbkowanie z zastępowaniem, co oznacza, że każda próbka zwracana jest do zbioru danych po próbkowaniu. Dana ze zbioru oryginalnego może pojawić się wiele razy w analizowanym zbiorze. Uzyskany obszar estymat próbki umożliwia ustalenie niepewności wartości, która jest estymowana. W analizie wykorzystywano współczynnik korelacji, opisany zależnością (28).

Z przedstawionych w tabelicy 6 danych wynika, że w przebadanym zakresie wpływ posuwu i czasu skrawania na wskaźnik VB zużycia ostrza w każdym z przypadków był duży. Prędkość skrawania miała różny wpływ, silniejszy dla noży bez pokrycia.

Tablica 6. Przedział wartości współczynnika korelacji jako siły zależności wskaźnika VB zużycia na powierzchni przyłożenia ostrza, dla różnych pokryć, w zależności od posuwu, prędkości i czasu

Czynnik	Typ pokrycia noża		
	Bez pokrycia	Pokrytych TiN	Pokrytych TiCN
posuw f	0,3 do 0,6	0,6 do 0,8	0,2 do 0,5
prędkość skrawania v_c	0,4 do 0,7	0,2 do 0,5	-0,1 do 0,5
czas skrawania t	0,3 do 0,7	0,2 do 0,6	0,3 do 0,8

Przedział wartości współczynnika korelacji jako siły zależności parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej przedstawiono w tabelicy 7. Widoczna jest silna zależność chropowatości od posuwu w badanym zakresie dla każdego pokrycia noża, natomiast od prędkości skrawania tylko dla noży bez pokrycia. W każdym z przypadków jest widoczna słaba zależność parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej od czasu skrawania.

Tablica 7. Przedział wartości współczynnika korelacji jako siły zależności parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej, dla różnych pokryć, w zależności od posuwu, prędkości i czasu skrawania

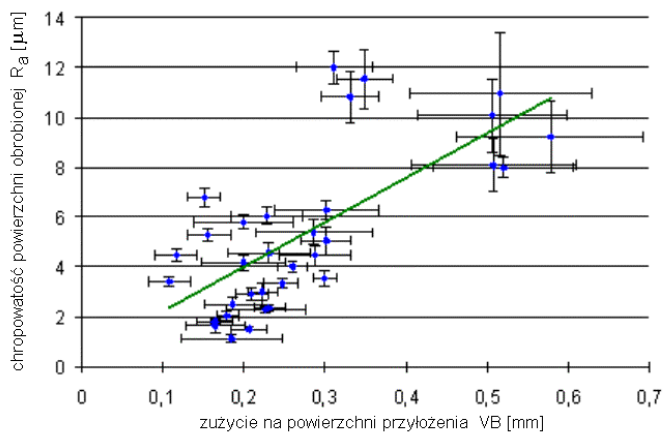
Czynnik	Typ pokrycia noża		
	Bez pokrycia	Pokrytych TiN	Pokrytych TiCN
posuw f	0,7-0,9	0,7-0,9	0,6-0,9
prędkość v_c	0,1-0,6	-0,2-0,4	-0,4-0,2
czas skrawania t	-0,1-0,4	-0,1-0,3	-0,2-0,2

Przy zastosowaniu podobnej metodyki sprawdzono wpływ zużycia na powierzchni przyłożenia naroża ostrza skrawającego na wartość parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej. Wyniki zestawiono w tablicy 8. Widoczna jest silna zależność wskaźnika VB zużycia ostrza na parametr R_a chropowatości powierzchni obrabianej.

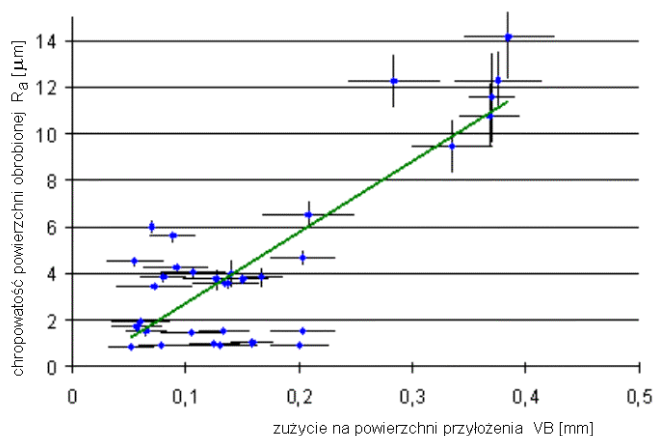
Tablica 8. Zależność parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej od wskaźnika VB zużycia ostrza badana współczynnikiem korelacji

Czynnik	Typ pokrycia noża		
	Bez pokrycia	Pokrytych TiN	Pokrytych TiCN
VB	0,6-0,8	0,7-0,9	0-0,4

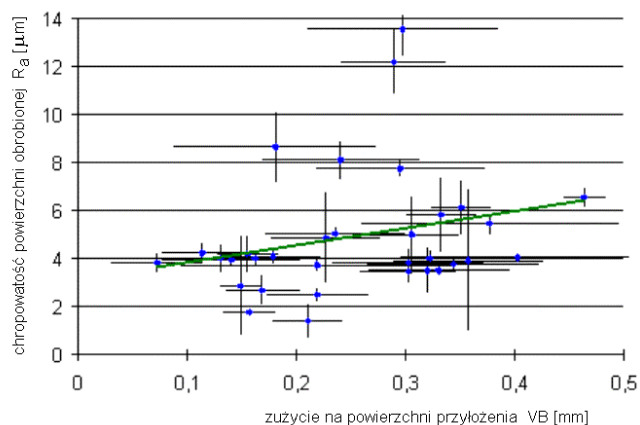
Wykresy przedstawione na rysunkach 39, 40 i 41 potwierdzają istniejącą zależność między parametrem R_a chropowatości powierzchni obrabianej i wskaźnikiem VB zużycia na powierzchni przyłożenia ostrza. Są zestawieniem danych eksperymentalnych parametru R_a i wskaźnika VB zużycia ostrza dla posuwów, prędkości i czasów skrawania w zakresach podanych w tablicy 3 dla każdego z pokryć noża. Zestawiono parametr R_a i wskaźnik VB z niepewnością pomiarową każdej z wartości.



Rys. 39. Wpływ wskaźnika VB zużycia ostrza na parametr R_a chropowatości powierzchni obrabianej dla noży bez pokrycia



Rys. 40. Wpływ wskaźnika VB zużycia ostrza na parametr R_a chropowatości powierzchni obrabianej dla noży pokrytych TiN



Rys. 41. Wpływ wskaźnika VB zużycia ostrza na parametr R_a chropowatości powierzchni obrabianej dla noży pokrytych TiCN

Wykreślona na rysunkach 39, 40 i 41 linia trendu pozwala ocenić moc zależności parametru R_a i wskaźnika VB . Widoczna jest silna zależność dla noży bez pokrycia i pokrytych TiN. Dla noży pokrytych TiCN zależność nie jest tak silna ze względu na zaobserwowane łuszczenie warstwy pokrycia.

4.1.5. Model chropowatości powierzchni obrobionej i zużycia pomocniczej powierzchni przyłożenia noża tokarskiego

Celem badań doświadczalnych było wyznaczenie modelu wskaźnika VB zużycia naroża ostrza i parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej dla zmiennego posuwu, prędkości i czasu skrawania. Badania wykonywano dla węgliku spiekanego nie pokrywanego oraz pokrytego warstwami TiN oraz TiCN. Dla każdego typu pokrycia płytki wieloostrowej wyznaczono odrębny model.

Ze względu na zastosowany w badaniach plan eksperymentu oraz starając się uniknąć obciążenia procesu modelowania cechami ich obserwatora [KAC97], do wyznaczenia modelu chropowatości powierzchni obrobionej oraz modelu zużycia przyjęto, wychodząc z zależności (19) modele:

- liniowy parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej

$$R_a = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (29)$$

- interakcyjny parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej

$$R_a = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (30)$$

- kwadratowy parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej

$$R_a = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (31)$$

- pełny kwadratowy parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej

$$R_a = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (32)$$

- liniowy wskaźnika VB zużycia ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia

$$VB = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (33)$$

- interakcyjny wskaźnika VB zużycia ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia

$$VB = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (34)$$

- kwadratowy wskaźnika VB zużycia ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia

$$VB = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (35)$$

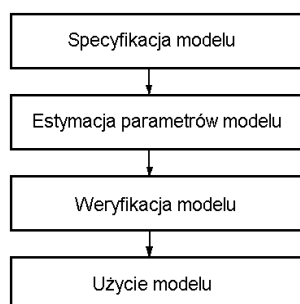
- pełny kwadratowy wskaźnika VB zużycia ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia

$$VB = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (36)$$

Pełny model kwadratowy parametru R_a opisany zależnością (32) oraz wskaźnika VB , opisany zależnością (36) są modelami najbardziej ogólnymi. Modele liniowy (zależność (29) i (33)), interakcyjny (zależność (30) i (34)) i kwadratowy (zależność (31) i (35)) są przypadkami szczególnymi, w których odpowiednie współczynniki b_π są równe zero.

4.1.5.1. Wyznaczenie współczynników regresji

Proces wyznaczania modelu polega na wykonaniu szeregu etapów, z których każdy jest równie ważny. Rozpoczyna się od specyfikacji modelu oraz estymacji jego parametrów. Istotnym etapem jest weryfikacja modelu. Dopiero taki model nadaje się do dalszego wykorzystania (rys. 42).



Rys. 42. Proces wyznaczania modelu funkcji regresji [GOR98]

Do wyznaczenia parametrów modelu wykorzystano pakiet Matlab. Wszystkie obliczenia były wspierane przez Statistical Toolbox. Wykorzystano metody regresji wielorakiej. W tablicach 9 i 10 zestawiono odpowiednio parametry modelu wskaźnika VB zużycia ostrza oraz parametry modelu R_a chropowatości powierzchni obrabianej dla noży bez pokrycia oraz pokrytych TiN i TiCN.

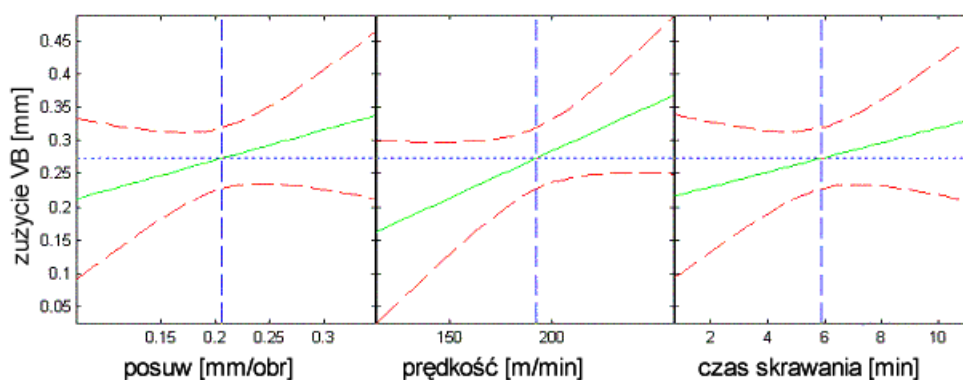
Tablica 9. Wartości parametrów dla modeli wskaźnika VB zużycia ostrza, opisanych zależnościami (33), (34), (35) i (36), dla różnych pokryć noża tokarskiego

Typ modelu	b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	B11	B22	B33
dla noży bez pokrycia										
liniowy	-3,4E-01	7,4E-01	1,0E-04	3,6E-04						
interakcyjny	1,4E+00	-5,2E+00	-3,5E-04	-1,5E-03	1,5E-03	2,6E-03	3,6E-07			
kwadratowy	-2,2E-01	1,9E+00	-1,2E-04	1,2E-03	-2,7E+00	3,7E-08	-1,1E-06			
pełny kwadratowy	1,5E+00	-4,0E+00	-5,9E-04	-6,2E-04	1,4E-03	2,0E-03	3,5E-07	-1,8E+00	4,3E-08	-1,0E-06
dla noży pokrytych TiN										
liniowy	-9,7E-02	6,4E-01	2,7E-05	1,3E-04						
interakcyjny	1,0E+00	-3,4E+00	-2,8E-04	-1,0E-03	1,1E-03	1,5E-03	2,3E-07			
kwadratowy	1,5E-01	-7,5E-01	-8,7E-05	6,2E-04	3,4E+00	1,6E-08	-6,6E-07			
pełny kwadratowy	1,8E+00	-4,6E+00	-6,3E-04	-1,5E-03	5,8E-04	4,1E-03	3,4E-07	4,2E+00	5,8E-08	-4,4E-07
dla noży pokrytych TiCN										
liniowy	-1,3E-01	4,9E-01	4,9E-05	3,8E-04						
interakcyjny	3,1E-02	1,3E+00	-1,5E-06	-5,4E-04	-2,8E-04	-4,7E-04	3,2E-07			
kwadratowy	9,4E-01	1,9E+00	-7,5E-04	5,3E-04	-3,3E+00	1,2E-07	-1,9E-07			
pełny kwadratowy	1,8E+00	2,1E+00	-1,1E-03	-1,2E-03	-3,2E-04	-4,5E-04	5,2E-07	-1,6E+00	1,6E-07	1,9E-08

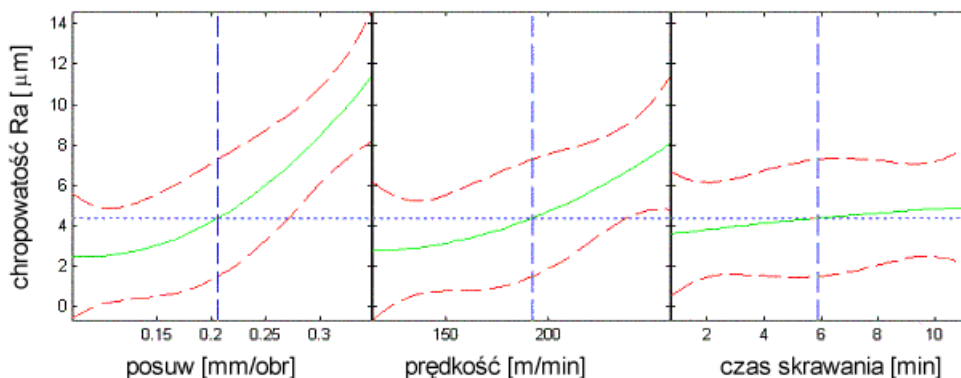
Tablica 10. Wartości parametrów dla modeli R_a chropowatości powierzchni obrabianej, opisanych zależnościami (29), (30), (31) i (32)), dla różnych pokryć noża tokarskiego

Typ modelu	b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	B11	B22	B33
dla noży bez pokrycia										
liniowy	-9,2E-03	3,6E-02	1,8E-06	3,3E-06						
interakcyjny	-3,4E-03	2,7E-02	-1,4E-06	3,0E-06	1,0E-05	-8,0E-05	4,8E-09			
kwadratowy	-1,6E-03	-1,1E-02	-7,9E-07	8,0E-06	1,2E-01	4,0E-10	-6,3E-09			
pełny kwadratowy	1,3E-02	-3,4E-02	-7,6E-06	-3,8E-06	1,1E-05	-6,6E-05	6,4E-09	1,3E-01	8,5E-10	-1,4E-09
dla noży pokrytych TiN										
liniowy	-5,8E-03	4,3E-02	1,6E-07	2,6E-06						
interakcyjny	5,7E-02	-1,7E-01	-1,3E-05	-9,2E-05	3,6E-05	2,6E-04	1,2E-08			
kwadratowy	-2,7E-02	2,3E-02	1,4E-05	1,2E-05	4,8E-02	-2,2E-09	-1,3E-08			
pełny kwadratowy	6,1E-02	-1,9E-01	-1,5E-05	-9,7E-05	2,6E-05	2,7E-04	1,4E-08	1,1E-01	4,6E-10	7,7E-10
dla noży pokrytych TiCN										
liniowy	1,0E-03	2,7E-02	-4,9E-07	-3,0E-07						
interakcyjny	-2,2E-02	1,1E-01	4,3E-06	3,0E-05	-1,5E-05	-9,1E-05	-3,1E-09			
kwadratowy	1,0E-02	-6,0E-02	-1,3E-06	-2,1E-06	2,1E-01	1,3E-10	2,8E-09			
pełny kwadratowy	-2,6E-03	-6,0E-03	1,4E-06	1,1E-05	-9,3E-06	-6,0E-05	4,3E-10	2,0E-01	5,1E-11	1,5E-09

Dla wszystkich ostrzy zaobserwowano dodatnią zależność wskaźnika VB zużycia ostrza w funkcji posuwu, prędkości skrawania i czasu skrawania. Dla przykładowych danych widoczna jest zależność wartości średnich oraz granicznych modelu interakcyjnego wskaźnika VB zużycia ostrza i modelu pełnego kwadratowego parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej dla noży bez pokrycia (rys. 43 i 44).



Rys. 43. Przewidywana wartość wskaźnika VB zużycia ostrza, dla modelu interakcyjnego i noży bez pokrycia



Rys. 44 Przewidywana wartość parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej, dla pełnego modelu kwadratowego i noży bez pokrycia

4.1.5.2. Analiza wiarygodności modelu

Poznanie funkcji regresji umożliwia przewidywanie zmian prawdopodobnych obiektu, nie pozwala jednak oszacować rozbieżności między prognozą a rzeczywistym wyjściem obiektu.

Test F (zależność (37)) bada stosunek oszacowania wariancji $\hat{\sigma}_{\hat{y}}^2$ funkcji regresji \hat{y} (zależność (38)) do oszacowania $\hat{\sigma}_{y-\hat{y}}^2$ wariancji resztowej (zależność (39)):

$$F = \frac{\hat{\sigma}_{\hat{y}}^2}{\hat{\sigma}_{y-\hat{y}}^2}. \quad (37)$$

Można oszacować wariancję funkcji regresji z zależności (38)

$$\hat{\sigma}_{\hat{y}}^2 = \frac{1}{p} \sum_{v=1}^n (\hat{y}_v - \bar{y})^2. \quad (38)$$

Wariancja resztowa może być oszacowana równością (39)

$$\hat{\sigma}_{y-\hat{y}}^2 = \frac{1}{n-p-1} \sum_{v=1}^n (y_v - \hat{y}_v)^2. \quad (39)$$

Funkcja regresji jest istotna, gdy zmienność spowodowana zmiennością wejść x jest większa od zmienności spowodowanej zakłóceniami. Można postawić hipotezę o nieistotności funkcji regresji w postaci:

$$H_0 : \sigma_{\hat{y}}^2 \leq \hat{\sigma}_{\hat{y}}^2 \leq \hat{\sigma}_{y-\hat{y}}^2. \quad (40)$$

Dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$, dla liczby obserwacji n i liczby współczynników regresji $p+1$, wyznacza się z tablic rozkładu F-Snedecora wartość F_{kr} , co oznacza że prawdopodobieństwo pojawienia się wartości mniejszej jest równe poziomowi ufności $1-\alpha$.

Jeśli spełniony jest warunek

$$F = \frac{\hat{\sigma}_{\hat{y}}^2}{\hat{\sigma}_{y-\hat{y}}^2} > F_{kr}, \quad (41)$$

to odrzucana jest hipoteza H_0 (zależność (41)) o nieistotności funkcji regresji z ryzykiem błędu określonym poziomem istotności i należy wnioskować o istotności funkcji regresji.

Tablica 11. Istotność współczynnika korelacji wielowymiarowej-test F (zależność (37))

Parametr	Typ modelu			
	Liniowy	Interakcyjny	Kwadratowy	Pełny kwadratowy
	bez pokrycia			
R_a	31,2514	21,5939	26,2679	24,6787
VB	15,2578	12,6413	16,7138	21,6165
	pokryte TiN			
R_a	14,3718	49,9933	11,9656	22,4175
VB	13,6849	18,0133	14,1061	17,8954
	pokryte TiCN			
R_a	8,5604	5,0385	12,9034	8,6259
VB	4,8553	3,8080	5,6602	4,6143

Wartości testu F , opisanego zależnością (37), dla różnych ostrzy i różnych modeli zestawiono w tablicy 11. Wszystkie obliczone wartości są większe od odpowiednich wartości F_{kr} zmiennej losowej F -Snedecora dla $\alpha = 0,05$ (liniowy – 2,71, interakcyjny i kwadratowy – 2,40 i pełny kwadratowy – 2,30). W związku z powyższym przyjęto, że wszystkie funkcje regresji są istotne.

4.1.5.3. Analiza reszt

Analiza reszt służy do wykrycia błędów w wyznaczeniu modelu przy założeniu, że błędy mają niezależny normalny rozkład ze średnią zero i stałą wariancją. Reszty wyznaczone są jako różnica między obserwowaną i przewidywaną wartością

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = (\mathbf{I} - \mathbf{H})\mathbf{y}. \quad (42)$$

Chociaż reszty, opisane zależnością (42), są skorelowane i mają wariancję, która zależy od wartości dla punktów pomiarowych, w praktyce do skalowania zakłada się, że mają tą samą wariancję. W równaniu poniżej przeskalowana reszta t_i ma rozkład t -Studenta z $(n - p)$ stopniami swobody.

$$t_i = \frac{r_i}{\hat{\sigma}_{(i)}\sqrt{1 - h_i}}, \quad (43)$$

gdzie:

$$\hat{\sigma}_{(i)}^2 = \frac{\|r\|^2}{n-p-1} - \frac{r_i^2}{(n-p-1)(1-h_i)}, \quad (44)$$

t_i - reszta skalowana dla punktu danych i ,

r_i - reszta dla punktu i ,

n - rozmiar danych obserwacji,

p - liczba parametrów modelu,

h_i - i -ty element na przekątnej macierzy H ,

H - wynika z równania (42) $H = \hat{y} y^{-1}$ [MAT98].

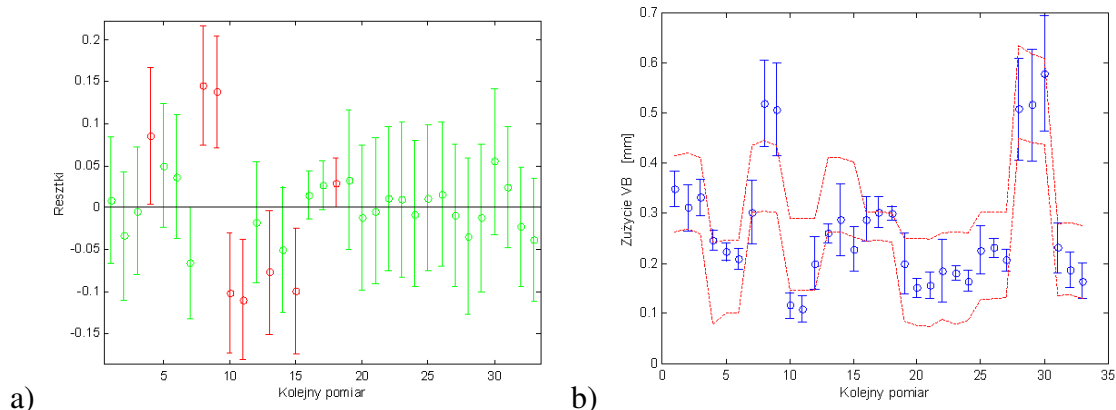
Równanie wariancji (44) jest estymacją wariancji błędów wykluczających punkt i -ty z obliczeń. Test hipotezy dla odrzucanych danych wymaga porównania t_i , opisanych zależnością (43), z krytycznymi wartościami rozkładu t-Studenta. Jeśli t_i (zależność (43)) jest duże, to znaczy to, że reszta ma tę samą wariancję, co pozostałe. Przedział ufności dla średniej każdego błędu opisuje równanie

$$c_i = r_i \pm t_{(1-\frac{\alpha}{2}, \nu)} \hat{\sigma}_i \sqrt{1-h_i}. \quad (45)$$

Przedział ufności, opisany równaniem (45), który nie zawiera zera jest równoważny z odrzuceniem hipotezy (na poziomie istotności α), że średnią reszt jest zero (rys. 45a i 46a). Analizując tylko niepewność modelu interakcyjnego wskaźnika VB zużycia ostrza można zauważyć, że około 20% wartości zmierzonych nie mieści się w przedziale ufności dla tego modelu (nie zawiera zera).

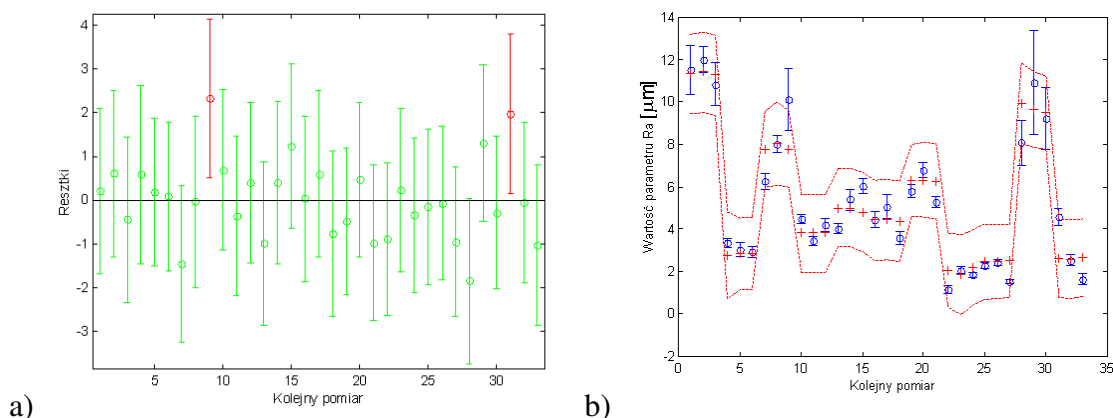
Na rysunku 45b zilustrowano dane pomiarowe wskaźnika VB zużycia ostrza oznaczone jako „o” wraz z niepewnością pomiarową oraz zaznaczono linią przerywaną przedział ufności dla wyznaczonego modelu. Widoczne jest, że niektóre dane nie mieszczą się w przedziale ufności dla modelu (ok. 5% danych).

Różnica między wartościami zmierzonymi i modelem wynika z dużych rozrzutów zużycia narzędzia (trudności w odczycie zużycia, różnym zużywaniu się ostrzy i innych). Potwierdzają to badania innych autorów [SIT98, AST99, GAW00, STO01].



Rys. 45. Analiza resztek modelu interakcyjnego zużycia dla noży bez pokrycia. Po lewej stronie reszty z modelu i błąd modelu (a), po prawej dane wraz z błędami pomiarowymi i przedział ufności dla modelu interakcyjnego oznaczony przerywaną linią (b)

Z analizy danych, przedstawionych na rysunku 45b wynika, że niepewności modelu wskaźnika VB zużycia ostrza są porównywalne z niepewnościami pomiarów. Wzorczując wielkość wskaźnika VB zużycia należy uwzględnić wykazane niepewności pomiarów.



Rys. 46. Analiza resztek pełnego modelu kwadratowego chropowatości powierzchni. Po lewej stronie reszty z modelu i błąd modelu (a), po prawej dane wraz z błędami pomiarowymi i przedział ufności dla modelu kwadratowego oznaczony przerywaną linią (b)

Analizując wykres na rysunku 46b można stwierdzić, że niepewności modelu parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej nie są na tyle małe w porównaniu z niepewnościami pomiarów, że należy uwzględnić niepewności pomiarów wzorczując wielkość parametru R_a .

4.1.6. Wzorcowanie parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia ostrza

Na niepewność oszacowania y ma wpływ niepewność pomiaru $\Delta_{\max}^1 \hat{y}$ oraz niepewność zastosowanego modelu $\Delta_{\max}^2 \hat{y}$ [WYR99, PIO00]

$$\Delta_{\max} \hat{y} = \Delta_{\max}^1 \hat{y} + \Delta_{\max}^2 \hat{y}. \quad (46)$$

Do oszacowania niepewności pomiaru zastosowano metodę powtarzania błędu systematycznego pomiaru bezpośredniego. Pomiar bezpośredni jest w ogólnym przypadku pomiarem wielokrotnym, czyli doświadczeniem złożonym z serii pomiarów pojedynczych, wykonywanych w warunkach powtarzalności.

Jeżeli przyjąć, że wyniki pomiarów wynoszą $y(1), y(2), \dots, y(n)$, to pomiar wielokrotny pozwala na empiryczną estymację wariancji σ^2 i na zmniejszenie granicznego błędu przypadkowego. Celem pomiaru jest wyznaczenie estymaty \hat{y} wartości prawdziwej y i błędu granicznego $\Delta_{\max} \hat{y}$ tej estymaty, czyli granicznego błędu pomiaru. Jako estymatę wartości prawdziwej przyjmuje się średnią arytmetyczną n wyników wykonanych pomiarów

$$\hat{\mu} = \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{\nu=1}^n y(\nu), \quad (47)$$

gdzie $y(\nu)$ - ν -ty pomiar wielkości y .

Jako estymatę wariancji obliczoną z próby n niezależnych obserwacji przyjmuje się

$$\hat{\sigma}^2 = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{\nu=1}^n [y(\nu) - \bar{y}]^2. \quad (48)$$

Uwzględniając powyższe otrzymuje się:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{y} = \bar{y} \pm \Delta_{\max} \hat{y} \\ \Delta_{\max} \hat{y} = \Delta_{\max} = \xi_{\max} + \bar{\varepsilon}_{\max} \\ \bar{\varepsilon}_{\max} = t_{1-\alpha}(n-1) s / \sqrt{n} \\ P \{ \hat{y} \in [\bar{y} - \Delta_{\max} \hat{y}, \bar{y} + \Delta_{\max} \hat{y}] \} \end{array} \right., \quad (49)$$

gdzie:

$t_{1-\alpha}(n-1)$ - kwantyl rzędu $1-\alpha/2$ rozkładu t-Studenta o $n-1$ stopniach swobody,

$\Delta_{\max} \hat{y} = \Delta_{\max}$ - jest błędem granicznym na poziomie ufności $1-\alpha$ estymaty $\hat{y} = \bar{y}$,

$\xi_{\max} = \Delta_{\xi_{\max}} \bar{y}$ jest granicznym błędem systematycznym,

$\varepsilon_{\max} = \Delta_{\varepsilon_{\max}} \bar{y}$ jest granicznym błędem przypadkowym na poziomie ufności $1-\alpha$ średniej arytmetycznej serii pomiarów \bar{y} .

Do oszacowania niepewności modelu, zastosowano metodę powtarzania błędu systematycznego pomiaru pośredniego. Pomiar pośredni polega na wyznaczaniu wartości wielkości mierzonej y metodą pośrednią przez obliczenie go jako wartości funkcji, zwanej funkcją pomiaru

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_m). \quad (50)$$

Wartości dokładne (czyli prawdziwe) wielkości wejściowych x_μ są nieznane, znane są tylko wartości zmierzone dla x_1, x_2, \dots, x_m . Pomiar jest powtarzany n razy w warunkach zachowania powtarzalności. Wyznacza się estymaty \hat{y} wartości prawdziwej y i granicznego błędu $\Delta_{\max} \hat{y}$ pomiaru wraz z odpowiadającym mu poziomem ufności $1 - \alpha$.

Dla obliczenia wykorzystuje się prawo propagacji błędów bezwzględnych, w postaci zwanej prawem różniczki zupełnej:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \hat{y} = \sum_{\mu=1}^m c_\mu \Delta \hat{x}_\mu \\ c_\mu = \left. \frac{\partial}{\partial x_\mu} f(x_1, x_2, \dots, x_m) \right|_{\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_m} \end{array} \right., \quad (51)$$

gdzie

c_μ - współczynnik wrażliwości funkcji na błąd wielkości x_μ liczony dla \hat{x}_μ .

Wartości x_1, x_2, \dots, x_m z niepewnościami $\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_m}$ służą do obliczenia funkcji $y = y(x_1, x_2, \dots, x_m)$. Jeśli niepewności wyznaczenia x_1, x_2, \dots, x_m są niezależne i przypadkowe, to niepewność wyznaczenia wartości funkcji y jest równa

$$\delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_m} \delta x_m \right)^2}. \quad (52)$$

W żadnym wypadku wartość wyliczona z zależności (52) nie jest większa niż zwykła suma opisana zależnością (53)

$$\delta y \leq \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \delta x_1 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_m} \right| \delta x_m. \quad (53)$$

4.1.6.1. Niepewność szacowania parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej

Uwzględniając zależność (46) można obliczyć niepewność szacowania parametru R_a

$$\Delta_{\max} \hat{R}_a = \Delta^1_{\max} \hat{R}_a + \Delta^2_{\max} \hat{R}_a. \quad (54)$$

Po uwzględnieniu zależności (39), niepewność pomiaru wynosi

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{R}_a = \bar{R}_a \pm \Delta^1_{\max} \hat{R}_a \\ \Delta^1_{\max} \hat{R}_a = \Delta_{\max} = \xi_{\max} + \bar{\varepsilon}_{\max} \\ \bar{\varepsilon}_{\max} = t_{1-\alpha}(n-1) s / \sqrt{n} \\ P \{ \dot{R}_a \in [\bar{R}_a - \Delta_{\max} \hat{R}_a, \bar{R}_a + \Delta_{\max} \hat{R}_a] \} \end{array} \right. \quad (55)$$

Uwzględniając zależność (51) oraz (53), niepewność modelu można zapisać jako

$$\begin{aligned} \Delta^2_{\max} \hat{R}_a = & \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_0} \cdot \Delta b_0 \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_1} \cdot \Delta b_1 \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_2} \cdot \Delta b_2 \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_3} \cdot \Delta b_3 \right| + \\ & + \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_{12}} \cdot \Delta b_{12} \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_{13}} \cdot \Delta b_{13} \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_{23}} \cdot \Delta b_{23} \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_{11}} \cdot \Delta b_{11} \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_{22}} \cdot \Delta b_{22} \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial b_{33}} \cdot \Delta b_{33} \right| + \\ & + \left| \frac{\partial R_a}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 \right| + \left| \frac{\partial R_a}{\partial x_3} \cdot \Delta x_3 \right|. \end{aligned} \quad (56)$$

Po policzeniu pochodnych dla równania (32), które jest równaniem najpełniejszym i odkodowaniu czynników wejściowych zależność (56), przekształca się następująco

$$\begin{aligned} \Delta^2_{\max} \hat{R}_a = & |\Delta b_0| + |f \cdot \Delta b_1| + |v_c \cdot \Delta b_2| + |t \cdot \Delta b_3| + |f \cdot v_c \cdot \Delta b_{12}| + |f \cdot t \cdot \Delta b_{13}| + |v_c \cdot t \cdot \Delta b_{23}| + \\ & + |f^2 \cdot \Delta b_{11}| + |v_c^2 \cdot \Delta b_{22}| + |t^2 \cdot \Delta b_{33}| + |(b_1 + 2 \cdot b_{11} + b_{12} \cdot v_c + b_{13} \cdot t) \cdot \Delta f| + \\ & + |(b_2 + 2 \cdot b_{22} + b_{12} \cdot f + b_{23} \cdot t) \cdot \Delta v_c| + |(b_3 + 2 \cdot b_{33} + b_{13} \cdot f + b_{23} \cdot v_c) \cdot \Delta t|. \end{aligned} \quad (57)$$

Jak to wynika z równania (57) błąd modelu jest funkcją posuwu, prędkości i czasu skrawania. Jest to zgodne z oczekiwaniami.

W kolejnym kroku wyliczono błędy współczynników regresji. Wyrażenie ma postać:

$$\Delta b_{\pi} = t_{kr} \sigma_{b_{\pi}}, \quad (58)$$

w którym wariancje poszczególnych współczynników regresji wynoszą:

$$\sigma_{b_{\pi}}^2 = c_{\pi\pi} \sigma^2, \quad (59)$$

gdzie:

$c_{\pi\pi}$ - element macierzy odwrotnej $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$. Elementy diagonalne macierzy $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ charakteryzują wariancje współczynników regresji b_{π} , pozostałe elementy

charakteryzują kowariancje odpowiednich współczynników $b_{\pi i}$ i $b_{\pi j}$. Dlatego macierz

$(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ nazywana jest macierzą kowariancyjną,

σ - nie jest znane, więc używa się estymatora $\hat{\sigma}_{y-\hat{y}}$ o $n-p-1$ stopniach swobody.

Uwzględniając powyższe założenia można zapisać, że

$$b_{\pi} - t_{kr} \hat{\sigma}_{y-\hat{y}} \sqrt{c_{\pi\pi}} < \beta_{\pi} < b_{\pi} + t_{kr} \hat{\sigma}_{y-\hat{y}} \sqrt{c_{\pi\pi}}, \quad (60)$$

gdzie

β_{π} - jest wartością oczekiwaną b_{π} .

Zależność (60) określa przedział ufności dla współczynnika β_{π} na poziomie ufności $1-\alpha$.

Dla wyników uzyskanych dla modelu liniowego parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej, dla płytki wielostrzowej z pokryciem TiN, dla posuwu 0,13 mm/obr, prędkości 137 m/min i czasu skrawania 2 min otrzymano z równania (55)

$$\Delta_{\max}^1 \hat{R}_a = 3,97 \cdot 10^{-5} [\mu m],$$

a z zależności (57)

$$\Delta_{\max}^2 \hat{R}_a = \left| 1,5 \cdot 10^{-6} \right| + \left| 1,13 \cdot 5,2 \cdot 10^{-7} \right| + \left| 3950 \cdot 4,1 \cdot 10^{-10} \right| + \left| 120 \cdot 1,6 \cdot 10^{-9} \right| + \left| 0,043 \cdot 0,01 \right| + \left| 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot 27,3 \right| + \left| 2,6 \cdot 1 \right| = 0,000443 [mm]$$

przy czym do oszacowania błędów współczynników regresji wykorzystano zależności (58) i (59).

Niepewność całkowita parametru R_a , opisana zależnością (54) z uwzględnieniem zależności (52) wyniosła:

$$\Delta_{\max} \hat{R}_a = 0,000445 [mm] = 0,45 [\mu m].$$

4.1.6.2. Niepewność szacowania wskaźnika VB zużycia ostrza

Przy podobnym postępowaniu, jak opisano to dla parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej, policzono niepewność wartości wskaźnika VB zużycia ostrza

$$\Delta_{\max} V\hat{B} = \Delta^1_{\max} V\hat{B} + \Delta^2_{\max} V\hat{B}, \quad (61)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V\hat{B} = V\bar{B} \pm \Delta^1_{\max} V\hat{B} \\ \Delta^1_{\max} V\hat{B} = \Delta_{\max} = \xi_{\max} + \bar{\varepsilon}_{\max} \\ \bar{\varepsilon}_{\max} = t_{1-\alpha}(n-1) s/\sqrt{n} \\ P \{ V\hat{B} \in [V\bar{B} - \Delta_{\max} V\hat{B}, V\bar{B} + \Delta_{\max} V\hat{B}] \} \end{array} \right., \quad (62)$$

$$\begin{aligned} \Delta^2_{\max} V\hat{B} = & |\delta b_0| + |f \cdot \delta b_1| + |v_c \cdot \delta b_2| + |t \cdot \delta b_3| + |f \cdot v_c \cdot \delta b_{12}| + |f \cdot t \cdot \delta b_{13}| + |v_c \cdot t \cdot \delta b_{23}| + \\ & + |f^2 \cdot \delta b_{11}| + |v_c^2 \cdot \delta b_{22}| + |t^2 \cdot \delta b_{33}| + |(b_1 + 2 \cdot b_{11} + b_{12} \cdot v_c + b_{13} \cdot t) \cdot \delta f| + \\ & + |(b_2 + 2 \cdot b_{22} + b_{12} \cdot f + b_{23} \cdot t) \cdot \delta v_c| + |(b_3 + 2 \cdot b_{33} + b_{13} \cdot f + b_{23} \cdot v_c) \cdot \delta t|. \end{aligned} \quad (63)$$

Dla modelu liniowego wskaźnika VB zużycia ostrza, pokrytego TiN, dla posuwu 0,13 mm/obr, prędkości 137 m/min i czasu skrawania 2 min otrzymano, że

$$\Delta^1_{\max} V\hat{B} = 0,028 [mm],$$

oraz

$$\begin{aligned} \Delta^2_{\max} V\hat{B} = & |0,022| + |1,13 \cdot 0,0059| + |3950 \cdot 6,0 \cdot 10^{-7}| + |120 \cdot 2,4 \cdot 10^{-6}| + \\ & + |0,64 \cdot 0,01| + |2,7 \cdot 10^{-5} \cdot 27,3| + |1,3 \cdot 1| = 0,013 [mm]. \end{aligned}$$

Z zależności (61) po uwzględnieniu zależności (52) otrzymano niepewność całkowitą wskaźnika zużycia VB

$$\Delta_{\max} V\hat{B} = \Delta^1_{\max} V\hat{B} + \Delta^2_{\max} V\hat{B} = 0,031 [mm].$$

Wyniki obliczeń $\Delta_{\max} \hat{R}_a$ i $\Delta_{\max} V\hat{B}$ wskazują na małą niepewność pomiarową parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia ostrza.

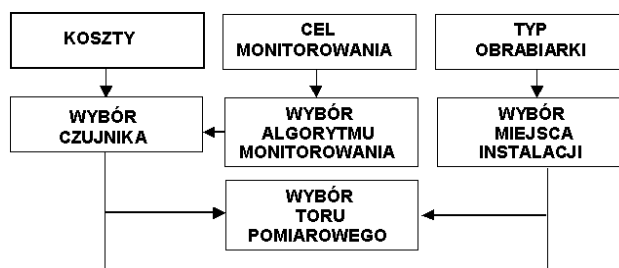
4.2. Analiza cyfrowego obrazu powierzchni obrabianej

W obserwacji powierzchni obrabianej po toczeniu wielkości identyfikujące obiekt fizyczny mierzone są metodami, polegającymi na przetwarzaniu sygnałów niosących informacje o tej powierzchni na sygnały elektryczne i dalszej obróbce tych sygnałów za pomocą sprzętu elektronicznego. Wprowadzenie do pomiaru przetwornika analogowo-cyfrowego wynika z potrzeby zapewnienia odpowiedniej dokładności pomiaru oraz potrzeby dostosowania wyniku pomiaru do warunków cyfrowego przetwarzania w komputerze. Wyniki pomiaru przedstawiane są w formie wizualnej i w odpowiedniej formie cyfrowej do dalszego przetwarzania.

4.2.1. System pomiarowy

W trakcie realizacji badań opracowany został system pomiarowy przydatny w warunkach przemysłowych dla celów monitorowania zużycia ostrza narzędzia i chropowatości powierzchni obrabianej. W fazie projektowania systemu uwzględniono wymagania toru pomiarowego (rys. 47), które obejmowały:

- związek cyfrowego obrazu powierzchni obrabianej z monitorowanym procesem,
- wybór modelu monitorowanego procesu,
- wymagania stawiane torowi pomiarowemu,
- dobór toru pomiarowego,
- porównanie wybranych wariantów [DWO91, GAW98].



Rys. 47. Sieć zależności przy wyborze toru pomiarowego [DWO91]

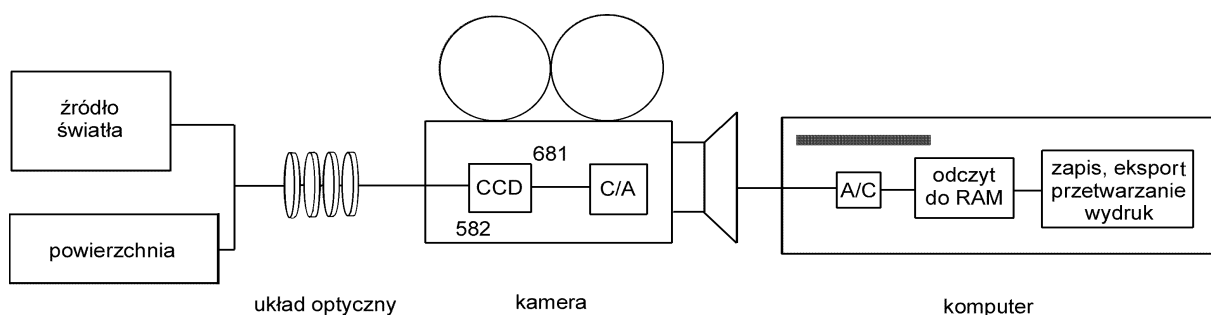
Dla pozyskania cyfrowego obrazu powierzchni obrabianej powstał zatem tor wizyjny (rys. 48), którego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 49.



Rys. 48. Stanowisko do akwizycji obrazów [STO99-1]

Stanowisko do akwizycji obrazów cyfrowych zbudowano wykorzystując następujące elementy: komputer w obudowie przemysłowej z kartą akwizycji obrazu, kamerę cyfrową Panasonic vw - CL 350, zestaw obiektywów, statyw do kamery z przesuwany stolikiem, oświetlacz firmy BOB PREOPTIC (rys. 48).

Założono, że odpowiedź impulsowa przetwornika zainstalowanego w kamerze może być opisana funkcją obrotowo symetryczną, dodatnią wewnątrz obszaru apertury. Zjawisko olśnienia przetwornika, zniekształcenia geometryczne i nierównomierne oświetlenie przedmiotów nie mają wpływu na pomiar [MAT91].



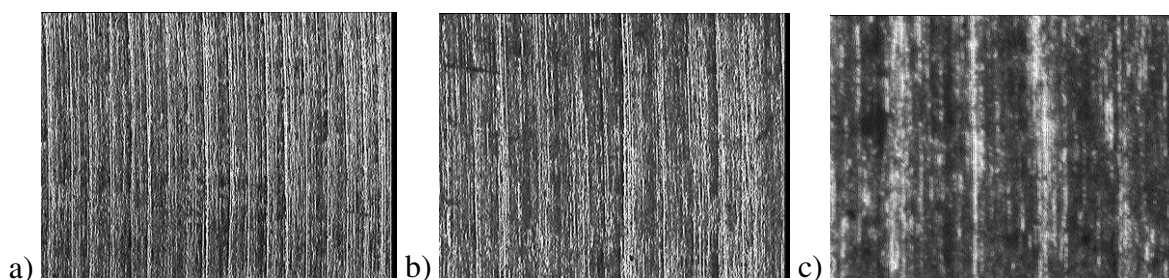
Rys. 49. Schemat ideowy toru wizyjnego

Sposób przetwarzania obrazu optycznego na sygnał elektryczny wykorzystuje akumulację fotonów. Płaszczyzna obrazu jest jedną z płaszczyzn bocznych cienkiej płytki zawierającej dużą liczbę elementów światłoczułych. Jest to matryca zawierająca 681 rzędów po 582 elementarnych komórek przyrządu o sprzężeniu ładunkowym (ang. CCD – charge coupled device) w jednej płytce półprzewodnika o powierzchni $6,6 \times 4,9 \text{ mm}$.

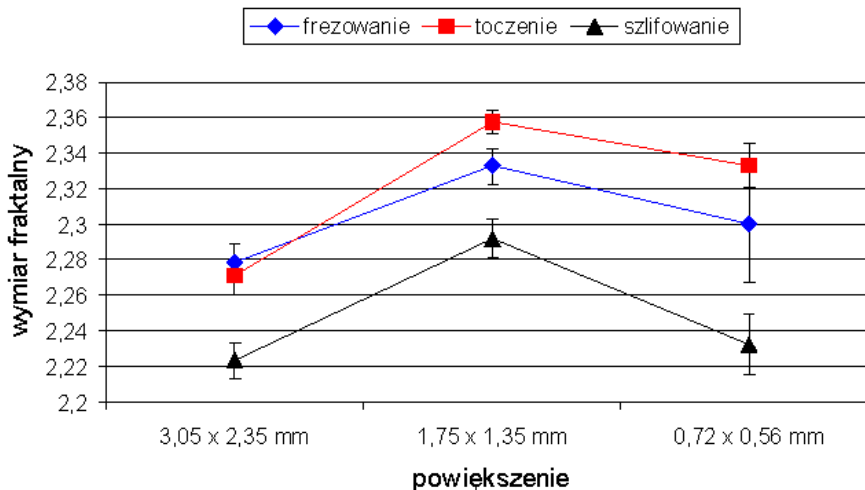
Dla ustalonej zdolności rozdzielczej przetwornika istnieje możliwość zmiany rozdzielczości urządzenia przez odpowiedni dobór powiększenia układu optycznego. Ze względu jednak na ograniczone pole powierzchni obrazu optycznego w kamerze CCD

wzrostowi zdolności rozdzielczej towarzyszy zmniejszenie się wybieranego pola obrazowego na płaszczyźnie przedmiotu.

W badaniach wstępnych zastosowano trzy powiększenia, w których obszar obserwowany w kamerze wynosił odpowiednio 3,05 x 2,35 mm, 1,75 x 1,35 mm oraz 0,72 x 0,56 mm (rys. 50). Wybrano do badań najbardziej przydatne powiększenie takie, w którym obserwowany obszar w kamerze wynosi 1,75x1,35 mm (powiększenie nr 2 – rys. 51). Zdecydowano się na takie powiększenie ze względu na najmniejszy rozkład parametrów, przy czym obliczenia sprawdzające przeprowadzono dla wymiaru fraktalnego, który dla pola 1,75x1,35 mm dawał wartość największą (rys. 51).

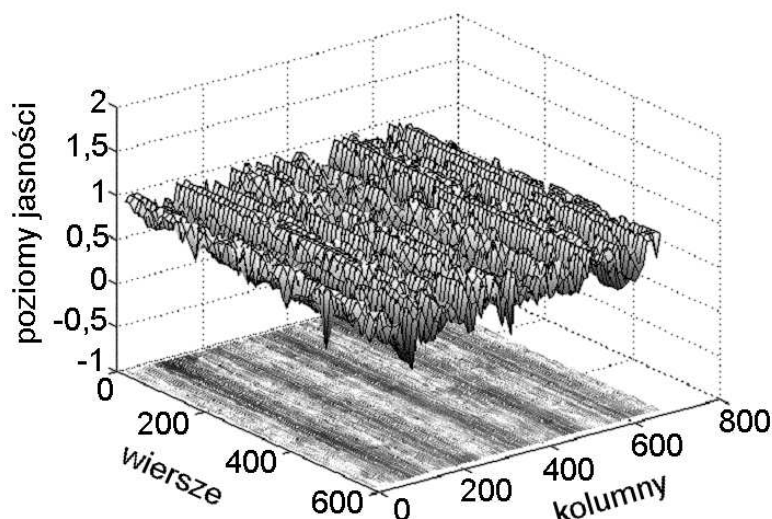


Rys. 50. Cyfrowe obrazy powierzchni obrobionej toczeniem dla 3 różnych powiększeń
a) 3,05 x 2,35 mm b) 1,75x1,35 mm c) 0,72 x 0,56 mm



Rys. 51. Zależność wymiaru fraktalnego od wielkości pola obserwacji kamery

Sygnal wizyjny na wyjściu przetwornika optoelektrycznego, przyjmuje wartości z ograniczonego przedziału $[L_{g \min}, L_{g \max}]$. Wielkość $L_{g \min}$ jest kojarzona w technice telewizyjnej z „poziomem czerni”, natomiast $L_{g \max}$ może oznaczać „poziom bieli”. Na rysunku 52 przedstawiono izometryczny obraz cyfrowy, przy czym dla obrazu intensywności 256 poziomów jasności mieści się w przedziale dyskretnym wartości $[0, 1]$.



Rys. 52. Izometryczne przedstawienie obrazu cyfrowego powierzchni obrobionej dla posuwu 0,27 mm/obr, prędkości skrawania 187,5 m/min i czasu skrawania 6 minut

Powiększony obraz powierzchni obrobionej posiada postać rastrową o liczbie punktów 681x582. Po zakodowaniu obraz ten w formacie sygnału video, przesyłany jest do wejścia karty i przetwarzany na postać cyfrową. Przechowywany jest jako bitmapa BMP (BitMaP) o wielkości 681x582 pikseli. Każdemu punktowi rastra odpowiada 1 słowo pamięci 24 bitów, co powoduje, że na zapamiętanie obrazu potrzeba $24 \times 681 \times 582 = 9512208$ bitów pamięci. W każdym słowie pamięci zakodowana jest w postaci 3 ośmiobitowych liczb barwa odpowiadającego mu punktu na ekranie. Na kolor punktu składają się trzy składowe: niebieska (Blue), zielona (Green), czerwona (Red). Daje to możliwość wyświetlania punktu w jednym z 16777216 kolorów. Zaletami formatu BMP jest jego prostota, jak również szybkość odczytywania pliku przez program graficzny (każdy plik musi być najpierw zamieniany na bitmapę, dopiero wyświetlany przez system). Istotnym elementem opowiadającym się za tą formą zapisu plików graficznych jest jego powszechność.

Do obliczeń wykorzystano pakiet Matlab wraz z Image Processing Toolbox [ZAW99, MAT98, BRZ98, TAR95, ZAL96]. Stosowano macierzowy układ współrzędnych. Obraz wczytywany był jako RGB, następnie zamieniany na obraz intensywności z 256 poziomami jasności i dalej przetwarzany.

4.2.2. Czynniki wpływające na jakość pozyskiwanego obrazu

Zadaniem systemu przetwarzania danych jest przyporządkowanie zestawu danych wejściowych określonej kategorii. Charakterystyczną cechą procesu rozpoznawania obrazów jest to, że różne zestawy danych wejściowych mogą należeć do tej samej kategorii. Z drugiej strony jest też możliwe, że ten sam zestaw danych wejściowych zawiera różne typy obrazów, a zatem przy rozpatrywaniu poszczególnych cech powinien być zaklasyfikowany do różnych kategorii [TAD91, MAL90-2]. Obok podstawowych przyczyn zmienności dużą rolę odgrywa sposób przygotowania źródła obrazu i pobierania z niego informacji.

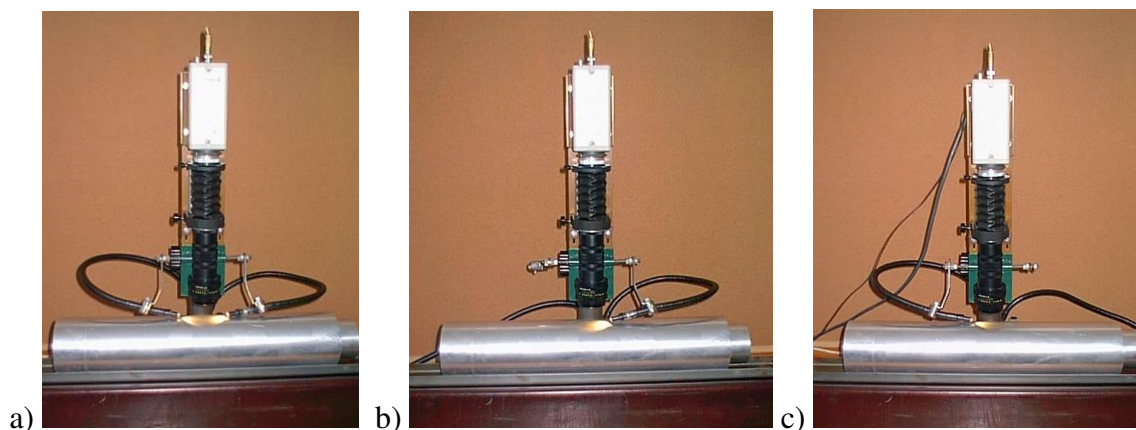
Zmienność danych wejściowych wynika również z zakłóceń między źródłem sygnału a przyrządem pomiarowym oraz z szumów i niedoskonałości samego układu pomiarowego. W ten sposób określony obraz pochodzący z określonego źródła daje wiele, różniących się między sobą, zestawów danych wejściowych do systemu rozpoznawania.

Wstępne przygotowanie obiektów, pomiar i transmisja informacji wymagają za każdym razem indywidualnego podejścia do problemu rozpoznawania obrazów. W badaniach wykorzystano dwa kierunki postępowania: w jednym opis zmienności obrazów zastąpiono przez estymację parametrów statystycznych, w drugim wykorzystano fizyczną wiedzę a priori o źródle obrazu, kanale transmisyjnym i przyrządzie pomiarowym.

Sposób reprezentacji cyfrowej obrazu wpływa na wyniki obliczeń. Rozdzielczość obrazu i liczba dostępnych poziomów jasności decydują o dokładności odwzorowania obrazu ciągłego w dyskretny. Poważnym problemem jest ustalenie, na podstawie obrazu, wzorca dobrej i złej powierzchni. Podobna nierówność może tworzyć na obrazie różne struktury. W przypadku takiej samej powierzchni, przy kolejnej obserwacji, a nawet nowego obrazu uzyskuje się odmienne obrazy powierzchni.

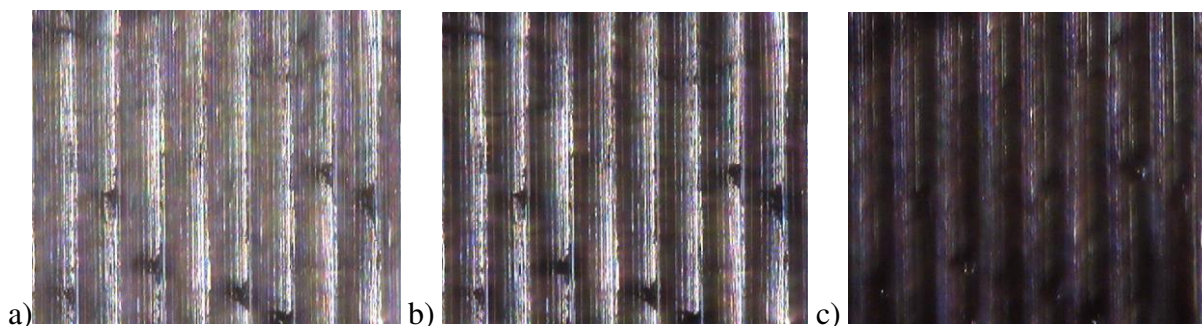
Obraz jest projekcją trójwymiarowej topografii powierzchni. Zależy od takich czynników jak perspektywa, powiększenie i punkt obserwacji. Znaczenie tych czynników przy przetwarzaniu jednolitych obrazów tekstur zostało opisane w wielu pracach [WEC80, COH92]. Przy ograniczeniu zakłóceń standaryzacją badań, otrzymuje się różne współczynniki odbicia i pochłaniania dla różnych materiałów. Wyniki zależą nawet od składu i twardości [ZHA95].

Dlatego dużo uwagi poświęcono opracowaniu metody automatycznej klasyfikacji obrazu przy ograniczeniu wpływu powiększenia, perspektywy i punktu obserwacji. O poprawności działania metody decyduje zatem stałość ustawień układu akwizycji obrazu.

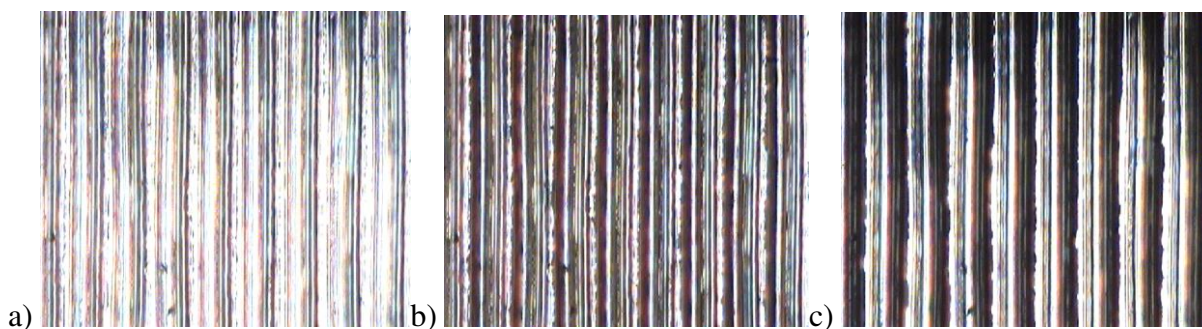


Rys. 53. Sposoby oświetlenia powierzchni a) oświetlenie dwustronne b) oświetlenie zgodne z kierunkiem posuwu c) oświetlenie przeciwne do kierunku posuwu

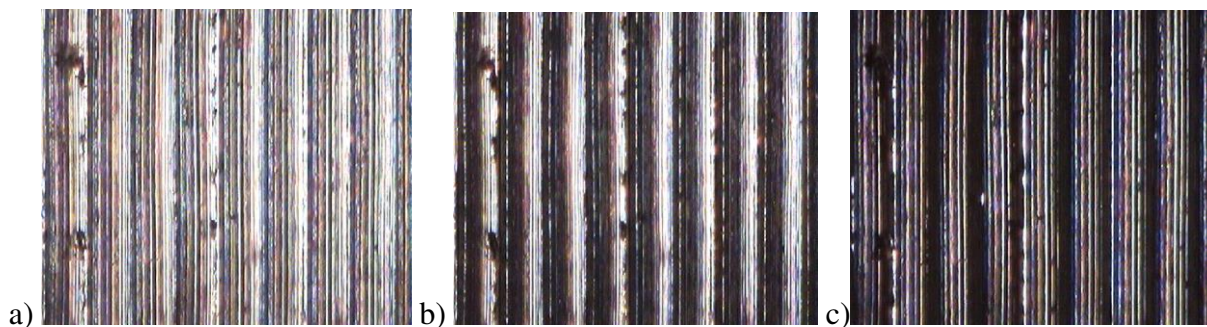
Przebadano trzy sposoby oświetlenia powierzchni obrobionej (rys. 53) – oświetlenie dwustronne, oświetlenie od strony posuwu i od strony przeciwnej posuwowi. Na rysunkach 54, 55 i 56 zilustrowano cyfrowe obrazy powierzchni obrobionej po toczeniu stali dla trzech sposobów oświetlenia powierzchni. Obraz oświetlony dwustronnie (rys. 54a, 55a, 56a) jest jaśniejszy od obrazu oświetlonego jednostronnie. Zgodnie z modelem przedstawionym na rysunku 21 oświetlenie dwustronne jest najefektywniejsze ze względu na niesymetryczność powierzchni obrobionej w toczeniu.



Rys. 54. Cyfrowe obrazy powierzchni obrobionej dla noży bez pokrycia, dla $f=0,21\text{mm/obr}$, $v_c=187,5\text{ m/min}$, $t=6\text{ min}$, dla 3 sposobów oświetlenia a) oświetlenie dwustronne b) oświetlenie przeciwne do kierunku posuwu c) oświetlenie zgodne z kierunkiem posuwu



Rys. 55. Cyfrowe obrazy powierzchni obrobionej dla noży pokrytych TiN, dla $f=0,21\text{mm/obr}$, $v_c=187,5\text{ m/min}$, $t=6\text{ min}$, dla 3 sposobów oświetlenia a) oświetlenie dwustronne b) oświetlenie przeciwne do kierunku posuwu c) oświetlenie zgodne z kierunkiem posuwu



Rys. 56. Cyfrowe obrazy powierzchni obrobionej dla noży pokrytych TiCN, dla $f=0,21\text{mm/obr}$, $v_c=187,5\text{ m/min}$, $t=6\text{ min}$, dla 3 sposobów oświetlenia a) oświetlenie dwustronne b) oświetlenie przeciwne do kierunku posuwu c) oświetlenie zgodne z kierunkiem posuwu

Obraz powierzchni obrobionej jest projekcją struktury geometrycznej powierzchni o prostopadłej kierunkowości [NOW91]. Na podstawowej składowej struktury geometrycznej powierzchni, wynikającej z kinematyczno-geometrycznego odwzorowania narzędzia, występują składowe wyższych rzędów, stanowiące ślady po oddziaływaniach losowych. Można zaobserwować też skazy na powierzchni skrawanej stali w postaci ciemnych obszarów. Na obrazach widoczne jest niedoświetlenie wynikające z krzywizny wałka.

Dane wejściowe odznaczają się znaczną nadmiarowością. Obraz składający się z 681×582 elementów dwudziestoczerobitowych to ponad 1,1 MB informacji, obraz intensywności to nadal około 400 KB informacji, które trzeba zredukować do kilku bitów wskazujących właściwą kategorię. Konieczne jest wyodrębnienie spośród danych zespołu cech mniej lub bardziej charakterystycznych dla rozpoznawanych obrazów i mniej nadmiarowych niż pierwotne informacje wejściowe. Ważne jest uzyskanie skończonej liczby wartości charakterystycznych, które służą do stworzenia podstaw procesu decyzyjnego, prowadzącego do określenia kategorii obrazu na wyjściu systemu rozpoznawania.

Tworzona jest więc wektorowa przestrzeń cech charakterystycznych, której każdy wymiar odpowiada jednej z cech. Zmienność przedstawień obrazów sprawia, że równoważne realizacje obrazu są odwzorowane w przestrzeni cech charakterystycznych jako różne punkty. W przypadku omówionym w pracy wzorcowy zestaw obrazów nie jest dostępny i uznano, że do znalezienia regularności punktów w przestrzeni cech charakterystycznych niezbędna jest analiza położenia tych punktów.

4.2.3. Wskaźniki cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej

Cyfrowy obraz powierzchni obrobionej toczeniem reprezentowany jest macierzą liczb, będących odzwierciedleniem stanu odbicia światła od powierzchni. Tworzą wzór z wyraźnym ukierunkowaniem. Obraz taki może być rozważany jako obraz tekstury.

Rozpoznawanie tekstur to najczęściej tworzenie wektorów cech na podstawie współczynników obliczanych dla kwadratowych fragmentów obrazu zwanych oknami. W metodach statystycznych cechy te są wyznaczane na podstawie zależności statystycznych [RAO93, OJA96, PAY98, SWO97]. Określenie cech charakterystycznych tekstury umożliwia stworzenie wektora cech opisujących obraz.

4.2.3.1. Metody statystyczne I rzędu

Wartość średnia i odchylenie standardowe macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej (tablica 14 pozycja 40 i 41 skutecznie opisują słabą teksturę, w której wzór tekstury jest słaby a różnice jasności duże.

Widoczne jest z obrazów (rys. 54, 55 i 56), że średnia jasność w istotny sposób zależy od położenia okna na obrazie. We wszystkich przypadkach średnia jasność obrazu maleje wraz z oddalaniem się od części środkowej. Odchylenie standardowe nie wykazuje zdecydowanych trendów w zależności od położenia okna.

W tablicy 14 pozycja 42 jest wartością wyznaczoną z histogramu macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej. Pozycja 42 oznacza poziom jasności odczytany dla maksymalnej wartości histogramu. Pozycja 43 oznacza skośność macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej.

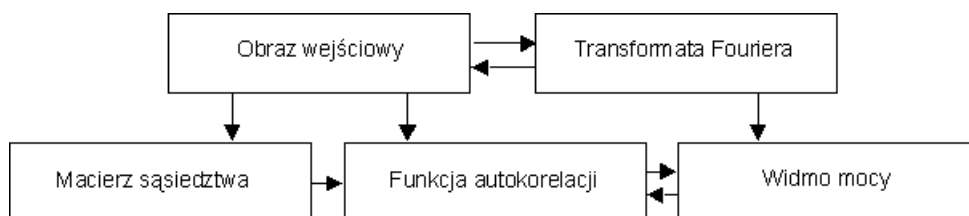
W pracy [WEC80] opisano różne metody statystyczne I rzędu. Stwierdzono, że dla większości zastosowań metody te nie są wystarczające do automatycznej identyfikacji tekstur.

4.2.3.2. Miary bliskości obrazów cyfrowych

Do porównania dwóch obrazów cyfrowych stosuje się miary ich bliskości [SKA98, PRZ95]. W analizie tekstur porównanie dotyczyło obrazu cyfrowego powierzchni obrobionej i obrazu cyfrowego idealnie płaskiej powierzchni odniesienia - zwierciadła. Podstawowymi normami były: średnia różnica, zawartość strukturalna, znormalizowana korelacja skośna, maksymalna różnica, zgodność, błąd średniokwadratowy, szczytowy błąd średniokwadratowy, znormalizowany błąd bezwzględny, znormalizowany błąd średniokwadratowy, norma Minkowskiego, stosunek sygnału do szumu, szczytowy stosunek sygnału do szumu. odpowiednie wzory obliczeniowe zestawiono w tablicy 14 pozycje 25-38 [SKA93, SKA98, PRZ95].

4.2.3.3. Macierze sąsiedztwa

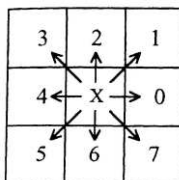
Macierze sąsiedztwa są jedną ze statystyk II rzędu (rys. 57). Są najczęściej wykorzystywane w analizie tekstur obrazu cyfrowego, gdyż metody wykorzystujące macierze sąsiedztwa działają dobrze dla dużej różnorodności tekstur.



Rys. 57. Powiązania między różnymi statystykami II rzędu i obrazem wejściowym [TUC98]

Metoda klasyfikacji tekstury, wykorzystująca macierze sąsiedztwa, polega na zestawieniu, w formie odpowiednio dobranych tablic, liczby współwystąpień poziomów jasności we wszystkich parach punktów obrazu cyfrowego spełniających przyjęte reguły ich wzajemnego położenia.

Na obrazie rastrowym, o siatce prostokątnej, każdy punkt ma 8 sąsiadów. Przyjęto następujące, zgodne z rysunkiem 58, oznaczenia kierunków współwystępowania punktów: dla orientacji 0° - kierunek 0 i odpowiednio dla 45° - 1, dla 90° - 2 i dla 135° - 3.



Rys. 58. Oznaczenie kierunków współwystępowania punktów na obrazie

Macierze sąsiedztwa $P_\phi(a,b)$ można policzyć z poniższych zależności:

$$\begin{aligned}
 P_{0,d}(a,b) &= | \{ ((x,y), (x',y')) \in D : \\
 &\quad x - x' = 0, |y - y'| = d, f(x,y) = a, f(x',y') = b \} | \\
 P_{1,d}(a,b) &= | \{ ((x,y), (x',y')) \in D : \\
 &\quad (x - x' = d, y - y' = -d) \text{ lub } (x - x' = -d, y - y' = d) \\
 &\quad f(x,y) = a, f(x',y') = b \} | \\
 P_{2,d}(a,b) &= | \{ ((x,y), (x',y')) \in D : \\
 &\quad |x - x'| = d, y - y' = 0, f(x,y) = a, f(x',y') = b \} | \\
 P_{3,d}(a,b) &= | \{ ((x,y), (x',y')) \in D : \\
 &\quad (x - x' = d, y - y' = d) \text{ lub } (x - x' = -d, y - y' = -d) \\
 &\quad f(x,y) = a, f(x',y') = b \} |
 \end{aligned} \tag{64}$$

Element macierzy $P_{\phi,d}(a,b)$ na przecięciu a -tej kolumny i b -tego wiersza macierzy P_{ϕ} , w zależności (64), równy jest liczbie wystąpień na obrazie cyfrowym takich par punktów, że poziom jasności punktu pierwszego wynosi a , drugiego b , odległość między nimi d , a kąt ϕ jest zawarty między odcinkiem \overline{ab} a linią poziomą.

Norma odległości używana w definiowaniu macierzy sąsiedztwa może być zdefiniowana następująco:


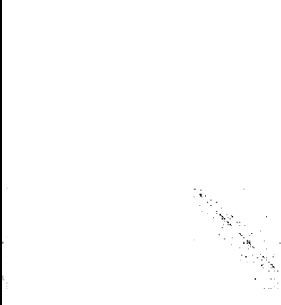
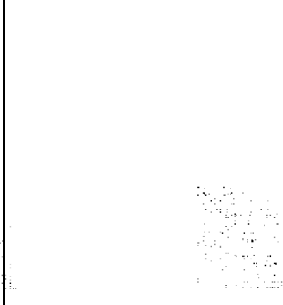
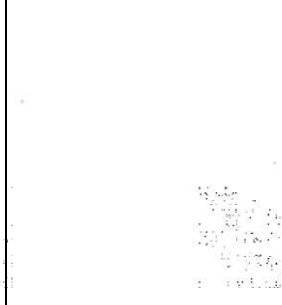
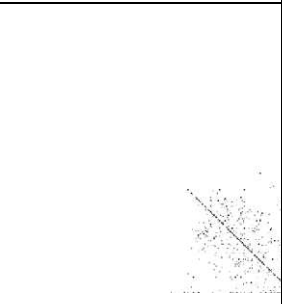

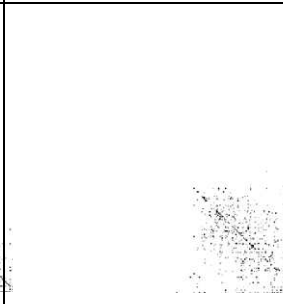

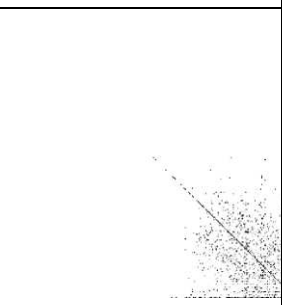
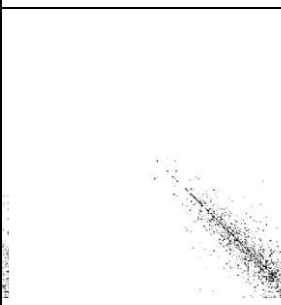


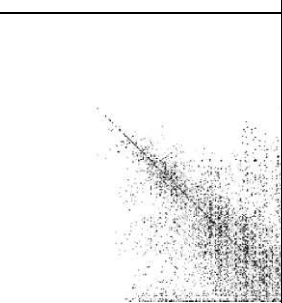
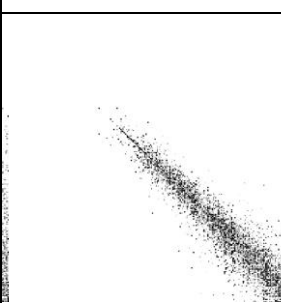
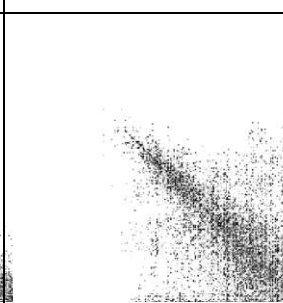
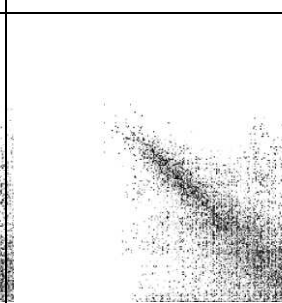
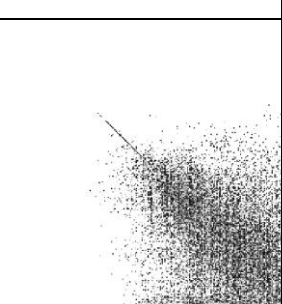
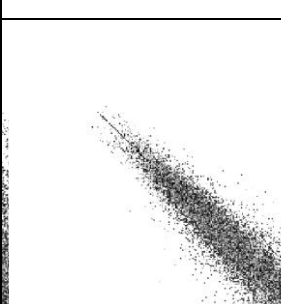
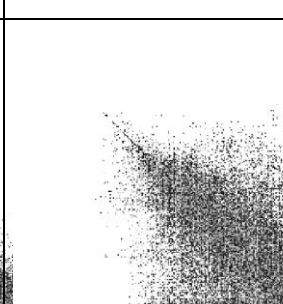
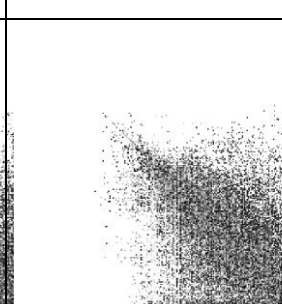
$$d((x, y), (x', y')) = \max \{ |x - x'|, |y - y'| \}. \quad (65)$$

Macierze sąsiedztwa są normalizowane przez podzielenie każdego elementu w macierzy przez liczbę punktów obrazu użytych do obliczenia macierzy. Dla odległości d tą liczbą jest $2 \cdot N_r \cdot (N_c - d)$ dla orientacji 0° , $2 \cdot (N_r - d) \cdot N_c$ dla orientacji 90° , $2 \cdot (N_r - d) \cdot (N_c - d)$ dla orientacji 45° i 135° [AKS01]. W tablicach 12 i 13 przedstawiono graficznie policzone macierze sąsiedztwa policzone dla różnych kierunków, różnych odległości i różnych wielkości okna obrazu.

Tablica 12. Macierze sąsiedztwa w zależności od odległości dla różnych kierunków

	Kierunek 0	Kierunek 2	Kierunek 1	Kierunek 3
d=1				
d=2				
d=3				

Tablica 13. Macierze sąsiedztwa w zależności od wielkości okna dla różnych kierunków

	Kierunek 0	Kierunek 2	Kierunek 1	Kierunek 3
okno 16 x 16				
okno 32 x 32				
okno 64 x 64				
okno 128 x 128				
okno 256 x 256				

Tekstura kierunkowa, z jaką mamy do czynienia w obrazie powierzchni obrobionej, jest bardziej szorstka w jednym kierunku niż w innym, a stopień rozprzestrzenienia wartości macierzy sąsiedztwa dookoła głównej przekątnej różni się wraz z orientacją. Kierunkowość tekstury jest analizowana za pomocą miar rozproszenia macierzy sąsiedztwa, dla różnych orientacji.

Rozkład wartości macierzy sąsiedztwa dla kierunku 2 różni się od pozostałych kierunków we wszystkich przebadanych przypadkach. Pary pikseli w odległości d mają podobne poziomy szarości. Oznacza to, że duże wartości w macierzy sąsiedztwa są skoncentrowane wokół głównej przekątnej.

Dla pozostałych kierunków, poziomy jasności pikseli oddalone o d są różne w taki sposób, że wartości w macierzy sąsiedztwa są rozłożone w miarę równomiernie.

W analizie tekstur nie wykorzystuje się bezpośrednio macierzy sąsiedztwa, lecz pewne cechy charakterystyczne tych macierzy. Algorytm wykorzystania metody macierzy sąsiedztwa do opisu tekstury obejmuje:

1. tworzenie macierzy sąsiedztwa (zależność (64)) dla danego kierunku i odległości (rys. 61 i 62),
2. wyliczenie wektorów cech tekstury (zależność (66)) dla czterech kierunków i danych wartości odległości.

Można przyjąć, że dla $N_g \times N_g$ rozmiarów macierzy sąsiedztwa, cecha F jest ważoną sumą N_g^2 elementów

$$F = \sum_{a=1}^{N_g} \sum_{b=1}^{N_g} W(a,b)P(a,b), \quad (66)$$

gdzie $W(a,b)$ jest wyrażeniem zastosowanym do elementu $P(a,b)$, a a i b są indeksami rzędu i kolumny macierzy sąsiedztwa [WAL95].

Cecha F jest zmienną losową rozkładu, której forma jest opisywana przez momenty, służące do wyznaczenia mocy dyskryminacyjnej cechy. Jeśli F jest globalną cechą, $F(a,b)$ cechą elementarną, to moc dyskryminacyjna cechy globalnej F bezpośrednio zależy od tego jak dobrze każdy z indywidualnych elementów $F(a,b)$ wyznacza klasy. W idealnej sytuacji wszystkie elementy mają wysoką wartość dyskryminacyjną. Zwykle jednak kilka elementów zapewnia dobrą dyskryminację, podczas gdy inne słabą. Ważenie cech $W(a,b)$ zastosowane do każdego elementu $P(a,b)$ powoduje, że wysoką wagę mają tylko elementy z dobrą dyskryminacją.

W literaturze przyjmuje się najczęściej cechy, zaproponowane przez Haralicka. Zdefiniował on 14 miar statystycznych, które mierzą charakterystyki teksturalne, między innymi takie jak jednorodność, kontrast, organizację struktury, złożoność i inne [HAR73, HAR79].

Po przeanalizowaniu różnych miar statystycznych zastosowano sześć współczynników, najczęściej wybieranych [ROG95, WAL95, WAL97, TUC98], których sposób obliczania podano w tabelicy 14 pozycje 1-24. Są to energia, entropia, maksymalne prawdopodobieństwo, kontrast, odwrotny moment różnicowy, współczynnik korelacji.

Tablica 14. Zestawienie opisu cech wyznaczonych z cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej

Nr cechy	Opis cechy				
	Statystyka	Współczynnik	Wzór	Orientacja	Oznaczenie
1	Macierz sąsiedztwa danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej	Energia	$\sum_{a,b} P_{\phi,d}^2(a,b)$	0°	F10
2				90°	F12
3				45°	F11
4				135°	F13
5		Entropia	$\sum_{a,b} P_{\phi,d}(a,b) \log_2 P_{\phi,d}(a,b)$	0°	F20
6				90°	F22
7				45°	F21
8				135°	F23
9		Maksymalne prawdopodobieństwo	$\max_{a,b} \sum_{a,b} P_{\phi,d}(a,b)$	0°	F30
10				90°	F32
11				45°	F31
12				135°	F33
13		Kontrast	$\sum_{a,b} a-b ^{\kappa} P_{\phi,d}^{\lambda}(a,b)$ $\kappa=2, \lambda=1$	0°	F40
14				90°	F42
15				45°	F41
16				135°	F43
17		Odwrotny moment różnicowy	$\sum_{a,b;a \neq b} \frac{P_{\phi,d}^{\lambda}(a,b)}{ a-b ^{\kappa}}$	0°	F50
18				90°	F52
19				45°	F51
20				135°	F53
21		Współczynnik korelacji	$\frac{\sum_{a,b} [(a \cdot b) P_{\phi,d}(a,b)] - \mu_x \cdot \mu_y}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$ $\mu_x = \sum_a a \sum_b P_{\phi,d}(a,b)$ $\mu_y = \sum_b b \sum_a P_{\phi,d}(a,b)$ $\sigma_x = \sum_a (a - \mu_x)^2 \sum_b P_{\phi,d}(a,b)$ $\sigma_y = \sum_b (b - \mu_y)^2 \sum_a P_{\phi,d}(a,b)$	0°	F60
22				90°	F62
23				45°	F61
24				135°	F63

25	Normy bliskości dwóch macierzy danych reprezentujących obraz	Średnia różnica	$\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)] / N_r \cdot N_c$	AD
26	powierzchni obrobionej	Zawartość strukturalna	$\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y)]^2 / \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [\hat{f}(x, y)]^2$	AC
27	$\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} f(x, y)$	Znormalizowana korelacja skośna	$\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} f(x, y) \times \hat{f}(x, y) / \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y)]^2$	NK
28	i reprezentujących obraz	Maksymalna różnica	$\text{Max}\{ f(x, y) - \hat{f}(x, y) \}$	MD
29	powierzchni odniesienia	Zgodność	$1 - \left(\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2 / \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y)]^2 \right)$	IF
30	$\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} \hat{f}(x, y)$	Błąd średniokwadratowy	$\frac{1}{N_r \cdot N_c} \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2$	MSE
31		Szczytowy błąd średniokwadratowy	$\frac{1}{N_r \cdot N_c} \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2 / [\max\{f(x, y)\}]^2$	PMSE
32		Znormalizowany błąd bezwzględny	$\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} f(x, y) - \hat{f}(x, y) / \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} f(x, y) $	NAE
33		Znormalizowany błąd średniokwadratowy	$\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2 / \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y)]^2$	NMSE
34		Norma Minkowskiego	$\left\{ \frac{1}{N_r \cdot N_c} \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} f(x, y) - \hat{f}(x, y) ^p \right\}^{1/p}, p = 1, 2, 3, \dots$	Lp1
35				Lp2
36				Lp3
37		Stosunek sygnału do szumu	$10 \log_{10} \left(\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y)]^2 / \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2 \right)$	SNR
38		Szczytowy stosunek sygnału do szumu	$10 \log_{10} \frac{\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [\max\{f(x, y)\}]^2}{\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2}$	PSNR
39	Wymiar fraktalny macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej		$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg(N(\varepsilon))}{\lg\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)}$	D
40	Średnia wartość macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej		$\frac{\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} f(x, y)}{N_r \cdot N_c}$	μ_o
41	Odchylenie standardowe macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej		$\sqrt{\frac{\sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} (f(x, y) - \mu)^2}{(N_r - 1) \cdot (N_c - 1)}}$	σ_o

42	Poziom jasności dla maksymalnej wartości histogramu macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej		L_g
43	Skośność macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej	$\frac{1}{N_r \cdot N_c \cdot S_q^3} \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} \eta^3(x, y),$ gdzie: $S_q = \sqrt{\frac{1}{N_r \cdot N_c} \sum_{x=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_c} \eta^2(x, y)}$ - średnie kwadratowe odchylenie poziomów jasności $\eta(x, y)$ - powierzchnia pozostała otrzymana przez odjęcie od $f(x, y)$ płaszczyzny średniej otrzymanej metodą najmniejszych kwadratów	S_o
44	Częstotliwość, odpowiadająca posuwowi, wyznaczona z funkcji widmowej gęstości mocy macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej		f_o

Energia albo drugi moment kątowy jest miarą jednorodności obrazu cyfrowego (tablica 14 pozycje 1-4). Wartość energii zwiększa się w miarę uzyskiwania obrazu jednorodnego.

Entropia (tablica 14 pozycje 5-8) jest miarą nieuporządkowania macierzy danych reprezentującej obraz powierzchni obrobionej. Wartości entropii rosną ze zwiększaniem liczby poziomów jasności na obrazie i większym równomiernym rozłożeniem wartości w macierzy sąsiedztwa.

Kontrast jest miarą lokalnej wariancji macierzy danych reprezentującej obraz powierzchni obrobionej (tablica 14 pozycje 13-16). Silnie zależy od kierunku. Jeżeli po punkcie o określonej szarości następuje punkt o takiej samej szarości, to kontrast pomiędzy punktami jest zerowy. Kontrast ma większą wartość dla obrazów, które mają dużą liczbę lokalnych wariancji przestrzennych, mniejszą dla obrazów ze zrównoważonym (jednolitym) przestrzennym rozkładem.

Odwrotny moment różnicowy (tablica 14 pozycje 17-20) jest podobny do kontrastu. Wartościom cechującym się dużym kontrastem odpowiadają małe współczynniki wagowe. Współczynnik jest zawsze dodatni, przyjmuje wartości z przedziału (0;1]. Wartość zerowa jest granicą teoretyczną, niemożliwą do osiągnięcia, gdyż różnica (a – b) w praktyce zawsze ma wartość skończoną.

Współczynnik korelacji (tablica 14 pozycje 21-24) jest miarą liniowych kierunkowych struktur w kierunku ϕ . Wartość jego wzrasta, gdy rosną wartości korelacji w danym kierunku macierzy danych reprezentującej obraz powierzchni obrobionej.

4.2.3.4. Metody fraktalne

Fraktale są pojęciem matematycznym. Słowo "fraktal" zostało stworzone w roku 1975 przez B. Mandelbrota i pochodzi od łacińskiego słowa fractus oznaczającego „złamany”. Fraktal jest obiektem, dla którego wymiar Hausdorffa-Besicovitcha (wymiar fraktalny) jest większy od wymiaru topologicznego. Wymiar fraktalny, różnie definiowany, określa się na podstawie relacji między powierzchnią lub objętością fraktala a jego długością. Wymiar ten przyjmuje dla fraktala wartości niewymierne, wskazując jednocześnie w jaki sposób fraktal wypełnia przestrzeń, w której jest osadzony. Proste fraktale wykazują cechę samopodobieństwa - obrazy ich struktury są takie same w każdym powiększeniu.

Benoit Mandelbrot przypisał fraktalom trzy własności: opisywane są zależnością rekurencyjną a nie wzorem matematycznym, wymiar ich nie jest liczbą rzeczywistą i wykazują cechy samopodobieństwa [KUD93].

Definicja wymiaru pojemnościowego: F zawiera się w n -wymiarowej przestrzeni euklidesowej (np. $n=2$, $n=3$). Nakrywamy go zbiorem n -obiektów (kwadratów, sześciątów..) o bokach ε . Niech $N(\varepsilon)$ będzie minimalną liczbą n -obiektów niezbędnych do pokrycia całego obiektu F . Dla małego ε zachodzi:

$$N(\varepsilon) \approx \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^D, \quad (67)$$

gdzie D nie jest liczbą całkowitą.

Przekształcenie zależności (67) prowadzi do sformułowania, zgodnie z propozycją Kołmogorowa, wyrażenia na wymiar fraktalny [OTT97, MAR96, SCH95]:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg(N(\varepsilon))}{\lg\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)}. \quad (68)$$

Zauważono, że niektóre powierzchnie wykazują własności określane mianem fraktalnych. Własność samopodobieństwa oznacza posiadanie tych samych statystyk niezależnie od powiększenia. Samoafiniczność fraktala natomiast oznacza, że zależą parametry jego opisu od powiększenia. Różnica między właściwością samopodobieństwa i samoafiniczności jest taka, że fraktale samopodobne wymagają tylko jednego parametru w definicji – D , podczas gdy samoafiniczność wymaga dodatkowego parametru związanego z powiększeniem. Drugi parametr nazywany jest topothesy, parametrem topologicznym.

W praktyce żadna powierzchnia nie ma własności fraktalnych w każdej skali, a tylko w pewnym zakresie. Nie ma więc unikalnej wartości D , dla konkretnej powierzchni, tak jak

nie ma unikalnych innych parametrów. Obróbka ubytkowa, ściśle związana z propagacją pęknięć poddaje się opisowi za pomocą właściwości fraktalnych [WHI94].

Profil powierzchni $h(r)$ może zostać opisany jako zależny od wymiaru fraktalnego równaniem (69):

$$h(r) = G^{(D-1)} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos(2\pi\gamma^n r)}{\gamma^{(2-D)n}} \quad 1 < D < 2, \quad \gamma > 1, \quad (69)$$

gdzie stała G powiązana jest z topothesy :

$$\Lambda = G / (2D - 2) \sqrt{2 \ln \gamma}$$

γ^n jest odwrotnością długością fali $\gamma^n = 1/\lambda^n$.

Zależność (69) jest funkcją Weierstrasse-Mandelbrota [WHI94, AHN96].

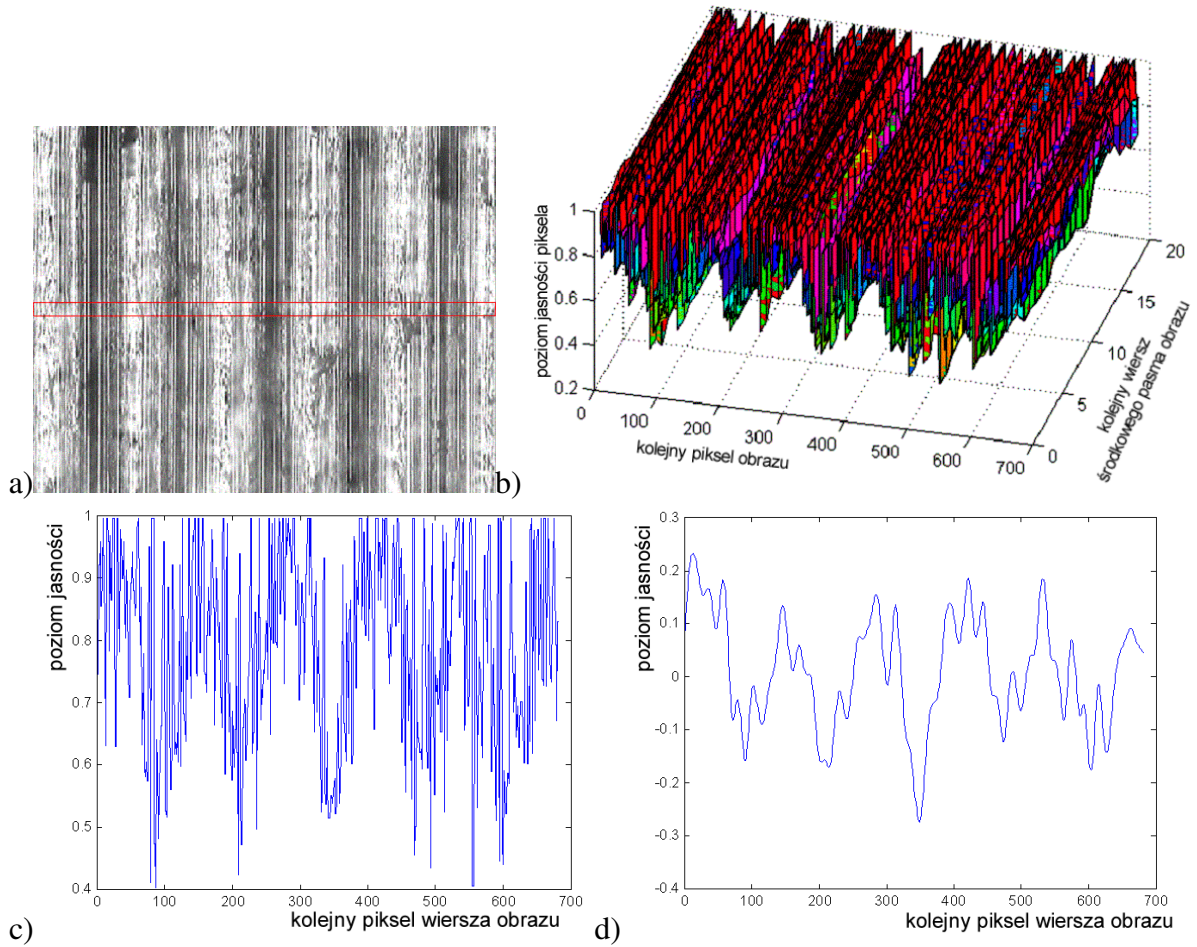
4.2.3.5. Estymacja posuwu z widmowej gęstości mocy pasma obrazu

W procesie obliczania pasma częstotliwości odpowiadającego posuwowi, pobierane są dane z każdego z 20 wierszy środkowego pasma macierzy danych reprezentującej obraz powierzchni obrobionej (rys. 59a). Izometryczny wykres pasma środkowego obrazu można zaobserwować na rysunku 59b. Dla każdego z danych wiersza dokonywane są następujące przekształcenia:

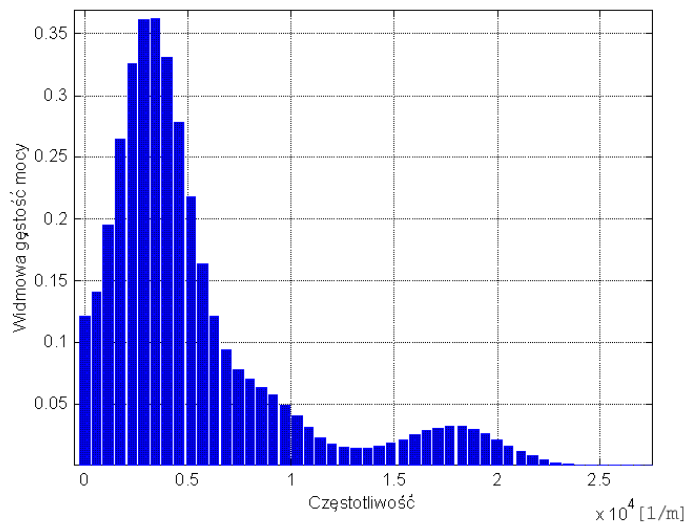
1. skalowanie,
2. filtracja pasmowa (przykładowy wiersz obrazu przed i po filtracji pasmowej można zaobserwować na rysunku 59c i 59d),
3. obliczenie funkcji widmowej gęstości mocy (rys. 60),
4. wyszukiwanie częstotliwości dla której pasek mocy przybiera wartość maksymalną,
5. przeliczenie częstotliwości na posuw.

Wynikowy posuw jest średnią wartością częstotliwości ze wszystkich wierszy pasma środkowego macierzy danych reprezentującej obraz powierzchni obrobionej i jego wartość stanowi jeden z elementów wektora cech (tablica 14 pozycja 44).

Na rysunku 60 przedstawiono widmową gęstość mocy pojedynczego wiersza macierzy danych, reprezentującego obraz powierzchni obrobionej, po zastosowaniu filtracji pasmowej i skalowaniu. Można w ten sposób odczytać częstotliwość, dla pasma maksymalnej wartości widmowej gęstości mocy, odpowiadającą posuwowi. Dla rozkładu widmowej gęstości mocy z rysunku 60 można odczytać częstotliwość jako $0,3 \cdot 10^4 \left[\frac{1}{m} \right]$, co odpowiada posuwowi około 0,34 mm/obr.



Rys. 59. Cyfrowy obraz z zaznaczonym pasmem środkowym (a), izometryczny wykres pasma środkowego obrazu (b), pojedynczy wiersz obrazu pasma środkowego obrazu (c) oraz ten sam wiersz po filtracji pasmowej (d), dla noży bez pokrycia, posuwu 0,27 mm/obr, prędkości skrawania 187,5 m/min i czasu skrawania 6 min.



Rys. 60. Widmowa gęstość mocy po skalowaniu i filtracji pasmowej wiersza obrazu

4.3. Estymacja parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej i wskaźnika VB zużycia ostrza z wykorzystaniem sieci neuronowej

Podstawowymi informacjami wymaganymi przez system monitorowania w obróbce skrawaniem są jakość powierzchni obrabianej i stan zużycia ostrza. Niestety, nie są to parametry możliwe do ustawienia, takie jak posuw czy głębokość skrawania. Muszą być więc estymowane podczas obróbki w celu przewidywania przyszłych ich stanów. Coraz częściej w estymacji sięga się po sieci neuronowe jako uniwersalny aproksymator [NAL00].

Przetwarzanie informacji w sieciach neuronowych realizowane jest przez gęstą siatkę węzłów obliczeniowych i ich połączeń. Przetwarzanie neuronowe charakteryzują pewne właściwości. Wybierana jest architektura sieci i reprezentatywne przykłady do uczenia, a zdobywanie wiedzy przez sieć odbywa się przez naukę. Obliczeniami są przekształcenia nieliniowe o niewielkiej dokładności. Algorytm przechowywany jest w architekturze sieci i wartościach wag.

Sieci neuronowe mają przewagę nad klasycznymi metodami estymacji związaną z odpornością na błędy i brakiem konieczności wyznaczenia w jaki sposób wyjścia zależą od wejść. Wykorzystywana w sieciach neuronowych właściwość uczenia pozwala na sekwencyjne prezentowanie przykładów, minimalizację funkcji celu i uogólnienie informacji z przykładów. Układ estymujący z siecią neuronową można nazwać czujnikiem inteligentnym, który integruje cechy sygnałów do uzyskania informacji o badanym zjawisku.

4.3.1. Przygotowanie wektora cech

Obiekt opisywany jest wieloma charakterystykami, reprezentującymi zbiór elementarnych jego właściwości. Właściwości te formułują opis wzoru obiektu. Opis statystyczny obiektu używa elementarnych opisów numerycznych zwanych cechami. Cecha (wzór), która opisuje obiekt jest wektorem opisów elementarnych. Jeśli opisy elementarne były wybierane właściwie, podobieństwo obiektów w każdej klasie jest wynikiem sąsiedztwa cech w przestrzeni cech.

Zastosowano układ który mierzy i integruje różne cechy tej samej macierzy danych reprezentujących obraz. Dla macierzy danych przypisano wielkości poddające się pomiarowi (cechy). Wartości cech, wspólnie ujęte w uporządkowany sposób, tworzą tzw. wektor-kolumnę wartości cech

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad (70)$$

który jest źródłem informacji o powierzchni obrobionej. Zbiór wszystkich wartości, które mogą przyjmować cechy obiektów, w rozpatrywanym zadaniu, jest przestrzenią cech. Oznaczony on został jako X (zależność (70)) [TAD91, ZUR96, KUR97, MAL90-2].

W pracy zestawiono 44-wymiarową przestrzeń cech, gdzie elementami wektora cech są współczynniki wyznaczone z cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej. Pełne zestawienie cech pokazano w tablicy 14. Cechy od 1 do 24 oznaczają współczynniki wyznaczone z macierzy sąsiedztwa dla odległości 2 i różnej orientacji. Cechy od 25 do 38 to wykorzystane normy jakości obrazów do porównania dwóch macierzy danych: reprezentujących obraz powierzchni chropowatej i idealnie płaskiej. Cecha 39 to wymiar fraktalny macierzy danych reprezentujących obraz. Cechy 40 i 41 to średnia i odchylenie standardowe. Cecha 42 to poziom jasności dla maksymalnej wartości histogramu, a cecha 43 to skośność macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej. Cecha 44 to częstotliwość, odpowiadająca posuwowi, wyznaczona z widmowej gęstości mocy macierzy danych reprezentujących obraz.

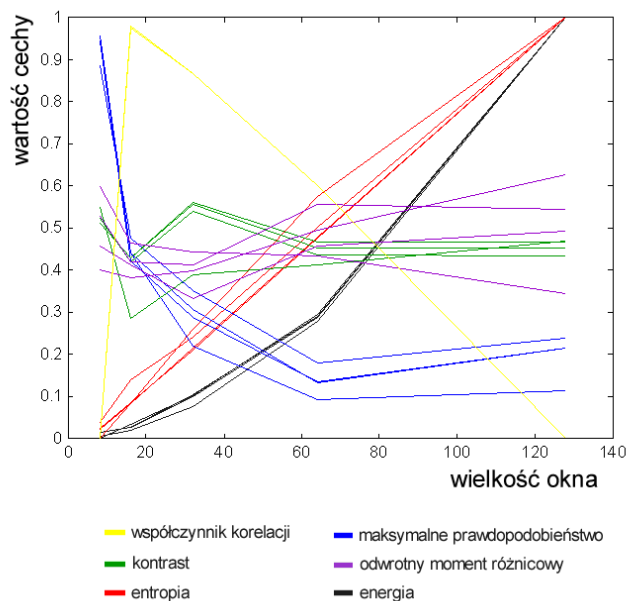
Cechy zestawione w tablicy 14 tworzą wektor, który został wykorzystany do estymacji wskaźnika VB zużycia ostrza i parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej.

4.3.1.1. Wpływ wielkości okna na wartość cech

Wszystkie cechy wyznaczono z okna cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej. Ze względu na techniczne uwarunkowania i realizację algorytmu wyznaczania macierzy sąsiedztwa, norm bliskości obrazów, wymiaru fraktalnego i statystyk I rzędu, zastosowano okno kwadratowe. Wpływ lokalizacji okna tekstury na obrazie nie był krytyczny ze względu na normalizację danych, ale w celu ujednoczenia pobierania prób wybrano część środkową obrazu. Rozważania odnośnie wielkości i kształtu okna dla cech wyznaczanych z macierzy sąsiedztwa przeprowadzono w [ROG95]. Otrzymano, że minimalną wielkością okna, dla ultrasonograficznych obrazów wątroby, była macierz 16 x 16 pikseli.

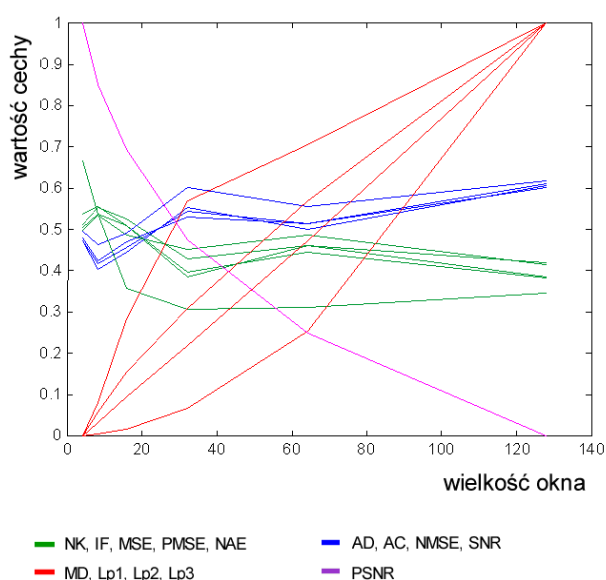
Dla zbadania wpływu rozmiaru okna na wartości cech wybrano obrazy, które były odpowiednikami punktów eksperymentu, dla noży bez pokrycia i przy zastosowaniu oświetlenia dwustronnego. Wybrano środkowy obszar obrazu o rozmiarach 128 x 128, a następnie dzielono go na coraz mniejsze kwadraty o rozmiarach kolejno 64, 32, 16, 8 i 4 tak, by macierze okien nakładały się na siebie. Stwierdzono, że zmiany cech wyznaczonych z macierzy sąsiedztwa, mają charakter zbliżony dla różnych kierunków współwystępowania punktów (rys. 61). Kontrast oraz odwrotny moment różnicowy wykazywały względnie stałą wartość niezależną od wielkości okna. Entropia i energia rosły wraz z rozmiarem okna.

Malejącą wartość wraz z rosnącą wielkością okna miały maksymalne prawdopodobieństwo i współczynnik korelacji.



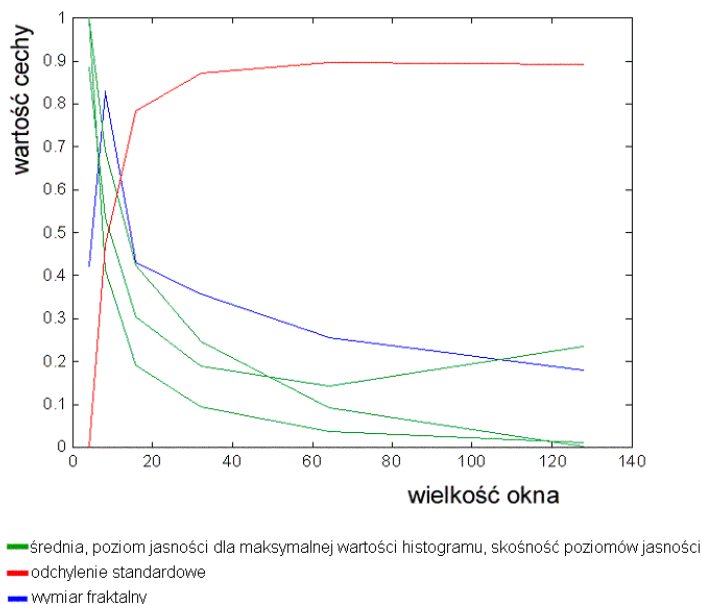
Rys. 61. Zależność cech wyznaczonych z macierzy sąsiedztwa od wielkości okna obrazu

Normy bliskości obrazów zachowywały względnie stałą wartość niezależnie od rozmiaru okna (rys. 62). Szczytowy stosunek sygnału do szumu miał tendencję malejącą, zaś norma Minkowskiego i maksymalna różnica wzrastały z rozmiarem okna.



Rys. 62. Zależność cech - norm bliskości obrazów od rozmiaru okna obrazu

Wielkość wymiaru fraktalnego spadała z rozmiarem okna. Silną tendencję malejącą wykazywała też średnia, poziom jasności dla maksymalnej wartości histogramu, skośność macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej. Odchylenie standardowe macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej rosło wraz z rozmiarem okna (rys. 63).



Rys. 63. Zależność statystyk I rzędu oraz wymiaru fraktalnego od wielkości okna obrazu

W celu uniknięcia wpływu rozmiaru okna na wartości cech zdecydowano się na jeden zestandaryzowany jego rozmiar. Wprawdzie przyjęcie dużego rozmiaru okna zapewnia małą wrażliwość na zakłócenia i obecność szkodliwych elementów na powierzchni, to jednak mniejszy jego rozmiar skraca czas obliczeń. Uznano, że rozmiar okna 64 x 64 jest optymalny także ze względu na to, że niektóre z cech stabilizowały na tym poziomie swoją wartość.

4.3.1.2. Normalizacja wektora cech

Wśród danych, wykorzystywanych do syntezy modelu sieci neuronowej występują wielkości o zróżnicowanych zakresach zmienności. Należy je normalizować. Do najczęściej stosowanych metod normalizacji należą:

1. Skalowanie liniowe do jednostkowej wariancji. Ta procedura normalizacji polega na transformacji składowej cechy x , do wartości przypadkowej z zerową średnią i jednostkową wariancją

$$\tilde{x} = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (71)$$

gdzie μ i σ są średnią i odchyleniem standardowym cechy.

Przy założeniu normalnego rozkładu każdej cechy, prawdopodobieństwo, że \tilde{x} będzie występowało w przedziale $[-1,1]$ wynosi 68%.

2. Zmodyfikowane skalowanie liniowe do jednostkowej wariancji. Ta procedura normalizacji polega na transformacji składowej cechy x do wartości przypadkowej z zerową średnią i jednostkową wariancją

$$\tilde{x} = \frac{\frac{x - \mu}{\sigma} + 1}{2} \quad (72)$$

i gwarantuje z prawdopodobieństwem 99%, że \tilde{x} będzie w przedziale $[0,1]$.

3. Liniowe skalowanie do zakresu jednostkowego. Dla najniższego poziomu l i najwyższego u , składnik cech po normalizacji wynosi

$$\tilde{x} = \frac{x - l}{u - l} \quad (73)$$

i mieści się w zakresie $[0,1]$ [NAL00, AKS01].

Metoda normalizacji powinna być dobierana w zależności od uzyskiwanych rezultatów.

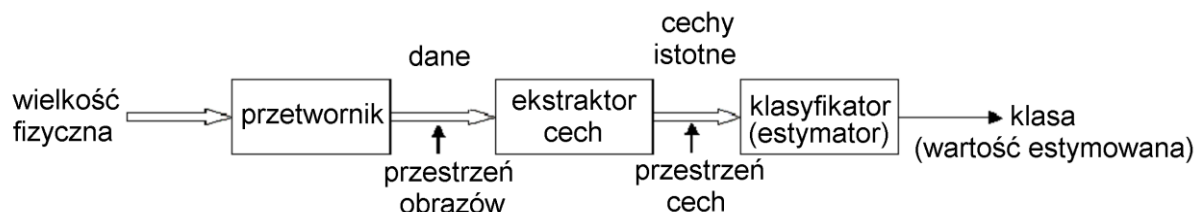
4.3.1.3. Selekcja cech

Ważnym zagadnieniem w strategii pomiarowej jest związek między liczbą cech charakterystycznych a liczebnością zestawu wzorcowego. Skromny zestaw wzorcowy nie pozwala na estymację wielkości z dostateczną dokładnością. Można oczekiwać, że przy danej liczebności zestawu wzorcowego istnieje pewna optymalna liczba cech charakterystycznych. Zarówno mniejsza, jak i większa liczba cech daje większy błąd [NAL00]. Nieograniczone rozszerzanie liczby zmiennych objętych pomiarem nie musi więc wcale prowadzić do bardziej wiarygodnych wyników.

Klasyfikacja obrazów dokonywana jest na podstawie reguły decyzyjnej. Metody określania reguły decyzyjnej (syntezy klasyfikatora) zależą od ilości informacji wstępnej (rys. 64). W przypadku pełnej informacji statystycznej układ nie wymaga uczenia, ponieważ regułę decyzyjną można zbudować bezpośrednio na podstawie rozkładów prawdopodobieństw. Wtedy zgodnie z regułą Bayesa można wyznaczyć prawdopodobieństwa a posteriori dla danego wektora obserwacji i na bazie tych prawdopodobieństw utworzyć regułę decyzyjną.

Gdy informacja wstępna jest niepełna i niewystarczająca do syntezy układu, wtedy powstaje konieczność uczenia. Uczenie powinno być tak zorganizowane, aby na podstawie

obserwacji można było z upływem czasu określić optymalne wartości parametrów klasyfikatora. Układ uczący się, w którym wartości optymalne parametrów osiąga się dopiero po pewnym czasie w wyniku procesu uczenia, nazywa się układem asymptotycznie optymalnym.



Rys. 64. Postępowanie klasyfikujące (estymujące)

Aby opracować regułę decyzyjną o optymalnych własnościach należy sformułować funkcję kryterialną, która będzie charakteryzować jakość działania systemu. Następnie regułę decyzyjną powinno się tak dobierać, aby sformułowana funkcja kryterialna osiągnęła minimum. Reguła decyzyjna, dla której funkcja kryterialna osiąga minimum, nazywa się regułą optymalną.

Definicja reguły decyzyjnej odgrywa ważną rolę w procesie klasyfikacji. Wyznacza ona przynależność do klasy (zależność (74)). Wektor X należy do klasy ϖ_1 jeżeli spełnia kryteria dla klasy ϖ_1 , w przeciwnym przypadku należy do klasy ϖ_2 . Reguła decyzyjna klasyfikatora określona jest przez użycie funkcji dyskryminacyjnej. Liniowa funkcja dyskryminacyjna jest zdefiniowana jako:

$$X \in \begin{cases} \varpi_1 & \text{gdy } g(X) = V^T \cdot X > s \\ \varpi_2 & \text{gdy } g(X) = V^T \cdot X \leq s \end{cases} \quad (74)$$

Przypisanie X do klasy ϖ_1 ma miejsce wtedy, gdy $g(X)$ jest większe niż próg s . W innym przypadku X przypisany zostaje do klasy ϖ_2 . Przyporządkowanie X do zmiennej $g = g(X)$ i podzielenie g przez próg s powoduje, że można zminimalizować zmienną g . Po wyznaczeniu minimalnej wartości g , wyznaczane jest takie V w zależności (74), że można traktować je jako optymalne.

Można wyznaczyć V za pomocą kryterium wykorzystującego informacje statystyczne o $g = g(X)$ dla klasy i . Kryterium jest definiowane jako funkcja, która jest miarą separowalności klas rozkładu zmiennej g . Jeśli kryterium jest optymalne, wtedy klasy są maksymalnie separowalne i prawdopodobieństwo błędu klasyfikacji jest minimalne.

Zadanie klasyfikacji sprowadza się więc do projektowania filtru. Zadaniem filtru jest takie przetworzenie danych wejściowych, aby dane wyjściowe filtru były separowalne. Dla

filtru formułuje się kryteria jakości klasyfikacji. Można zastosować różne kryteria optymalności dla cech:

$$\text{Kryterium I } J_{MS}(C) = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (75)$$

$$\text{Kryterium II } J_U(C) = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\mu_1 \mu_2}, \quad (76)$$

$$\text{Kryterium III } J_F(C) = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}, \quad (77)$$

gdzie: μ_i – i -ta średnia klasy, i – poszczególna klasa, σ_i – i -ta wariancja klasy [NAD93].

Kryteria (75), (76) i (77) są funkcją wektora C , który zawiera elementy parametrów filtru. Wybrane kryterium jest używane do wyznaczenia wyjścia z filtru maksymalnie separowalnego. Ideą kryterium I jest maksymalizowanie odległości między cechami przez maksymalizację współczynnika $J_{MS}(C)$ między odpowiednimi średnimi. Oznacza to, że gdy średnia klasy 1 - μ_1 jest maksymalizowana, a średnia dla klasy 2 - μ_2 minimalizowana, to współczynnik μ_1/μ_2 jest maksymalny. Kryterium II jest modyfikacją kryterium I. W kryterium I i II wariancje nie są uwzględnione, mimo, że mogą być tak duże, że nawet jeśli średnie cech są mocno oddalone, cechy zachodzą na siebie. Z tej przyczyny należy zastosować kryterium III. Dla tego kryterium, różnice między średnimi cech muszą być maksymalne, a wariancje cech minimalne. Dobra separowalność jest osiągnięta, jeśli odległość między cechami jest wysoka, a zachodzenie wariancji minimalne.

Problem wyboru cech o największej wartości dyskryminacyjnej jest zagadnieniem złożonym. Można wyróżnić dwa problemy. Pierwszy dotyczy wyboru najbardziej zależnych cech reprezentacji danych, drugi to wyróżnienie najbardziej zależnych przykładów do uczenia. Literatura wskazuje na wiele definicji zależności cech [BLU97].

Rozważmy ustawienia, w których jest n cech używanych do opisu przykładów i każda cecha i ma tą samą domenę F_i . Przykład jest punktem w przestrzeni przykładów $F_1 \times F_2 \times \dots \times F_n$. Algorytm uczenia L jest dany zbiorem danych uczących S , gdzie każdy punkt danych jest przykładem stowarzyszonym z klasyfikacją (ciągłą lub dyskretną). Chociaż algorytm uczenia przetwarza tylko przykład S , to wybierany jest on z prawdopodobieństwa rozkładu D przestrzeni przykładów do uzyskania funkcji celu C . Funkcja celu C może być deterministyczna lub stochastyczna.

DEF 1. (Zależność od celu C) Cecha x_i jest zależna od celu uczenia C , jeśli istnieje para przykładów A i B taka, że A i B różnią się tylko w ich przypisaniu do cechy x_i , a $C(A) \neq C(B)$.

DEF 2. (Silna zależność od zbioru uczącego S lub rozkładu D) Cecha x_i silnie zależy od zbioru uczącego S jeśli istnieją przykłady A i B w zbiorze S , które różnią się tylko w ich przypisaniu do cechy x_i a dają różne wyniki (albo dają różne rozkłady wyników jeśli pojawiają się w zbiorze S wielokrotnie). Podobnie cecha x_i jest silnie zależna od celu uczenia C i rozkładu D , jeśli istnieją przykłady A i B mające niezerowe prawdopodobieństwo rozkładu D , a różnią się tylko w ich przypisaniu do cechy x_i i spełniają, że $C(A) \neq C(B)$.

DEF 3. (Słaba zależność od zbioru uczącego S lub rozkładu D) Cecha x_i jest słabo zależna od zbioru S (albo celu uczenia C i rozkładu D), jeśli jest możliwe usunięcie podzbioru cech po to, by cecha x_i stała się silnie zależna.

DEF 4. (Zależność jako miara złożoności) Dla zbioru uczącego S , zbioru odpowiedzi C (celu uczenia), liczby cech zależnych (def. 1) od celu uczenia C oznaczonego $R(S, C)$, jeżeli wykorzystując zbiór uczący S uzyskamy najmniejszy błąd od celu C , to $R(S, C)$ jest najmniejszą liczbą cech zależnych.

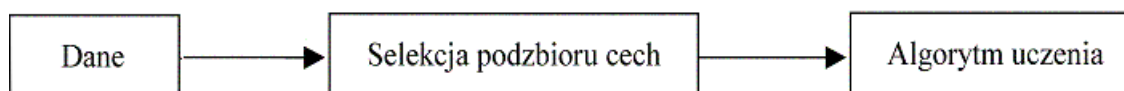
DEF 5. (Wzrastająca użyteczność) Dla zbioru uczącego S , algorytmu uczenia L i zbioru cech A , cecha x_i jest wzrastająco użyteczna dla algorytmu uczenia L ze zbiorem cech A , jeśli dokładność hipotezy, że algorytm L zastosowany z użyciem zbioru cech $\{x_i\} \cup A$ daje lepsze wyniki niż dokładność osiągnięta z użyciem zbioru cech A .

Definicja 5 jest szczególnie przydatna dla algorytmu selekcji cech, który przeszukuje przestrzeń cech przez przyrostowe dodawanie cech do ich bieżącego zbioru (lub usuwanie z bieżącego zbioru).

Wyróżnia się trzy rodzaje metod poszukiwania optymalnej liczby cech charakterystycznych: analityczne, przeglądowe (enumeratywne) i losowe. Najczęściej metodami selekcji cech są metody przeglądowe. W przypadku dużej liczby cech, gdy nie jest możliwe zastosowanie metody przeglądu zupełnego, stosuje się metody heurystyczne. W metodach tych wyróżnia się cztery etapy:

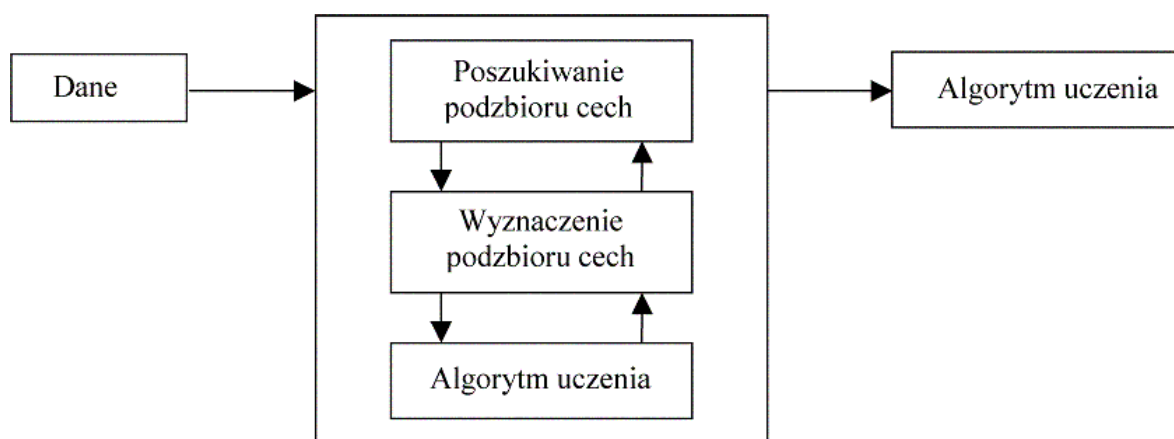
- wyznaczenie stanu początkowego w przestrzeni cech, który zdeterminuje kierunek poszukiwań i sposób generowania następnych stanów,
- organizację poszukiwań,
- strategię wyznaczenia alternatywnych podzbiorów cech,
- kryterium zatrzymania poszukiwań.

Możliwe są dwa podejścia do wyznaczenia optymalnego zbioru cech: selekcja w układzie otwartym i w układzie zamkniętym [NAL00]. Selekcja w układzie otwartym polega na wykorzystaniu kryteriów określających separowalność klas w wyselekcjonowanym podzbiorze cech. Wśród głównych kryteriów są też kryteria wykorzystujące macierze rozprożeń zredukowanych zbiorów (rys. 64).



Rys. 65. Selekcja cech w układzie otwartym

Selekcja w układzie zamkniętym polega na sprzężeniu procesu selekcji z procesem uczenia i testowania sieci neuronowej. Kryterium oceniającym poprawność wybranego podzbioru cech jest wskaźnik błędów predykcji sieci neuronowej [PAY99, PAY98, NAL00] (rys. 65).



Rys. 66. Selekcja cech w układzie zamkniętym

Tablica 15. Dobór cech z cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej

Nr cechy	Kryteria optymalności cech									Liczba cech											
	Normalizacja 1			Normalizacja 2			Normalizacja 3			44	40	29	22	16	16	14	12	8	5	4	3
	J _{MS}	J _U	J _F	J _{MS}	J _U	J _F	J _{MS}	J _U	J _F												
1	-	-	1	1	0	1	1	1	1						W	W	W				
2	-	-	1	1	0	1	1	1	1						W	W	W				
3	-	-	1	1	0	1	1	1	1						W	W	W				
4	-	-	1	1	0	1	1	1	1						W	W	W				
5	-	-	1	1	1	1	1	1	1									W	W	W	
6	-	-	1	1	0	1	1	0	1												
7	-	-	1	1	0	1	1	0	1												
8	-	-	1	1	0	1	1	0	1												
9	-	-	1	1	1	1	1	1	1									W	W	W	
10	-	-	1	1	1	1	1	1	1									W	W	W	W
11	-	-	1	1	1	1	1	1	1									W	W	W	W
12	-	-	1	1	1	1	1	1	1									W	W	W	W
13	-	-	0	1	0	0	0	0	0												
14	-	-	0	0	0	0	0	0	0												
15	-	-	0	0	0	0	0	0	0												
16	-	-	0	0	0	0	0	0	0												
17	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
18	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
19	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
20	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
21	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
22	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
23	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
24	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
25	-	-	1	1	1	1	1	0	1						W	W	W				
26	-	-	1	1	1	1	1	1	1									W	W	W	W
27	-	-	1	0	1	1	0	0	1												
28	-	-	0	0	0	0	0	0	0												
29	-	-	1	0	1	1	0	1	1												
30	-	-	1	0	1	1	0	0	1												
31	-	-	1	0	1	1	0	0	1												
32	-	-	1	0	1	1	0	0	1												
33	-	-	1	1	0	1	1	0	1												
34	-	-	1	0	1	1	0	0	1												
35	-	-	1	0	1	1	0	0	1												
36	-	-	1	0	1	1	0	0	1												
37	-	-	1	1	1	1	1	0	1						W	W	W				
38	-	-	1	1	1	1	1	0	1						W	W	W				
39	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
40	-	-	1	1	1	1	1	1	1									W	W	W	W
41	-	-	0	1	0	0	1	0	0												
42	-	-	1	1	0	1	1	0	1												
43	-	-	1	1	1	1	1	0	1						W	W	W				
44	-	-	1	1	1	1	1	1	1									W	W	W	W

Oznaczenia do tablicy 15:

0 – wartość mniejsza od zadanego progu,

1 – kryterium spełnione,

■ - wybór danej cechy,

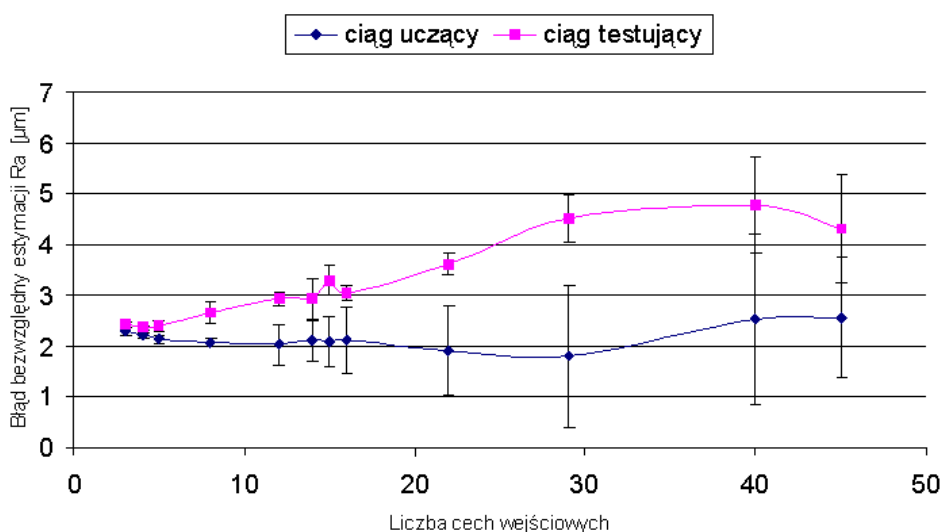
■w - wybór danej cechy wymiennie.

Przykładowo dla liczby cech – 5, osiem cech: 5, 9, 10, 11, 12, 26, 40 i 44 utworzyło 5-elementowy wektor cech np. z następujących cech [5 9 10 11 12]. Wybierano podzbiór 5 cech z 8 i estymowano siecią neuronową parametr R_a lub VB . Średnią błędu bezwzględnego estymacji z odchyleniem standardowym naniesiono na wykresach przedstawionych na rysunkach 67 i 68.

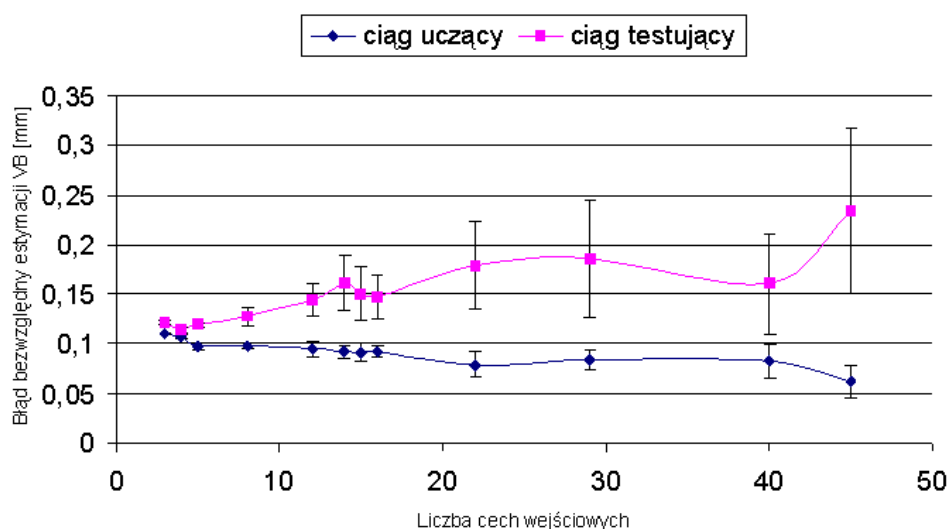
Dla znalezienia miar statystycznych opisujących zachowanie poszczególnych cech utworzono dwie klasy. Klasę pierwszą wyróżniono dla bardziej zużytego ostrza i bardziej chropowatej powierzchni, klasę drugą sformułowano dla narzędzia mniej zużytego i gładziej powierzchni obrobionej [AKS00].

Stosując selekcję w układzie otwartym przeprowadzono, dla trzech kryteriów optymalności i trzech sposobów normalizacji, ranking cech. Polega on na tym, że przy założeniu niezależności cech przeprowadza się ranking zdolności dyskryminacyjnych pojedynczych cech, a optymalny podzbiór cech wyznacza się eksperymentalnie. Najpierw w zestawie cech umieszczono wszystkie cechy, a następnie pomniejszając wektor o cechy znajdujące się na odległych pozycjach w rankingu cech, sprawdzano, czy ich ocena łączna jest lepsza [NAL00, PAY98, JOH94]. Ta selekcja pozwoliła wybrać 8 cech spełniających kryteria optymalności (tablica 15).

Następnie zastosowano, w układzie zamkniętym, definicję wzrastającej użyteczności (def. 5) w celu dalszej selekcji cech (tablica 15). Wybierano kolejno 5, 4 i 3 cechy metodą każdy z każdym. Wyniki zestawiono na rysunkach 67 i 68.



Rys. 67. Wartość błędu przewidywania parametru chropowatości w zależności od liczby cech wejściowych



Rys. 68. Wartość błędu przewidywania zużycia VB w zależności od liczby cech wejściowych

Najlepsze efekty zanotowano dla 4 cech. Najmniejszy był błąd testowania i jego odchylenie standardowe. Można zauważyć, że błąd testowania jest niewiele większy od błędu uczenia. Cechami dającymi najmniejszy błąd estymacji są: współczynnik entropii macierzy sąsiedztwa dla kierunku 0 i odległości 2, zawartość strukturalna, średnia i częstotliwość odpowiadająca posuwowi wyznaczone dla macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrabianej.

4.3.2. Zastosowanie sieci neuronowej w estymacji

Do aproksymacji dowolnego odwzorowania nieliniowego wystarczy zastosować sieć czterowarstwową (dwie warstwy ukryte) z dostatecznie dużą liczbą neuronów w każdej warstwie. Sieć taka gwarantuje istnienie układu wag sieci realizującego poprawnie dowolne odwzorowanie zbioru wzorcowych wektorów wejściowych, do odpowiadającego mu zbioru oczekiwanych wektorów wyjściowych. Ograniczeniem jest odpowiednio duża liczba elementów przetwarzających w sieci i połączeń pomiędzy nimi [TAD93, NAL00].

Sieć neuronowa realizuje postawione jej zadanie, gdy zostanie odpowiednio nauczona. Oznacza to stan, w którym wyznaczone zostały wartości wag dla wszystkich połączeń. Analityczne wyliczenie wag nie jest możliwe. Można jednak, porównując odpowiedzi sieci na zadane pobudzenia z oczekiwanymi wartościami, wyznaczyć błąd popełniany przez sieć i na tej podstawie korygować wartości wag. Czynność powtarzania korekty wag, aż do uzyskania założonego błędu nazywany jest uczeniem sieci. Podstawowym algorytmem uczenia sieci jednokierunkowych jest algorytm wstecznej propagacji błędu.

Nazwa „propagacja wsteczna” oznacza sposób obliczania błędów w poszczególnych warstwach sieci. Najpierw obliczane są błędy w warstwie ostatniej. Błąd dla neuronów

w warstwie wcześniejszej obliczany jest jako funkcja błędów neuronów warstwy poprzedniej. Metoda wstecznej propagacji błędów jest metodą wymagającą dużej liczby iteracji do osiągnięcia zbieżności, a ponadto jest wrażliwa na występowanie minimów lokalnych. Nie ma gwarancji, że w trakcie procesu uczenia odnalezione zostanie minimum globalne funkcji błędu. Metoda wstecznej propagacji błędów doczekała się więc wielu odmian i mutacji.

Dla uczenia niewielkich sieci (do kilkunastu neuronów) stosuje się między innymi metodę Lavenberg'a – Marquardt'a. Bazuje ona na wydajnej korekcji wag:

$$\Delta W = (J^T J + \nu I)^{-1} J^T e, \quad (78)$$

gdzie:

J – Jakobian funkcji błędu (macierz pochodnych cząstkowych dla wszystkich połączeń),
 ν – współczynnik korekty wag (gdy jest mały metoda przechodzi w metodę Gaussa-Newtona); zwiększany w każdej iteracji, gdy sumaryczny błąd średniokwadratowy maleje i zmniejszany gdy sumaryczny błąd średniokwadratowy SSE rośnie,
 e – wektor błędu.

Jest to szybka metoda uczenia sieci. Wymaga jednak dużej ilości pamięci ze względu na konieczność operowania na macierzy pochodnych cząstkowych funkcji błędu.

Do testowania poprawności działania sieci stosuje się zbiór testujący. Zbiór ten ma postać podobną do zbioru uczącego. Sposób oceny poprawności działania sieci zależy od charakteru rozwiązywanego zadania.

W zadaniu klasyfikacji, gdzie dane wyjściowe są typu Boolean można zastosować kryterium względem wartości 0,5. Porównuje się bieżący stan komórek w warstwie wyjściowej ze stanem oczekiwanym na wyjściu. Gdy dane wyjściowe są typu dyskretnego można zastosować kryterium względem wartości progowych. Wyjście należy do danej klasy, gdy jego wartość przynależności do klasy mieści się w pewnym zdefiniowanym przedziale, przy czym informacja wyjściowa może być na jednym z trzech poziomów: abstrakcji, rangi lub miary. Jako sprawność sieci podaje się wyrażoną w procentach liczbę poprawnie sklasyfikowanych wektorów wejściowych zbioru testującego.

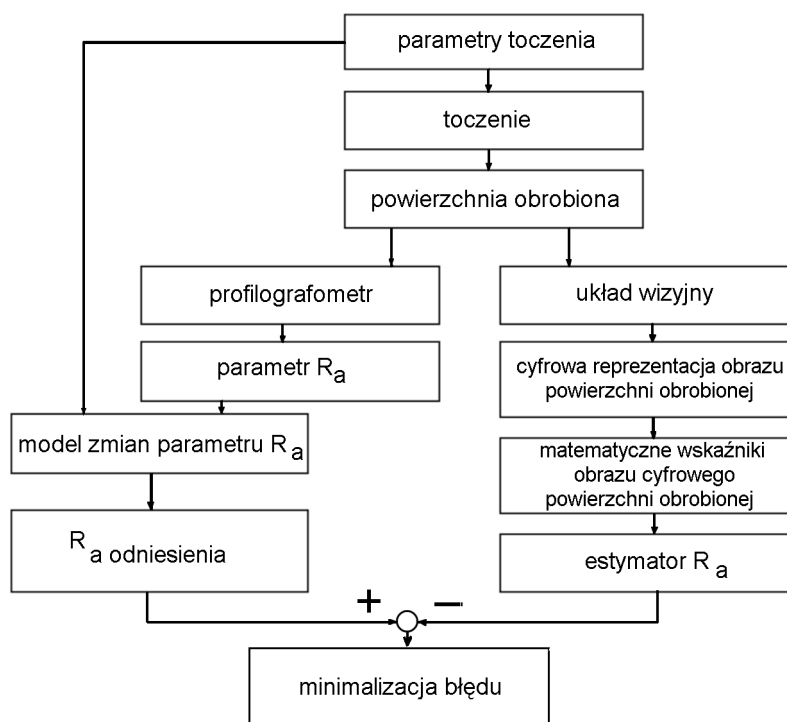
W zadaniu klasyfikacji, gdzie dane wyjściowe są typu ciągłego można zastosować kryterium porównujące bieżący stan komórek w warstwie wyjściowej ze stanem oczekiwanym na wyjściu. Klasyfikator jest w tym przypadku estymatorem funkcji, w której dane wyjściowe przetwarzane są na funkcję. Jako sprawność sieci podaje się błąd estymacji.

W pracy zastosowano podejście, w którym dane wyjściowe były typu ciągłego, a sieć neuronowa estymowała parametr $R_a = e(X)$ lub wskaźnik $VB = e(X)$.

Powstająca w toczeniu powierzchnia obrobiona była oceniana w następujący sposób. W punktach przestrzeni obserwacji dokonywano 6 niezależnych pomiarów parametru R_a . Oceniono następnie niepewność pomiaru. Opracowano model zmian parametru R_a w funkcji posuwu, prędkości i czasu skrawania oraz oceniono jego niepewność.

Dla 198 cyfrowych obrazów powierzchni obrobionej (dla każdego typu oświetlenia) pobranych w zakresie badanym wyznaczono wartość parametru R_a odniesienia wraz z jego niepewnością pomiarową (p. rozdział 4.1).

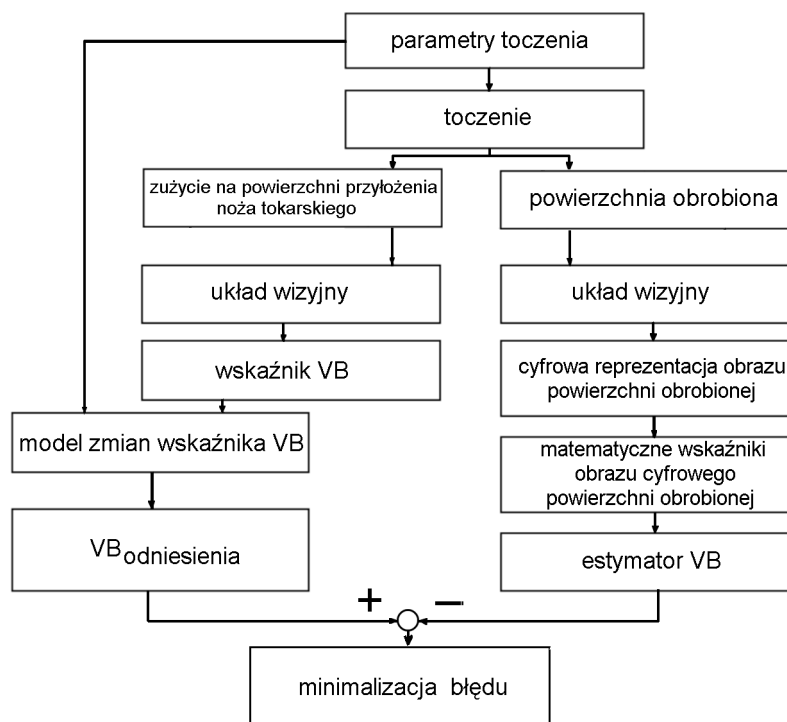
Dla każdego z obrazów wyznaczono też matematyczne wskaźniki macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej (p. rozdział 4.2.3). Ogólny schemat doboru parametrów estymatora przedstawiono na rysunku 69. Ustalanie parametrów estymatora polegało na minimalizacji błędu między wartością odniesienia (celem uczenia) a wartością wyjściową z sieci neuronowej (odpowiedzią sieci).



Rys. 69. Ustalenie parametrów estymatora R_a chropowatości powierzchni obrobionej

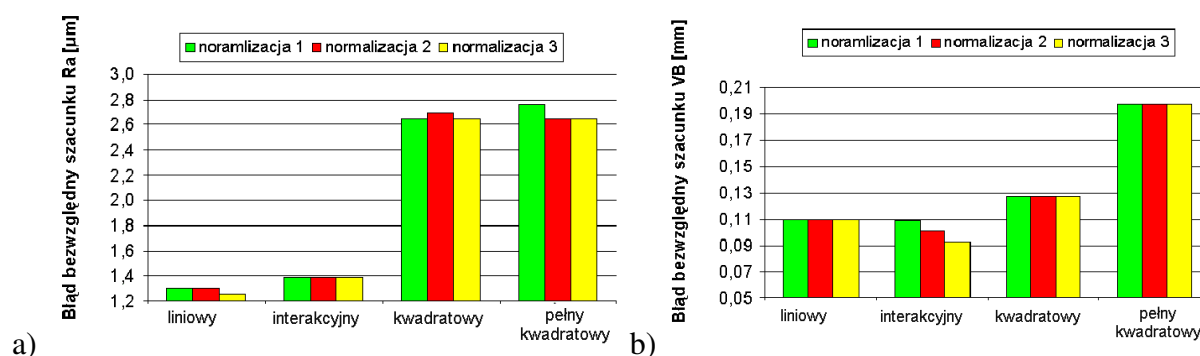
Natomiast dla estymacji wskaźnika VB zużycia ostrza zastosowano procedurę polegającą na tym, że zużywające się podczas toczenia naroże ostrza od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia było oceniane po każdorazowym zakończeniu skrawania. Układem wizyjnym rejestrowano 6 niezależnych pomiarów wskaźnika VB zużycia ostrza dla każdego z punktów przestrzeni eksperymentu. Oceniono niepewność pomiarową wskaźnika VB zużycia ostrza. Następnie przeprowadzono modelowanie zmian wskaźnika VB w funkcji posuwu, prędkości i czasu skrawania oraz oceniono niepewność modelu. Matematyczne wskaźniki macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej zestawiono wraz ze wskaźnikiem $VB_{odniesienia}$ i jego niepewnością pomiarową dla każdego typu noża (rys. 70). Pozwoliło to na ustalenie parametrów estymatora.

Badania przeprowadzono na zbiorach po 198 obrazów cyfrowych dla każdego z rodzajów pokryć i dla trzech sposobów oświetlenia powierzchni obrobionej. Wyodrębniono zbiór uczący i testujący. Dla każdego okna obrazu cyfrowego liczonych było 44 współczynników, które razem utworzyły wektor cech (tablica 14).



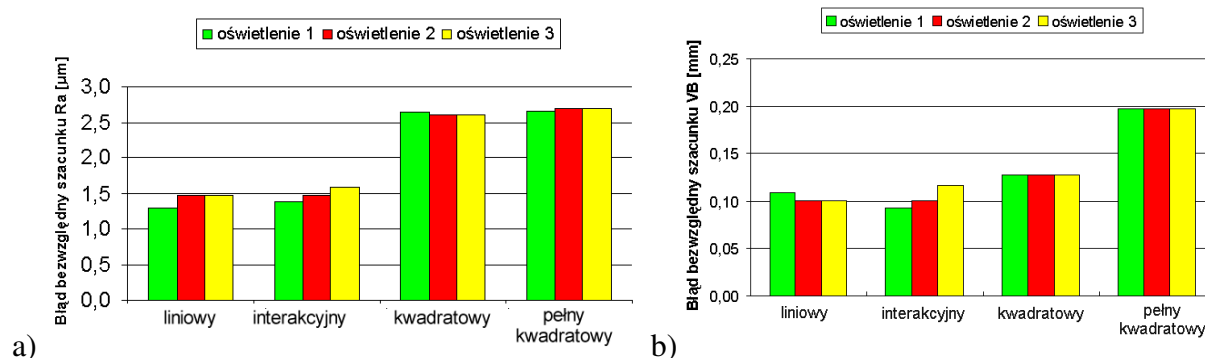
Rys. 70. Ustalenie parametrów estymatora wskaźnika VB zużycia ostrza

Każdą z cech poddano normalizacji na 3 sposoby, zgodnie z zależnościami (71), (72) i (73). Wykazano, że sposób normalizacji miał wpływ na otrzymane wyniki estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB ostrza, jednak nie był to duży wpływ. Zastosowanie normalizacji typu skalowanie liniowe, opisane zależnością (73) (rys. 71a i 71b), dawało najmniejszą niepewność estymacji zarówno R_a jak i VB .



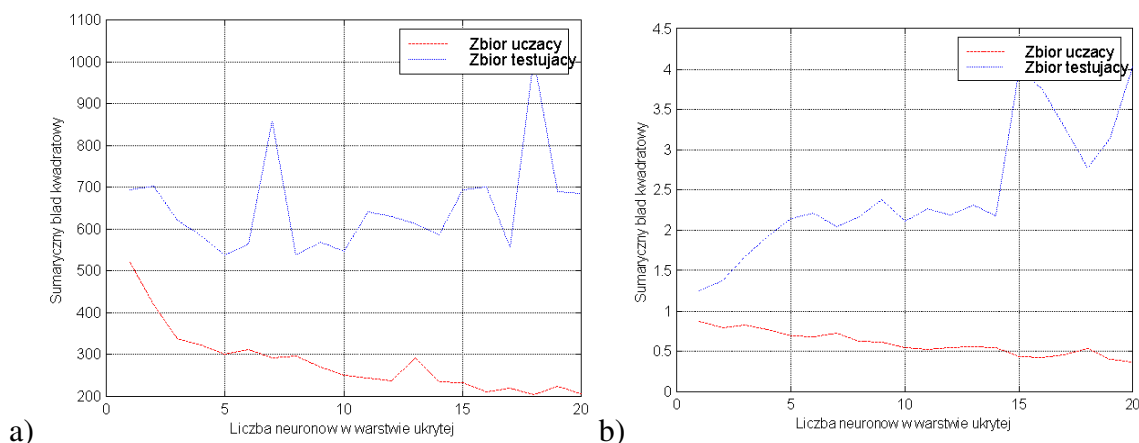
Rys. 71. Wpływ normalizacji danych na wartość błędu w wyznaczeniu parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej (a) i wskaźnika VB zużycia na powierzchni przyłożenia ostrza (b)

Dobre wyniki estymacji uzyskano dla każdego z trzech sposobów oświetlenia powierzchni obrobionej. Najmniejszą niepewność estymacji uzyskano stosując oświetlenie dwustronne (rys. 72). W warunkach oświetlenia jednostronnego trudniej uzyskuje się stałość oświetlenia. Oświetlenie dwustronne jest „sumą” oświetleń jednostronnych, pozwala więc uniknąć niekorzystnych wpływów oświetleń jednostronnych.



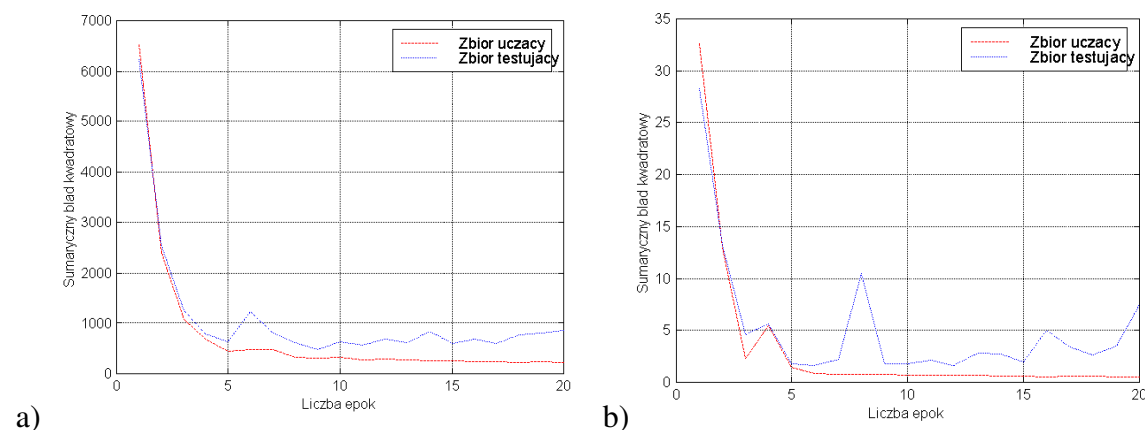
Rys. 72. Wpływ typu oświetlenia na wartość błędu w wyznaczeniu parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej (a) i wskaźnika VB ostrza (b), gdzie: oświetlenie 1 – dwustronne, oświetlenie 2 - zgodne z kierunkiem posuwu, oświetlenie 3 - przeciwne do kierunku posuwu

Dla zoptymalizowanej liczby cech przeprowadzono optymalizację doboru struktury sieci neuronowej, przy czym optymalizowano liczbę neuronów w warstwie ukrytej. Wyniki błędu estymacji, będące średnią z 50, dla różnej liczby neuronów w warstwie ukrytej zestawiono na rysunku 73. Z analizy danych zamieszczonych na wykresie wynika, że minimalną niepewność estymacji uzyskuje się dla 5 do 10 neuronów w warstwie ukrytej. Uwzględniając koszt uczenia **przyjęto 6 neuronów w warstwie ukrytej**.



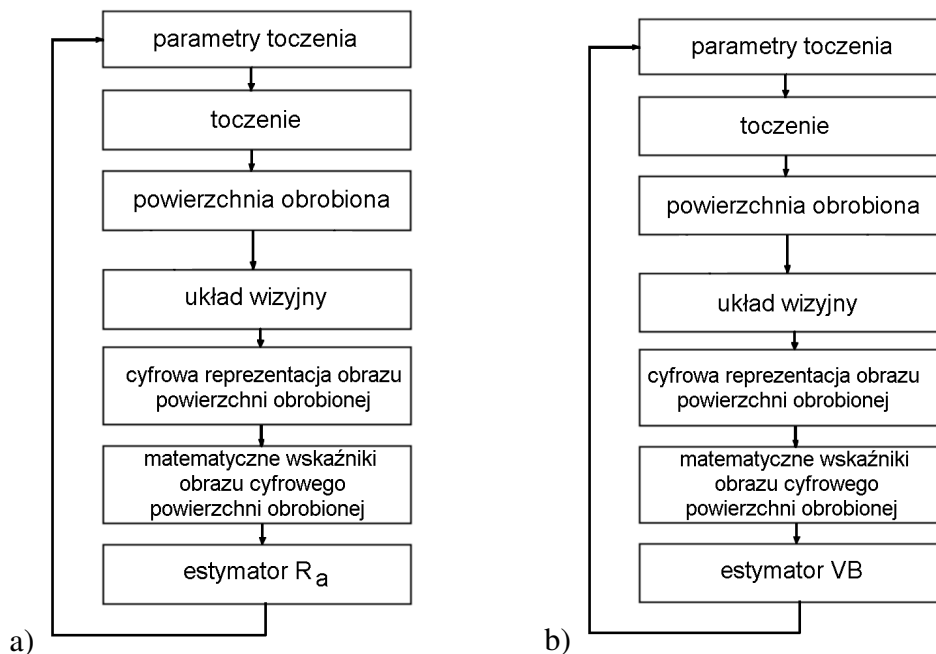
Rys. 73. Zależność sumarycznego błędu kwadratowego sieci od liczby neuronów w warstwie ukrytej dla estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej (a) i wskaźnika VB zużycia ostrza (b)

Zbadano też wpływ czasu uczenia sieci neuronowej na uzyskiwane wyniki estymacji, przy czym czas rozumiano jako liczbę epok uczenia. Dla sieci uczonej zbyt krótko lub uczonej za długo uzyskuje się większą niepewność estymacji. Wynika to z właściwości sieci neuronowej. Wyniki błędu estymacji dla różnych czasów uczenia, będące średnią z 50, zestawiono na rysunku 74. Najmniejsze błędy estymacji uzyskano, gdy zastosowano czas uczenia w zakresie od 4 do 10 epok. **Zastosowano 10 epok uczenia sieci neuronowej**.



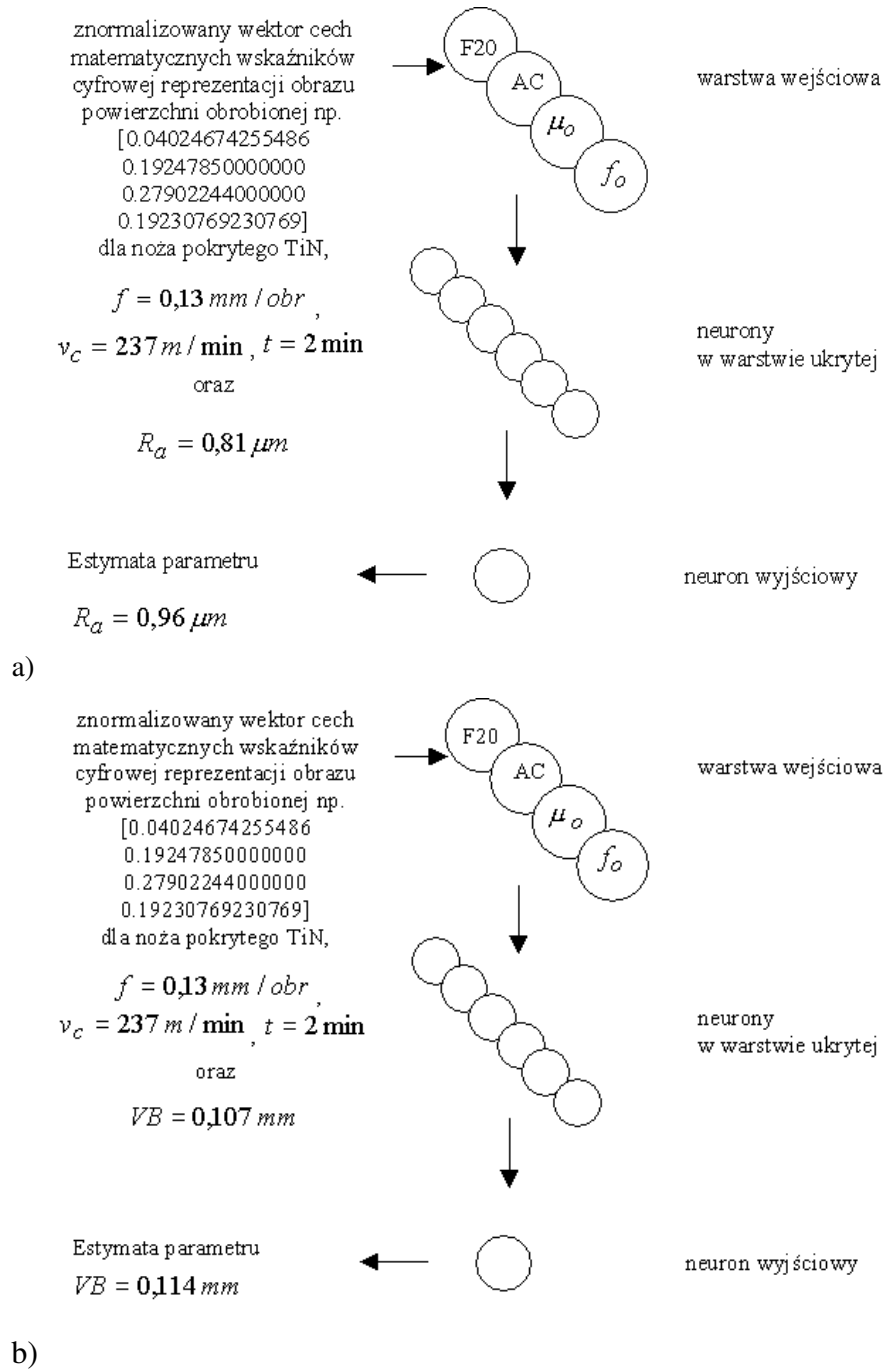
Rys. 74. Zależność sumarycznego błędu kwadratowego sieci od liczby epok dla estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej (a) i wskaźnika VB zużycia ostrza (b)

Schemat zastosowania sieci neuronowej do estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej przedstawiono na rysunku 75a, a do estymacji wskaźnika VB zużycia ostrza na rysunku 75b. Obraz powierzchni obrobionej poddawany był analizie i obliczane były parametry: entropia macierzy sąsiedztwa dla kierunku 0 i odległości 2, zawartość strukturalna macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej i obraz powierzchni odniesienia, wartość średnia macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej. Dodatkowo w wektorze wejściowym sieci neuronowej dodawana była jako czwarta cecha, częstotliwość odpowiadająca posuwowi obliczona z funkcji widmowej gęstości mocy macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej. Wektor wejściowy poddawany był normalizacji. Tak przygotowany wektor wejściowy był prezentowany na wejściu sieci neuronowej (rys. 76).



Rys. 75. Schemat zastosowania estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej (a) i wskaźnika VB zużycia ostrza (b), z obrazu cyfrowego powierzchni obrobionej, do nadzorowania toczenia

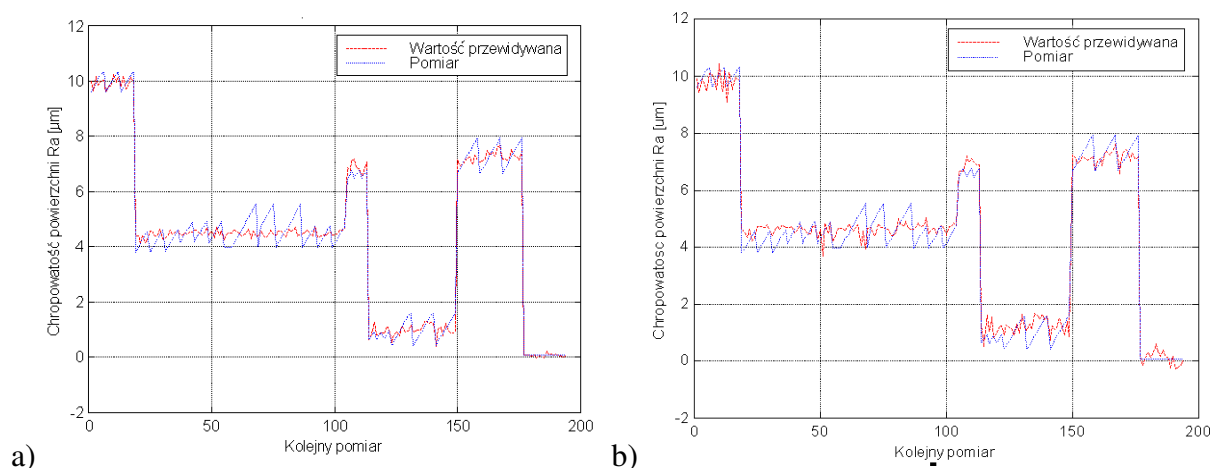
Przyjęto sieć neuronową jednokierunkową z metodą uczenia Lavenberg'a – Marquardt'a. Sieć posiadała trzy warstwy: wejściową, ukrytą i wyjściową. Warstwa wejściowa obejmowała 4 neurony, do których wysyłane były dane z cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej: $[F20, AC, \mu_o, f_o]$ (rys. 76). Warstwa ukryta zawierała 6 neuronów przetwarzających sygnały wejściowe. Warstwa wyjściowa zawierała 1 neuron wyznaczający estymatę wartości parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej (rys. 76a) lub estymatę wartości wskaźnika VB zużycia ostrza (rys. 76b).



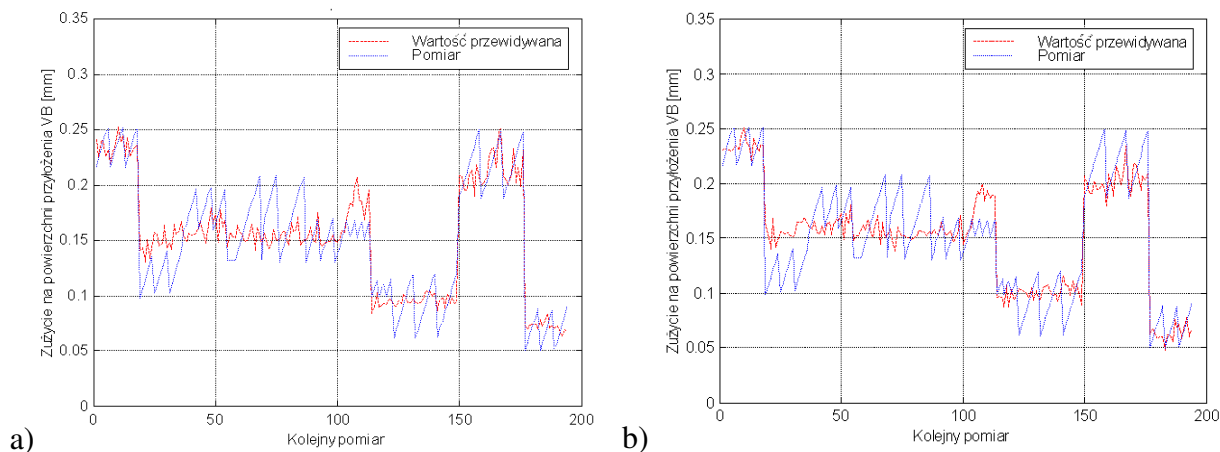
Rys. 76. Przykładowy schemat estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej (a) i wskaźnika VB zużycia ostrza (b)

Przygotowano zestaw obrazów, z których utworzono ciąg uczący i testujący. Wyniki estymacji parametru R_a dla pokrycia noża warstwą TiN i modelu liniowego zamieszczono na rysunku 77. Można zaobserwować, że estymacja parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej przez sztuczną sieć neuronową jest w ścisłym związku z pomiarami. Uczenie sieci neuronowej przerywano po 10 epokach uczenia, czyli po 1980 modyfikacjach wag. Dla ciągu uczącego końcowy wynik uczenia przedstawiono na rysunku 77a, a dla ciągu testującego wyniki estymacji zaprezentowano na rysunku 77b. Dla niepewności estymacji parametru R_a przez sieć neuronową równej $4,6 \times 10^{-4}$ mm i niepewności $R_{a\text{odniesienia}}$ wartości odniesienia wynoszącej $6,7 \times 10^{-4}$ mm, sumaryczna niepewność oszacowania parametru R_a wyniosła $8,2 \times 10^{-4}$ mm.

Dla noży pokrytych TiN i modelu liniowego, wyniki estymacji wskaźnika VB zużycia ostrza zamieszczono na rysunku 78. Wyniki estymacji dla ciągu uczącego przedstawiono na rysunku 78a, dla ciągu testującego na rysunku 78b. Dla niepewności estymacji VB przez sieć neuronową wynoszącej 0,027 mm i niepewności $VB_{\text{odniesienia}}$ równej 0,032 mm, sumaryczna niepewność oszacowania VB tylko z cyfrowego obrazu powierzchni obrabianej wyniosła 0,042 mm.

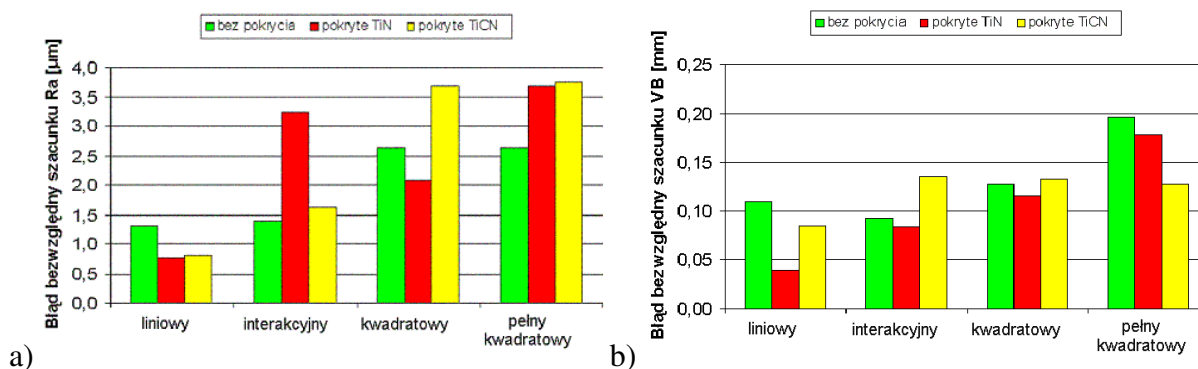


Rys. 77. Zestawienie wartości parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej pomiarowej (modelowej) i odpowiedzi z sieci neuronowej dla ciągu uczącego (a) i ciągu testującego (b), dla noża pokrytego TiN i liniowego modelu zmian parametru R_a



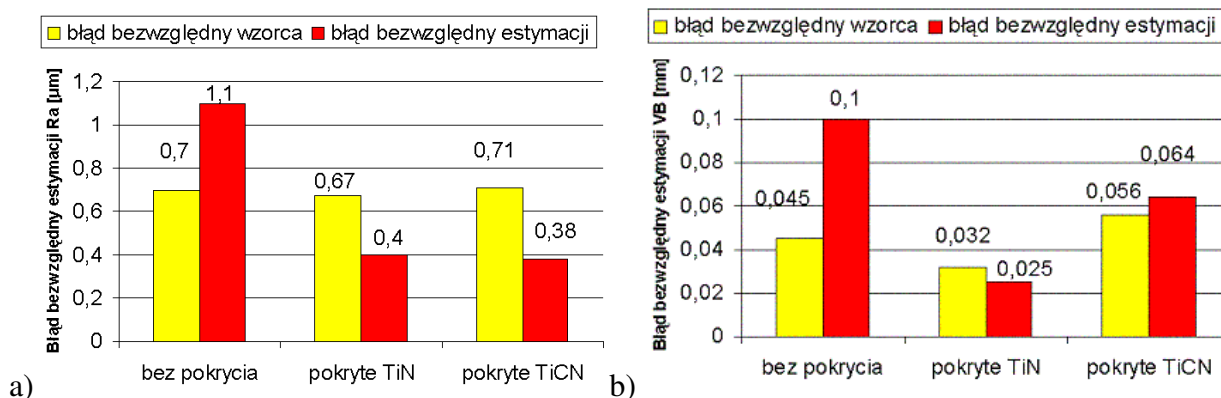
Rys. 78. Zestawienie wartości zużycia na powierzchni przyłożenia VB pomiarowej (modelowej) i odpowiedzi z sieci neuronowej dla zbioru uczącego (a) i testującego (b) dla pokrycia noży TiN i liniowego modelu zmian VB

Przeprowadzono analizę wpływu rodzaju modelu wzorca na błąd oszacowania wartości parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej (rys.79a) i błąd oszacowania wartości wskaźnika VB zużycia ostrza (rys. 79b). Najmniejszy błąd estymacji, dla każdego typu noża, uzyskano dla modelu liniowego wartości odniesienia, zarówno w przypadku parametru R_a jak i wskaźnika VB . Prostota modelu liniowego skłania ku zastosowaniu tego typu modelu do wzorcowania parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej i wskaźnika VB zużycia ostrza.



Rys. 79. Wpływ rodzaju modelu wzorca na wartość błędu parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianej (a) i wskaźnika VB zużycia ostrza (b) dla oświetlenia dwustronnego i skalowaniu liniowym danych

W modelu liniowym błąd bezwzględny wzorca dla każdego typu noża był porównywalny (rys. 80). Dla noży bez pokrycia błąd bezwzględny estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia ostrza był zdecydowanie większy od błędu bezwzględnego wzorca.



Rys. 80. a) Zestawienie błędu bezwzględnego wzorca i estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej dla modelu liniowego R_a odniesienia, b) zestawienie błędu bezwzględnego wzorca i estymacji wskaźnika VB zużycia ostrza dla modelu liniowego VB odniesienia

Oszacowanie granicznego błędu estymacji parametru R_a pozwoliło ustalić jego wartość na poziomie takim, że estymator neuronowy, bazujący na danych z cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej, może być wykorzystany w aktywnej kontroli chropowatości powierzchni.

Oszacowanie bezwzględnego błędu granicznego estymacji wskaźnika VB upoważnia do stwierdzenia, że cyfrowy obraz powierzchni obrobionej zawiera dostateczną informację o stanie ostrza, by mógł być zastosowany w monitorowaniu.

Czas estymacji parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia ostrza, przy użyciu zaproponowanego w pracy algorytmu, jest trudny do oszacowania. Zastosowano więc miarę określającą obciążenie procesora jest liczba operacji zmiennoprzecinkowych, jakie muszą być wykonane w trakcie obliczeń. Dane zestawiono w tabelicy 16. Uzyskano je w środowisku Matlab 5.2. Przykładowo liczba wykonywanych operacji zmiennoprzecinkowych wykonywanych w ciągu sekundy dla komputera z procesorem Pentium P5, zegarem 120 MHz, z systemem operacyjnym Windows 95 wynosi 53 555 900[FLOPS]³, co oznacza, że obliczenia na tym komputerze trwałyby około 1s.

³ http://performance.netlib.org/performance/html/flops_4.data.col0.html

Tablica 16. Szacowanie obciążenia procesora w trakcie procesu estymacji parametru R_a i wskaźnika VB zużycia ostrza

Lp.	Operacje	Liczba obliczeń zmiennoprzecinkowych [FLOP]
1.	Obliczenie $F20$	88 075
2.	Obliczenie AC	17 025
3.	Obliczenie μ_o	4 227
4.	Obliczenie f_o	52 679 121
5.	Normalizacja	12
6.	Estymacja	1 096
	Suma	52 789 556

4.4. Wnioski z badań eksperymentalnych

Sformułowano następujące wnioski z badań doświadczalnych, dotyczące przeprowadzonego eksperymentu (p. rozdział 4.1):

1. Podczas skrawania zauważono, że pokrycie narzędzia warstwami TiN i TiCN korzystnie wpływało na pracę ostrza. Zastosowane w pracy płytki z węgla spiekanego powlekanie pokryciami przeciwzużyciowymi wykazały lepsze właściwości od płytek bez pokrycia. Przełomy warstw potwierdziły dobrą adhezję warstw do podłoża. W przeprowadzonych badaniach płytki wieloostrowe pokryte warstwami nie ulegały wyszczerbieniu i wykruszeniu.
2. Przeprowadzone testowanie hipotezy o równości średnich w zbiorach potwierdziły mniejsze zużywanie się narzędzi pokrytych warstwą TiN. Natomiast warstwy TiCN nie zawsze spełniały swoją rolę, złuszczać się i pękać. Zużycie płytek pokrytych TiCN było porównywalne do zużycia dla noży bez pokrycia.
3. Przeprowadzone testowanie hipotezy o równości średnich w zbiorach, potwierdziły niezależność wartości parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej od typu pokrycia ostrza, które ją ukonstytuowało.
4. Badanie zależności z wykorzystaniem współczynnika korelacji potwierdziło silną zależność wskaźnika VB zużycia na powierzchni przyłożenia ostrza i parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej od posuwu, prędkości i czasu skrawania.
5. Do wyznaczenia modelu zmian wskaźnika VB zużycia naroża ostrza skrawającego i parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej zastosowano metodę regresji. Badanie testu F potwierdziło istotność każdego z 24 modeli regresji. Analiza reszt modelu

pozwoiliła ujawnić wpływ błędu pomiaru poszczególnych wartości, które posłużyły do stworzenia modelu na końcową wartość błędu modelowej wartości VB i R_a .

Przeprowadzona w rozdziale 4.2 analiza cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Stwierdzono wpływ typu oświetlenia na pozyskiwany cyfrowy obraz powierzchni obrobionej. Wymusiło to konieczność skonstruowania i zastosowania w badaniach układu zapewniającego stałość i powtarzalność ustawień oświetlenia.
2. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej, który można uznać za jednolitą teksturę, umożliwia analizowanie cech powierzchni za pomocą matematycznych wskaźników obrazu. W pracy zaproponowano 44 wskaźniki obrazu cyfrowego o różnej mocy dyskryminacyjnej.
3. Przebadane matematyczne wskaźniki obrazu cyfrowego są wrażliwe na wielkość obszaru pobierania danych. Większość z nich stabilizowała się dla okna wielkości 64 x 64 piksele. Taki rozmiar okna przyjęto do badań.

Wnioski z wykonanej w rozdziale 4.3 estymacji parametru R_a chropowości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia ostrza sformułowane są następująco:

1. Normalizacja miała istotny wpływ na wyniki estymacji. Sposób normalizacji był mniej istotny. Najlepsze wyniki uzyskano dla skalowania liniowego danych w zakresie [0,1].
2. Brak metody matematycznej selekcji cech spowodował, że zastosowano ich optymalizację metodą heurystyczną. Optymalizacja pozwoliła zmniejszyć do 8 liczbę cech, którą z kolei ograniczono do 4 kierując się wzajemnymi ich zależnościami i sprawdzając każdą z nich oddzielnie.
3. Najlepsze efekty, zarówno dla R_a jak i VB , uzyskano dla sieci neuronowej jednokierunkowej trójwarstwowej z sześćcioelementową warstwą ukrytą, z zastosowaniem 4 cech obrazu w oknie 64 x 64 piksele, przy czym wartość odniesienia wyznaczono korzystając z modeli liniowych zmian.
4. Wartości niepewności estymacji parametru R_a chropowości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia na powierzchni przyłożenia pozwoliły potwierdzić założenie o możliwości zastosowania sieci neuronowych w monitorowaniu.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy sprawdzono możliwość estymacji zużycia powierzchni przyłożenia naroża ostrza i zmiany w stereometrii powierzchni obrobionej na podstawie danych uzyskanych z komputerowej analizy tekstury cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej.

Opracowano metodę oceny parametru R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnika VB zużycia i wykazano jej przydatność w monitorowaniu. W trakcie prac zestawiono dwa układy pomiarowe: do pomiaru wskaźnika VB zużycia ostrza oraz do akwizycji cyfrowych obrazów powierzchni obrobionej.

Zaplanowano i przeprowadzono doświadczenie dla uzyskania danych o zmianie parametru R_a i wskaźnika VB . Parametr R_a chropowatości powierzchni obrobionej określono przy użyciu profilografometru, natomiast wskaźnik VB zużycia ostrza wyznaczono metodą optyczną za pomocą specjalnego układu pomiarowego. Dane pomiarowe R_a i VB przeanalizowano i stworzono po 12 modeli dla R_a i VB , w funkcji posuwu, prędkości i czasu skrawania, które pozwoliły wyznaczyć wartości odniesienia $R_{a\text{odniesienia}}$ i $VB_{\text{odniesienia}}$ dla wszystkich pozyskanych w eksperymencie obrazów.

Zaproponowano 44 wskaźniki obrazu cyfrowego powierzchni obrobionej, które utworzyły wektor cech. Spośród nich wybrano 4 cechy, które wykazywały największą wartość dyskryminacyjną, do estymacji R_a i VB . Wektor cech obejmował następujące matematyczne wskaźniki cyfrowego obrazu: entropię macierzy sąsiedztwa dla kierunku współwystępowania 0 (kierunek prostopadły do śladów obróbki) i odległości współwystępowania 2, zawartość strukturalną obrazu powierzchni obrobionej, policzoną względem obrazu powierzchni odniesienia, średnią jasność obrazu i częstotliwość, odpowiadającą posuwowi, obliczaną z widmowej gęstości mocy macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej.

Do estymacji parametru R_a i wskaźnika VB zastosowano sieci neuronowe jednokierunkowe trójwarstwowe. Sieć ta była uczona metodą Lavenberg'a – Marquardt'a. Sprawdzone błąd uczenia w zależności od liczby neuronów w warstwie ukrytej i wyznaczono optymalną ich liczbę. Zoptymalizowano czas uczenia sieci neuronowej. Wykazano, że zbyt krótki lub za długi czas uczenia zwiększa błąd estymacji.

Testowanie sieci neuronowej estymującej wartości parametru R_a i wskaźnika VB zużycia ostrza z cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej pozwoliło oszacować błąd estymacji. Graniczny błąd estymacji parametru R_a wynosił ok. $1\mu m$, natomiast wskaźnika VB od 0,03 do 0,1 mm.

Unikalny wkład pracy do nauki polega na zastosowaniu metod przetwarzania obrazów (w tym analizy tekstur), dla obrazu powierzchni obrobionej oświetlonej światłem odbitym, w monitorowaniu zużycia ostrza i aktywnej kontroli chropowatości powierzchni obrobionej.

Wyniki estymacji upoważniają do wyciągnięcia wniosku, że cyfrowy obraz powierzchni obrobionej zawiera dostateczną informację o chropowatości powierzchni obrobionej i zużyciu ostrza ją tworzącego, by można było zastosować ją w monitorowaniu. Rozwiązano zatem problem wykorzystania cyfrowego obrazu powierzchni obrobionej do monitorowania przebiegu wytwarzania powierzchni przez toczenie. Praca została tym samym wykonana zgodnie z założeniami.

5.1. Wnioski o charakterze poznawczym

1. Stan zużycia ostrza i chropowatość powierzchni podczas obróbki można ocenić za pomocą danych z cyfrowej reprezentacji obrazu powierzchni obrobionej za pomocą wyselekcjonowanych cech, które są skorelowane z przebiegiem zużycia ostrza i jakością powstającej powierzchni obrobionej. Pozwalają oszacować parametr R_a chropowatości powierzchni obrobionej i wskaźnik VB zużycia ostrza.
2. Dowiedziono, że badane wskaźniki macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej, szczególnie entropia macierzy sąsiedztwa dla kierunku współwystępowania 0 (kierunek prostopadły do śladów obróbki) i odległości współwystępowania 2, zawartość strukturalna, średnia i częstotliwość, odpowiadająca posuwowi, obliczana z widmowej gęstości mocy, są źródłem informacji o jakości powierzchni obrobionej i stanie zużycia ostrza.

5.2. Wnioski uytylitarne

1. Opracowanie, komputerowo wspomaganego, układu analizy obrazu cyfrowego powierzchni obrobionej stwarza podstawę do jego powszechnego wykorzystania w budowie układów monitorowania skrawania.
2. Zastosowanie doboru cech pozwoliło na ograniczenie ich liczby. Najlepsze wyniki uzyskano dla małej liczby cech o zróżnicowanym charakterze (norma bliskości obrazów, statystyka I rzędu i współczynniki jedno i dwuwymiarowej statystyki II rzędu).
3. Optymalizacja struktury sieci neuronowej i czasu jej uczenia pozwoliła wyznaczyć niepewność estymacji dla ciągu uczącego i testującego na poziomie zbliżonym do niepewności wartości odniesienia.
4. Wykazano, że czas estymacji zużycia ostrza i chropowatości powierzchni obrobionej z macierzy danych reprezentujących obraz powierzchni obrobionej, dla obecnie używanego sprzętu komputerowego klasy PC, nie przekroczyłby 1s.

5.3. Kierunki dalszych badań

Po zakończeniu badań uznano, że ważne kierunki badań powinny być skoncentrowane na:

1. liczbie obserwowanych parametrów obróbki, o które należy poszerzyć zakres badań, a które przyjęte były jako stałe, np. materiał skrawany, materiał narzędziowy, ciecz obróbkowa,
2. rozwinięciu metodyki o zjawiska związane z katastroficznym stępieniem ostrza,
3. zbadaniu przydatności logiki rozmytej do oceny stanu naroża ostrza i algorytmów genetycznych w optymalizacji doboru cech,
4. opracowaniu koncepcji włączenia systemu monitorowania w strukturę obrabiarki, z możliwością wykorzystania cech obrazu powierzchni obrobionej jako symptomów diagnostycznych do nadzorowania jakości powierzchni obrobionej i stanu zużycia ostrza.

Literatura

- [AHN96] Ahn C.W., Baumgardner M.F. Biehl L.L., Fractal Analysis of Hyperspectral Imagery for Crop Residue Cover Estimation, <http://mollisol.agry.purdue.edu/~cahn/fracdoc.html>
- [AKS00] Aksoy S., Haralick R.M., Texture Analysis in Machine Vision, Chapter Using Texture in Image Similarity and Retrieval. Series on Machine Perception and Artificial Intelligence, World Scientific, 2000
- [AKS01] Aksoy S., Haralick R.M., Feature Normalisation and Likelihood-based Similarity Measures for Image Retrieval, To Appear in Pattern Recognition Letters, Special Issue on Image and Video Retrieval, 2001
- [AKS98] Aksoy S., Haralick R.M., Textural Features For Image Database Retrieval. Proceedings of IEEE Workshop on Content-Based Access of Image and Vision Libraries, in CVPR'98. Santa Barbara, 1998
- [AST99] Astakhov V.P., Metal Cutting Mechanics, CRC Press LLC, 1999
- [BEC63] Beckmann P., Spizzichino A., The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, A Pergamon Press Book, The Macmillan Company, New York, 1963
- [BER98] Bernat P., Badanie procesu toczenia dla potrzeb diagnozowania z zastosowaniem wieloczuJNIKOWEGO UKŁADU pomiarowego, Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, 1998
- [BIA00] Białko M., Podstawowe właściwości sieci neuronowych i hybrydowych systemów ekspertowych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2000
- [BIE56] Biernawski W., Teoria obróbki metali skrawaniem, PWN, Warszawa, 1956
- [BLU97] Blum Avrim L., Langley P., Selection of Relevant Features and Examples in Machine Learning, Artificial Intelligence 1997
- [BOR97] Boryczko A., Symulowanie nierówności powierzchni toczonych, modulowanych oddziaływaniami układu posuwu narzędzia w celu ich rozpoznania, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń Vol. 21 Nr 4, 1997
- [BOS99] Bosch E.H., Texture Information and Supervised Classification of Hyperspectral Imagery by Means Of Neural Networks, 1999 http://www.geovista.psu.edu/geocomp/geocomp99/gc99/019/gc_019.htm
- [BRA98] Brandt S., Analiza danych. Metody statystyczne i obliczeniowe, PWN, Warszawa, 1998
- [BRA99] Bradley C., Jeswiet J., An Optical Surface Texture Sensor Suitable for Integration into a Coordinate Measuring Machine, Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999
- [BRZ98] Brzózka J., Dorobczyński L., Programowanie w Matlab, Wydawnictwo Nakom, Poznań, 1998
- [BUR95] Burakowski T., Wierzchoń T., Inżynieria powierzchni metali, WNT, Warszawa, 1995
- [CHI00] De Chiffre L., Lonardo P., Trumpold H., Lucca D.A., Goch G., Brown C.A., Raja J., Hansen H.N., Quantitative Characterisation of Surface Texture, Annals of the CIRP Vol. 49/2/2000

- [CHI99] De Chiffre L., Hansen H.N., Kofod N., Surface Topography Characterisation Using on Atomic Force Microscope Mounted on a Coordinate Measuring Machine, *Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999*
- [CHU79] Church E.L., The Measurement of Surface Texture and Topography by Differential Light Scattering, *Wear 57*, 93-105, 1979
- [CIC97] Cichosz P., Kuzirowski M., Miernik M., Diagnozowanie stanu zużycia ostrza za pomocą sieci neuronowej, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, 1997
- [COH92] Cohen F.S., Fan Z., Maximum Likelihood Unsupervised Textured Image Segmentation. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 54, 1992.
- [DAR97] Darlewski J., Postępy w modelowaniu procesu skrawania, *Mechanik*, nr 8-9, 1997
- [DAV96] Davies M.A., Chou Y., Evans C.J., On Chip Morphology, Tool Wear and Cutting Mechanics in Finish Hard Turning, *Annals of the CIRP Vol. 45/1/1996*
- [DMO84] Dmochowski J., Uzarowicz A., *Obróbka skrawaniem i obrabiarki*, Warszawa, 1984
- [DOB98] Dobrzański L.A., *Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach*, WNT, Warszawa, 1998
- [DON94] Dong W.P, Sullivan P.J., Stout K.J., Comprehensive Study of Parameters for Characterising Threedimensional Surface Topography, Vol. III, IV ,*Wear 178*, 1994
- [DUC99] Duc E., Lartigue C., Tournier C., Bourdet P., A New Concept for the Design and the Manufacturing of Free-Form Surfaces: The Machining Surfaces, *Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999*
- [DWO91] Dworak P.A., *Metodyka doboru torów pomiarowych sił skrawania do monitorowania procesu toczenia*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1991
- [ERR96] D'Errico G.E., Chiara R., Guglielmi E., PVD coatings Of Cermet Inserts For Milling Applications, *Surface And Coatings Technology 86-87*, 1996
- [EWA99] Ewans C.J., Bryan J.B., "Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces, *Annals of the CIRP Vol. 48/2/1999*
- [FAN96] Fang X.D., Jawahir I.S., An Analytical Model for Cyclic Chip Formation In 2-D Machining with Chip Breaking, *Annals of the CIRP Vol. 45/1/1996*
- [FAN98] Fang F.Z., Venkatesh V.C., Diamond Cutting of Silicon with Nanometric Finish, *Annals Of The CIRP Vol.47/1*, 1998
- [FAT93] Fathailal, M., Danai, K., and Barber, G., Effect of Flank Wear on the Topography of Machined Surfaces, *Tribology Transactions, Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol. 36, No. 3, 1993
- [FEL91] Feld M., Konczakowski A., Zastosowanie analizy widmowej do badań struktury geometrycznej powierzchni, *Mechanik nr 2*, 1991
- [FIL00] Filipowski R., Marciniak M., *Techniki obróbki mechanicznej i erozyjnej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000
- [FIS99] Fisher A., Manor A., Utilising Image Processing Techniques for 3D Reconstruction of Laser- Scanned Data, *Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999*
- [GAW00] Gawlik J., Zapewnienie jakości w procesach obróbki skrawaniem, *Zarządzania jakością, Tom II, Jakość w procesach wytwarzania pod red. A. Tabora, A. Zająca, M. Rączki*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2000

- [GAW88] Gawlik J., Prognozowanie stanu zużycia ostrzy narzędzi w procesie skrawania, Monografia 66., Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1988
- [GAW97] Gawlik J., Karbowski K., Prognozowanie stanu ostrza skrawającego z zastosowaniem sieci neuronowych, Mechanik nr 4, 1997
- [GAW98] Gawlik J., Karbowski K., Matematyczne modelowanie procesu zużycia narzędzi skrawających. Nadzorowanie stanu narzędzi, Monografia 231, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1998
- [GIM99] Gimel'farb G., Image Textures And Gibbs Random Fields. Kluwer Academic Publishers, 1999
- [GOC99] Goch G, Peters J., Lehmann P., Liu H., Requirements for the Application of Speckle Correlation Techniques to on-line Inspection of Surface Roughness, Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999
- [GOR80] Górski E., Obróbka gładkościowa, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, 1980
- [GOR83] Górecka R., Polański Zb., Metrologia warstwy wierzchniej, WNT, Warszawa, 1983
- [GOR98] Górecka R., Teoria i technika eksperymentu, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1998
- [GRZ98] Grzesik W., Podstawy skrawania materiałów metalowych, WNT, Warszawa, 1998
- [HAB89] Habig K.H., Wear behaviour of surface coatings on steels, Tribology International, April 89, Vol.22, No 2 (1989) 65
- [HAB93] Habig K.H., Meierzu Kocker G., Possibilities Of Model Wear Testing For The Preselection Of Hard Coatings For Cutting Tools, Surface And Coatings Technology 62, 1993
- [HAR73] Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 3(6), 1973
- [HAR79] Haralick R.M. Statistical and Structural Approaches to Texture, Proceedings of the IEEE, 67(5), 1979
- [HAR86] Haralick R.M., Statistical Image Texture Analysis, In Handbook of Pattern Recognition and Image Processing, Vol. 86, Academic Press, 1986.
- [IVE94] Iversen H., Lonnestad T., An Evaluation of Stochastic Models for Analysis and Synthesis of Gray-Scale Texture, Pattern Recognition Letters, 15, 1994
- [JEM97] Jemielniak K., Tendencje rozwojowe w diagnostyce stanu narzędzia i procesie skrawania, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1997
- [JEM98] Jemielniak K., Przemysłowe układy diagnostyki stanu narzędzia i procesie skrawania, Mechanik, nr 11, 1998
- [JOH94] John G., Kohavi R., Pfleger K., Irrelevant Features and The Subset Selection Problem, <ftp://starry.stanford.edu/pub/gjohn/papers/relevance.abs>, In the Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Learning (ML94) 1994
- [JON97] Johnsen W.A., Advances in The Design of Pavement Surfaces, Rozprawa doktorska - Worcester Polytechnic Institute, 1997, <http://www.wpi.edu/~tral/Johnsen>
- [KAC70] Kaczmarek J., Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej, WNT, Warszawa, 1970

- [KAC86] Kaczmarek J., Klimczak T., Dwu i trójwymiarowa charakterystyka nierówności powierzchni, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, Z. 1 (65) 1986
- [KAC94] Kacalak W., Zastosowanie sieci neuronowych w budowie i eksploatacji maszyn, *Mechanik* nr 2, 1994
- [KAC95] Kaczmarek J., Klimczak T., Porównanie dwuwymiarowej oceny chropowatości powierzchni z oceną trójwymiarową, V Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna - Forum Prac Badawczych „Metrologia w procesach wytwarzania”. Kraków, 1995
- [KAC97] Kacalak W., Autokorelacja składników losowych i jej wpływ na estymację modeli procesów szlifowania, XX Jubileuszowa Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Poznań – Błażejewko, 1997
- [KAC99] Kaczmarek J., Kulawik E., New Approach to the Characteristics of Surface Microstereometry on the Basis of Facing, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, Vol 23, Nr 4, 1999
- [KAR00] Karpiński T., Łukianowicz Cz., Łukianowicz T., Skomputeryzowane stanowisko do pomiaru i analizy profilu powierzchni, *Pomiary Automatyka Kontrola* 5, 2000
- [KAR99-1] Karkanis S.A., Magoulas G.D., Grigoriadou M., Schurr M., Detecting Abnormalities in Colonoscopic Images by Textural Description and Neural Networks, *Advanced Course On Artificial Intelligence*, Greece, 1999
- [KAR99-2] Karlson L., Arc Evaporated Titanium Nitride coatings, *Linköping Studies in Science and Technology*, Dissertation No. 565, Linköping, 1999
- [KAW98] Kawalec M., Jankowiak M., Kształtowanie mikronierówności powierzchni w procesie dokładanego toczenia ostrzami polikrystalicznymi, *Postępy Technologii Maszyn* vol.22 nr 3, 1998
- [KLO99] Klocke F., Krieg T., Coated Tools for Metal Cutting - Features and Applications, *Annals of the CIRP* Vol. 48/2/1999
- [KNO93] Knotek O., Löfler F., Krämer G., Deposition, Properties and Performance Behaviour of Carbide and Carbonitride PVD Coatings, *Surface and Coating Technology*, 61 (1993) 320
- [KON91] Konczakowski A., Metrologiczne uwarunkowania analizy widmowej struktury geometrycznej powierzchni w diagnostyce obrabiarek, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1991
- [KON95] König W., Winands N., Gerschwiller K., Schneidstoffe und Werkzeuge: Standortbestimmung und Perspektiven in sich wardelndem Umfeld, *VDI-Z*, 4(136), 1994
- [KOS96] Kosmol J., Monitorowanie ostrza skrawającego, metody konwencjonalne i sieci neuronowe, WNT, Warszawa, 1996
- [KUD93] Kudrewicz J., *Fraktale i chaos*, WNT, Warszawa, 1993
- [KUK00] Kukielka L., *Podstawy badań inżynierskich*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2000
- [KUL93] Kulikowski J.L., *Komputery w badaniach doświadczalnych*, PWN, Warszawa, 1993
- [KUP97] Kupczyk M., *Jakość technologiczna i użytkowa ostrzy skrawających z powłokami przeciwzuzyciowymi*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1997

- [KUP98] Kupczyk M., Ocena wpływu zastosowania powłoki azotku tytanu na ostrzach skrawających na chropowatość obrabianej powierzchni, *Modern Plasma Surface Technology*, 1998
- [KUR97] Kurzyński M., Rozpoznawanie obrazów, *Metody statystyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997
- [LAT97] Latoś H., *Elastyczność geometryczno-kinematyczna narzędzi skrawających*, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno Rolniczej, Bydgoszcz., 1997
- [LEG95] Legutko S., *Badania adhezyjnego zużycia narzędzi skrawających*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1995
- [LIP92] Lipski J., Nadzorowanie procesów skrawania metodami analizy cyfrowej sygnału wibroakustycznego. *Mechanika*, nr 54 *Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej* 225, Lublin, 1992
- [LUK00] Łukianowicz Cz., Karpiński T., Scatterometr of Machined Surfaces. *Materiały XVI Światowego Kongresu IMEKO 2000, Tom 8, World Congress Wiena 2000*
- [MAL90-1] Malik J., Perona P., Preattentive Texture Discrimination with Early Vision Mechanisms, *Journal of the Optical Society of America*, 7(5), 1990.
- [MAL90-2] Malina W., *Podstawy automatycznej klasyfikacji obrazów*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1990
- [MAN76] Mańczak K., *Technika planowania eksperymentu*, WNT, Warszawa, 1976
- [MAR96] Martyn T., *Fraktale i obiektowe algorytmy ich wizualizacji*, Wydawnictwo Nakon, Poznań, 1996
- [MAR99] Marven C., Ewers G., *Zarys cyfrowego przetwarzania sygnałów*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1999
- [MAT91] Materka A., *Elementy cyfrowego przetwarzania i analizy obrazów*, PWN, Warszawa-Łódź, 1991
- [MAT98] Dokumentacja programu Matlab - Using Matlab, Using Matlab Graphics, Matlab 5.2 Product Family New Features, Statistic Toolbox User's Guide, Image Processing Toolbox User's Guide, Signal Processing Toolbox User's Guide, Neural Network Toolbox User's Guide, The MathWorks Inc., 1998
- [MIE89] Miernik M., *Podstawy skrawania stopów kobaltowych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1989
- [MIE96-1] Miernik M., Zastosowanie sieci neuronowych do monitorowania parametrów chropowatości powierzchni po obróbce, *Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej*, WW, Gorzów, 1996
- [MIE96-2] Miernik M., Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych do analizy niemonotoniczności funkcji okresu trwałości ostrza, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń* 4, 1996
- [NAD93] Nadler M., Smith E.P., *Pattern Recognition Engineering*. Willey, 1993
- [NAL00] *Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000*, p.red. M. Nałęcza. Tom 6 *Sieci neuronowe* p.red. W. Duchy, J. Korbiczy, L. Rutkowskiego, R. Tadeusiewicza, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa, 2000
- [NOV96] Novak A., Wiklund H., On-line Prediction of the Tool Life, *Annals of the CIRP* Vol. 45/1/1996
- [NOW90] Nowicki B., Steczowicz M., Szkopek T., *Przyrządy do optycznych i kontaktowych czynnych pomiarów chropowatości*, *Metrologia i systemy pomiarowe*, Zeszyt 5, 1990

- [NOW91] Nowicki B., Struktura geometryczna, Chropowatość i falistość powierzchni, WNT, Warszawa, 1991
- [NOW96] Nowicki B., Kierunki rozwoju metrologii struktury geometrycznej powierzchni, III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej-WW'96, Gorzów Wielkopolski, 1996
- [OCZ98-1] Oczóś K.E., Lubimow W., Nowe aspekty trójwymiarowej (3D) analizy chropowatości powierzchni obrabianej, *Mechanik*, nr 8-9, 1998
- [OCZ98-2] Oczóś K.E., Postęp w obróbce skrawaniem. Obróbka na sucho i ze zminimalizowanym smarowaniem, *Mechanik*, nr 5 i 6, 1998
- [OGI91] Ogilvy J.A., Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces, Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, 1991
- [OHL94] Ohlsson R., Rosen B.G., Pulkkiainen T., Jonasson M., Practical Considerations When Measuring 3D Surface -Roughness, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, Zeszyt 3-4 (99-100) 1994
- [OJA96] Ojala T., Pietikainen M., Harwood D., A Comparative Study of Texture Measures with Classification Based on Feature Distributions. *Pattern Recognition*, 29(1), 1996
- [OTT97] Ott E., Chaos w układach dynamicznych, WNT, Warszawa, 1997
- [PAJ00] Pajzderski P., Iglantowicz T., Dokładność metody pomiarowej a niepewność pomiaru - próba analizy, *Pomiary Automatyka Kontrola* 5, 2000
- [PAR91] Partyka J., Piwkowski J., Storch B. Zastosowanie techniki cyfrowej przetwarzania obrazu do badania oddziaływań ostrza i przedmiotu obrabianego, *Materiały XVII szkoły tribologicznej „Metody badania warstwy wierzchniej w procesach technologicznych i tribologicznych”*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 82/1991
- [PAV87] Pavlidis Theo, Grafika i przetwarzanie obrazów, WNT, Warszawa, 1987
- [PAY98] Payne T.R., Edwards P., Implicit Feature Selection with the Value Difference Metric, *Proceedings of ECAI 98 13th Conference on Artificial Intelligence*, by John Wiley & Sons, Ltd., 1998
- [PAY99] Payne T.R., Edwards P., Dimensionality Reduction through Correspondence Analysis, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1999
- [PIO00] Piotrowski J., Kostyra K., Wzorcowanie aparatury pomiarowej, PWN, Warszawa, 2000
- [POL77] Polański Z., Metody optymalizacji w technologii maszyn, PWN, Warszawa, 1977
- [POL84] Polański Z., Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa, 1984
- [PRE95] Precht W., Czyżniewski A., Pancielejko M., Walkowiak W., Structure and Properties of TiC_xN_{1-x} Coating Obtained by Different PVD Methods, Referat nr B5.06 na International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, April 24-28, San Diego, California, 1995
- [PRZ95] Przelaskowski A., Efektywne metody kompresji obrazów medycznych, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 1995
- [RAO93] Rao R.A., Lohse G.L., Identifying High Level Features of Texture Perception, *CVGIP, Graphical Models and Image Processing*, 55, 1993

- [ROG95] Rogoż K., Komputerowa analiza tekstury ultrasonograficznych obrazów tkanek wątroby, Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 1995
- [SAN97] Santochi M., Dini G., Tantussi G., A Sensor-Integrated Tool For Cutting Force Monitoring, *Annals Of The CIRP Vol.46/1*, 1997
- [SAT94] Sato Y., Ikeuchi K., Temporal –Colour Space Analysis of Reflection, *Journal of the Optical Society of America Vol.11, Nr 11*, 1994
- [SCH92] Schiemann T., Bomans M., Tiede U., Hohne K.H., Interactive 3D Segmentation, <http://www.uke.uni-hamburg.de/institute/imdm/idv/publikationen/vbc92sch/>
- [SCH95] Schuster H.G., Chaos deterministyczny. Wprowadzenie, PWN, Warszawa, 1995
- [SIC97] Sick B., Monitoring the Wear of Cutting Tools In CNC Lathes With Artificial Neural Networks, ICASSP, München, 1997
- [SIT98] Sitnik L., Kinetyka zużycia, PWN, Warszawa, 1998
- [SKA93] Skarbek W., Metody reprezentacji obrazów cyfrowych, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1993
- [SKA98] Skarbek W., Multimedia, Algorytmy i standardy kompresji, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1998
- [SKO94] Skoneczny S., Classical and Neural Methods of Image Filtering, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1994
- [SOK95] Sokołowski A., Kosmol J., Diagnostyka narzędzia za pomocą sieci neuronowej, IV Naukowa Szkoła Nadzorowania i Diagnostyki Systemów Obróbkowych, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn I Automatykacji Politechniki Wrocławskiej 57, 1995
- [SOK99] Sokołowski A., Kosmol J., Artificial Intelligence in Cutting Process Monitoring, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, Vol. 23, Nr 3*, 1999
- [SON99] Sonka M., Hlavac V., Boyle R., Image Processing, Analysis and Machine Vision PWS Publishing at Books/Cole Publishing Company, 1999
- [STO01] Storch B., Podstawy obróbki skrawaniem, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2001
- [STO89] Storch B., Wzajemne oddziaływanie naroża ostrza i materiału skrawanego, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1989
- [STO91-1] Storch B., Partyka J., Pelc T., Badania cyfrowego przetwarzania obrazu w sterowaniu i nadzorowaniu przebiegu skrawania, Raporty Instytutu Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej nr 14, 1991
- [STO91-2] Storch B., Piwkowski J., Partyka J., Zastosowanie cyfrowego przetwarzania obrazu do badania zużycia ostrza, Materiały konferencji „Metrologiczne problemy w technikach wytwarzania“, Koszalin – Mielno, 1991
- [STO91-3] Storch B., Stereometryczna interpretacja wzajemnego oddziaływania naroża ostrza i powierzchni obrabianej, Materiały XVII szkoły tribologicznej „Metody badania warstwy wierzchniej w procesach technologicznych i tribologicznych”, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 82/1991
- [STO93-1] Storch B. Mechanika zużycia pomocniczej powierzchni przyłożenia, Prace katedr Wydziału Mechanicznego w zakresie technologii maszyn. Materiały Konferencyjne Wydziału Mechanicznego WSIInż. Koszalin, 1993
- [STO93-2] Storch B., Geometryczny model zużycia pomocniczej powierzchni przyłożenia, Prace katedr Wydziału Mechanicznego w zakresie technologii maszyn, Materiały Konferencyjne Wydziału Mechanicznego WSIInż. Koszalin, 1993

- [STO94] Stone R.A., Shafer S.A., Determination of Surface Roughness from Reflected Step Edges, *J. Opt. Am.* Vol. 11, No. 11, 1994
- [STO95] Storch B., Dodatkowa interpretacja udziału nośnego, XVIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995
- [STO98] Storch B., Zawada-Tomkiewicz A., Wierucka I., Physisch Mechanische Determinanten Der Oberflaechenrauheit Verbundene Mit Der Bearbeitungsart, *Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego nr 22*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 1998
- [STO99-1] Storch B., Zawada-Tomkiewicz A., Wierucka I., Techniki przetwarzania obrazu w nadzorowaniu procesów produkcyjnych, *Konferencja Mechanika 99, Nauka i praktyka, Tom 1*, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, 1999
- [STO99-2] Storch B., Modyfikacja geometrii ostrza narzędzi skrawających z przeznaczeniem do obróbki wykańczającej, *Konferencja Mechanika 99, Mechanika i praktyka, T.1*, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, 1999
- [SUK98] Sukanya P., Takamatsu R., Sato M., The Surface-Shape Operator and Multiscale Approach for Image Classification, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E81-A, No 8, 1998
- [SUT98] Sutherland J.W., Surface Finish. Terminology, <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/quality/sfinish/terminology.html>
- [SWO97] Swonger C.W. "Ron", *Machine Vision, The Automated Extraction of Information from Images*, 1997, http://www.scx2.com/fourth_level/machine.htm
- [SYD88] Sydenham P.,H., *Podręcznik metrologii. Podstawy teoretyczne, Tom 1*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1988
- [SZA94] Szafarczyk M., *Automatic Supervision in Manufacturing*, SpringerVerlag, London, 1994
- [SZA98] Szafarczyk M., Monitorowanie przez jednoczesny pomiar kilku zjawisk fizycznych, *Mechanik*, nr 7, 1998
- [SZC98] Szczepiński W., Kotulski Z., *Rachunek błędów. Zastosowania inżynierskie*, PWN, Warszawa, 1998
- [TAD91] Tadeusiewicz R., Flasiński M., *Rozpoznawanie obrazów*, PWN, Warszawa, 1991
- [TAD93] Tadeusiewicz R., *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa, 1993
- [TAD97] Tadeusiewicz R., Korohoda P., *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków, 1997
- [TAR95] Tarnowski W., *Komputerowy system symulacji Simulink z wprowadzeniem do Matlab-a*. Wydawnictwo WSI, Koszalin, 1995
- [TAU98] Taur J.S., Tao Chin-Wang, Texture Classification Using A Fuzzy Texture Spectrum And Neural Networks, *Journal Of Electronic Imaging* 7(1) 1998
- [TOM96] Tomasi C., *Topics in Computer Vision, Materiały kursu z analizy tekstur*, <http://www.stanFord.edu/class/cs328b>
- [TOM98] Tomasik J., Rudziński R., Wpływ odstępu próbkowania na wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni, *Pomiary Automatyka Robotyka* 11, 1998
- [TOR67] Torrence K., Sparrow E., Theory for Off-specular Reflection from Roughened Surfaces, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 57, Nr 9

- [TUC98] Tuceryan M., Jain A.K., Texture Analysis, In The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision by Chen C.H., Pau L.F, Wang P.S.P., World Scientific Publishing Co., 1998
- [VEN96] Venuvinod P.K., Djordjevich A., Towards Active Chip Control, Annals of the CIRP Vol. 45/1/1996
- [WAL95] Walker R.F., Jackway P., Longstaff I.D., Improving Co-occurrence Matrix Feature Discrimination, Proceedings of DICTA'95, The 3rd Conference on Digital Image Computing, Brisbane, 1995
- [WAL97] Walker R.F., Jackway P., Longstaff I.D., Recent Developments in The Use of the Co-occurrence Matrix for Texture Recognition, 13th International Conference on Digital Signal Processing DSP 97 2-4 July 1997, Vol. I, Santorini, Greece, 1997
- [WAN99] Wang J.Y., Liu C.R., The Effect of Tool Flank Wear on the Heat Transfer, Thermal Damage and Cutting Mechanics in Finish Hard Turning, Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999
- [WEB99] Webster J.G., The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, CRC Press LLC, 1999
- [WEC80] Wechsler H., Texture Analysis - A Survey, Signal Processing 2, 1980
- [WHI94] Whitehouse D., Handbook of Surface Metrology, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994
- [WIE96-1] Wieczorowski K., Żebrowski K., Kształtowanie ostatecznej charakterystyki warstwy wierzchniej części maszyn, III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej-WW'96, Gorzów Wielkopolski, 1996
- [WIE96-2] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J., Pochylenie powierzchni jako źródło informacji o anizotropii powierzchni, III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej-WW'96, Gorzów Wielkopolski, 1996
- [WOZ96] Woźnicki J., Podstawowe techniki przetwarzania obrazu, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1996
- [WYR99] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik, Główny Urząd Miar, 1999
- [WYS97] Wysiński M., Nowoczesne materiały narzędziowe stosowane w obróbce skrawaniem, WNT, Warszawa, 1997
- [YOS98] Yoshida Y., Wu Y., Classification of Rotated and Scaled Textured Images Using Invariants Based on Spectral Moments, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E81-A, No 8, 1998
- [ZAL96] Zalewski A., Cegieła R., Matlab – obliczenia numeryczne i ich zastosowania, Wydawnictwo Nakom, Poznań, 1996
- [ZAW00] Zawada-Tomkiewicz A., Pancielejko M., Zużycie ostrzy skrawających z węglików spiekanych pokrytych warstwami typu TiC_xN_{1-x} . 12th International Summer School Modern Plasma Surface Technology, Kołobrzeg, 2000
- [ZAW01] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B., Classifying the Wear of Turning Tools with Neural Networks, Journal of Materials Processing Technology 109, 2001
- [ZAW95-1] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B., Teoretyczny model refleksyjności powierzchni rzeczywistej, VI Konferencja Naukowo Techniczna - Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn, Rzeszów, 1995

-
- [ZAW95-2] Zawada-Tomkiewicz A., Tomkiewicz D., Wykorzystanie Matlab w opisie chropowatości powierzchni, Krajowa Konferencja Użytkowników Matlab, Wydawnictwo AGH, Kraków, 1995
- [ZAW97-1] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B., Fizyczno-mechaniczne determinanty chropowatości powierzchni związane ze sposobem obróbki, Forum Prac Badawczych Mielno-Unieście, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 1997
- [ZAW97-2] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B., The Estimation of the Tool Wear, The Third Conference - Neural Networks and their Applications, PUHW, Axon s.c., Częstochowa, 1997
- [ZAW98] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B., Classifying the Wear of Turning Tools with Neural Networks, Konferencja APE, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1998
- [ZAW99] Zawada-Tomkiewicz A., Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów, Materiały pomocnicze Wydziału Mechanicznego, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 1999
- [ZEB85] Żebrowski H., Narzędzia skrawające, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1985
- [ZHA91] Zhang G.M., Hwang T.W., Song J.F., Dynamic Visualisation Of The Surface Texture Formed During Machining TR 91-3, 1991, http://www.isr.umd.edu/TechReports/ISR/1991/TR_91-3/TR_91-3.phtml
- [ZHA92] Zhang G.M., Yerramareddy S. Lee S.M., Lu S.C.-Y., Simulation of Intermittent Turning Processes, J. of Dynamics Systems, Measurements and Control, Vol. 13, No. 3, 1990
- [ZHA94] Zhang G., Gopalakrishnan S., Fractal Geometry Applied to on-line Monitoring Of Surface Finish., Technical Research Report. T.R.94-64, 1994 http://www.isr.umd.edu/TechReports/ISR/1991/TR_94-64/TR_94-64.phtml
- [ZHA95] Zhang G., Stanley J. Ng, Dung T.Le, Lenox S. Job, Characterisation of the Surface Texture Formed During the Machining of Ceramics, TR 95-85, 1995 http://www.isr.umd.edu/TechReports/ISR/1995/TR_95-85/TR_95-85.phtml
- [ZUR96] Żurada J., Barski M., Jędruch W., Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy teorii i zastosowania, PWN, Warszawa, 1996