POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
Zakład Monitorowania Procesów Technologicznych

mgr inż. Łukasz Żurawski

ANALIZA TOPOGRAFII POWIERZCHNI KSZTAŁTOWANYCH Z UŻYCIEM WIELOOSTRZOWYCH NARZĘDZI FREZERSKICH Z OSTRZAMI O ZRÓŻNICOWANYM UKSZTAŁTOWANIU

Rozprawa doktorska

PROMOTOR

Prof. nadzw. dr hab. inż. Borys Storch

Koszalin 2012

SPIS TREŚCI

SPIS OZNACZEŃ..... 5

WSTĘP..... 10

1. WPROWADZENIE..... 13

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA W ŚWIETLE LITERATURY..... 17

2.1. Skrawanie narzędziami jednoostrzowymi..... 17

2.1.1. Model analityczny skrawania w obróbce jednoostrzowej..... 17

2.1.2. Modelowanie zużycia dla pojedynczego ostrza..... 19

2.1.3. Model tworzenia nierówności za pomocą pojedynczego ostrza.....24

2.2. Skrawanie narzędziami wieloostrzowymi..... 30

2.2.1. Uogólnienie warunków pracy ostrza głowicy frezowej..... 32

2.2.2. Model pracy ostrza narzędzi wieloostrzowych.....36

2.2.3. Model zużycia ostrza narzędzia wieloostrzowego..... 40

2.2.4. Model tworzenia nierówności na powierzchni obrobionej ostrzem do frezowania..... 49

2.3. Charakterystyki struktury geometrycznej powierzchni *SGP*.....52

2.3.1. Opis metod stykowych..... 53

2.3.2. Charakterystyka chropowatości *3D*.....57

2.4. Monitorowanie powierzchni obrobionej.....60

2.5. Monitorowanie ostrza skrawającego..... 64

2.5.1. Metody pośrednie i bezpośrednie w monitorowaniu.....64

2.5.2. Monitorowanie zużycia ostrza.....65

2.6. Podsumowanie.....70

3. CEL I HIPOTEZA NAUKOWA PRACY..... 71

4. ZAKRES I METODYKA BADAŃ.....73

4.1. Zakres i metodyka w badaniach wstępnych..... 73

4.2. Zakres i metodyka w badaniach zasadniczych..... 76

5. BADANIA WŁASNE..... 86

5.1. Stanowisko badawcze.....86

5.1.1. Ocena dokładności zbudowanego stanowiska badawczego..... 89

5.2. Badanie dokładności geometrycznej..... 90

5.2.1. Dokładność frezarki pionowej.....90

5.2.2. Dokładność wymiarowa płytki wymiennej..... 91

5.2.3. Dokładność wymiarowa gniazd w głowicy frezowej..... 97
5.3. Wyniki badań dla głowicy frezowej R245..... 108
5.3.1. Badania bicia czołowego ostrzy w głowicy R245..... 108
5.3.2. Badania zużycia na roboczych powierzchniach wierzchołka ostrza w głowicy R245.....110
5.3.3. Identyfikacja trwałości poszczególnych ostrzy w głowicy R245.....114
5.3.4. Badanie chropowatości powierzchni obrobionej po frezowaniu głowicą R245.....118
5.4. Wyniki badań dla głowicy frezowej R390..... 123
5.4.1. Badania bicia czołowego ostrzy w głowicy R390.....123
5.4.2. Badania zużycia na roboczych powierzchniach wierzchołka ostrza w głowicy R390.....124
5.4.3. Identyfikacja trwałości poszczególnych ostrzy w głowicy R390.....128
5.4.4. Badanie chropowatości powierzchni obrobionej po frezowaniu głowicą R390.....131
5.5. Modele pracy ostrzy modyfikowanych.....136
5.6. Wyniki badań pracy ostrzy zmodyfikowanych głowicy R245mod.....140
5.6.1. Badania bicia czołowego ostrzy w głowicy R245mod.....140
5.6.2. Badania zużycia roboczych powierzchni zmodyfikowanego ostrza głowicy R245mod.....142
5.6.3. Identyfikacja trwałości ostrza zmodyfikowanego głowicy R245mod.....146
5.6.4. Badanie chropowatości powierzchni obrobionej dla zmodyfikowanego ostrza głowicy R245mod.....150
5.7. Wyniki badań pracy ostrzy zmodyfikowanych głowicy R390mod.....155
5.7.1. Badania bicia czołowego ostrzy w głowicy R390mod.....155
5.7.2. Badania zużycia roboczych powierzchni zmodyfikowanego ostrza głowicy R390mod.....156
5.7.3. Identyfikacja trwałości ostrza zmodyfikowanego głowicy R390mod.....161
5.7.4. Badanie chropowatości powierzchni obrobionej dla zmodyfikowanego ostrza głowicyR390mod..... 164
5.8. Wnioski z wyników badań.....169
6. WNIOSKI KOŃCOWE.....171
6.1. Wnioski naukowe..... 171
6.2. Wnioski utylitarne.....171

6.3. Kierunki dalszych prac..... 171
BIBLIOGRAFIA..... 173
SPIS RYSUNKÓW..... 184
SPIS TABEL..... 189
SPIS TABLIC..... 190
ZAŁĄCZNIK NR 1..... 192
ZAŁĄCZNIK NR 2..... 225
ZAŁĄCZNIK NR 3..... 250
ZAŁĄCZNIK NR 4..... 275

SPIS OZNACZEŃ

a	–	długość krawędzi dogładzającej, [mm]
a_p	–	głębokość skrawania, [mm]
b; b_s	–	długość krawędzi dogładzającej, [mm]
d	–	średnica okręgu wpisanego w zarys płytki wymiennej, [mm]
dm_m	–	średnica mocowania narzędzia, [mm]
e	–	przyjęty dopuszczalny błąd na poziomie ufności 99%
f ; f_n	–	posuw na obrót, [mm/obrót]
f_z	–	posuw na ostrze, [mm/ostrze]
h	–	grubość warstwy skrawanej, [mm]
h_i	–	i-ta grubość warstwy skrawanej, [mm]
h_{min}	–	minimalna grubość warstwy skrawanej, [mm]
iW	–	szerokość płytki, [mm]
m	–	odległość naroża lub krawędzi skrawającej od średnicy okręgu d, [mm]
n	–	prędkość obrotowa narzędzia, [obr./min]
$l=iC$	–	całkowita długość płytki, [mm]
l_a	–	długość czynnej krawędzi skrawającej, [mm]
l_n	–	długość odcinka pomiarowego, [mm]
l_s	–	długość krawędzi dogładzającej, [mm]
r	–	promień zaokrąglenia końcówki pomiarowej, [mm]
$r_{\varepsilon 1}$	–	promień zaokrąglenia naroża przy głównej krawędzi skrawającej dla płytki wymiennej z krawędzią dogładzającą b_s, [mm]
$r_{\varepsilon 2}$	–	promień zaokrąglenia naroża przy pomocniczej krawędzi skrawającej dla płytki wymiennej z krawędzią dogładzającą b_s, [mm]
r_ε	–	promień zaokrąglenia wierzchołka ostrza, [mm]
r_n	–	promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej ostrza, [mm]
s	–	grubość płytki wymiennej, [mm]
t , t_i	–	czas skrawania, [min]
t_m	–	czas maszynowy, [min]
v_f	–	prędkość posuwu, [mm/min]
v_c	–	prędkość skrawania, [m/min]
z	–	liczba ostrzy w głowicy frezowej
z_α	–	wielkość parametru standardowego błędu średniej odczytanej z tablic dla 1- α
A_α	–	główna powierzchnia przyłożenia
A'_α	–	pomocnicza powierzchnia przyłożenia

A_{bs}	–	powierzchnia dogładzająca
A_c; A_f; A_v	–	tangensy kątów pochylenia funkcji w zależności F_c; F_f; $F_v = f(h)$,
A_γ	–	powierzchnia natarcia,
B	–	szerokość frezowanego materiału, [mm]
D_c	–	średnica głowicy frezowej, [mm]
KB	–	odległość między pierwotną krawędzią skrawającą, a najbardziej odległą krawędzią zużycia rowka na powierzchni natarcia, [mm]
KE	–	cofnięcie naroża określane w płaszczyźnie podstawowej P_r na śladzie przecięcia z płaszczyzną tylną P_p, [mm]
KF	–	i-te skrócenie promieniowe ostrza, [mm]
KM	–	odległość między główną krawędzią skrawającą, a największą głębokością zużycia rowka, [mm]
KT	–	największa głębokość żłobka na powierzchni natarcia, [mm]
L_s	–	droga skrawania, [m]
Lt	–	długość przesuwu końcówki pomiarowej, [mm]
P_f	–	płaszczyzna robocza (boczna)
P_p	–	płaszczyzna tylna
P_s	–	płaszczyzna krawędzi skrawającej układu narzędzia
Pt	–	wysokość pierwotnego profilu powierzchni, [μm]
Pt_m	–	wysokość teoretycznego pierwotnego profilu powierzchni, [μm]
Ra	–	średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości, [μm]
Rao	–	średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości dla ostrza o narożu "ostrym", [μm]
$Rmax$	–	maksymalna wysokość chropowatości, [μm]
$Rmax_t$	–	maksymalna teoretyczna wysokość nierówności profilu chropowatości, [μm]
Rp	–	maksymalna wysokość wzniesienia profilu chropowatości, [μm]
Rq	–	średnie kwadratowe odchylenie profilu od linii średniej, [μm]
Rsk	–	współczynnik asymetrii profilu chropowatości (skośność), [μm]
Rt	–	całkowita wysokość profilu (między szczytem największego wierzchołka, a najniższym zagłębieniem), [μm]
Rt_o	–	teoretyczna wysokość nierówności powierzchni dla ostrza o narożu "ostrym", [μm]
Rz	–	wysokość chropowatości według dziesięciu punktów profilu, [μm]
Rz_t	–	teoretyczna wartość parametru Rz, [μm]
$S1$	–	punkt początku pasma starcia SW
SW	–	szerokość pasma starcia na wierzchołku naroża mierzona w kierunku posuwu, [mm]

S_k	–	końcowy punkt skrawania
S_p	–	początkowy punkt skrawania
T	–	punkt rozpoczynania pracy przez ostrze powierzchnią natarcia A_γ
T'	–	punkt rozpoczynania pracy przez ostrze główną krawędzią przystawienia
UT ; U	–	punkt rozpoczynania pracy przez ostrze powierzchnią natarcia A_γ
U'	–	punkt rozpoczynania pracy przez ostrze pomocniczą krawędzią przystawienia
V	–	punkt rozpoczynania pracy przez ostrze jego narożem $r_{\varepsilon 1}$
Vt	–	prędkość przesuwu końcówki pomiarowej, [mm/s]
VB_A	–	średnia szerokość pasma zużycia w strefie kontaktu krawędzi skrawającej z materiałem obrabianym [mm]
VBb_s	–	zużycie równomierne, [mm]
$VBb_{s\,max}$	–	zużycie nierównomierne, [mm]
VB_B	–	średnia szerokość pasma zużycia na głównej powierzchni przyłożenia ostrza, [mm]
VB_C	–	szerokość pasma zużycia w okolicach naroża ostrza na głównej powierzchni przyłożenia, [mm]
VB_N	–	zużycie wrębowe na głównej powierzchni przyłożenia, [mm]
VB_{Bmax}	–	największą szerokość pasma zużycia, [mm]
VB'_r	–	zużycie na pomocniczej powierzchni przyłożenia, [mm]
VBr_1b_s	–	zużycie na pierwszym narożu ostrza dla płytki dogładzającej, [mm]
VBr_2b_s	–	zużycie na drugim narożu ostrza dla płytki dogładzającej, [mm]
W	–	punkt rozpoczynania pracy przez ostrze jego narożem $r_{\varepsilon 2}$
WV	–	punkt rozpoczynania pracy przez ostrze krawędzią dogładzającą b_s
α'_f	–	kąt przyłożenia boczny, [°]
α_n	–	kąt normalny boczny, [°]
α_p	–	tylny kąt przyłożenia, [°]
α_E	–	kąt elewacji oświetlenia, [°]
β_p	–	tylny kąt ostrza, [°]
γ_f	–	kąt natarcia boczny, [°]
γ_n	–	kąt natarcia normalny, [°]
γ_p	–	tylny kąt natarcia, [°]
ε_{ai}	–	wartość przesunięcia krawędzi ostrza w kierunku czołowym, [°]
ε_r	–	kąt wierzchołkowy w płaszczyźnie podstawowej, [°]
ε_{ri}	–	wartość przesunięcia krawędzi ostrza w kierunku promieniowym, [°]
ε_{P1}	–	kąt opisujący położenie punktu P_1, [°]
ε_{S1}	–	kąt opisujący położenie punktu $S1$, [°]

κ_r	–	główny kąt przystawienia w płaszczyźnie P_r, [°]
κ'_r	–	pomocniczy kąt przystawienia w płaszczyźnie pomocniczej P_r, [°]
κ'_{ri}	–	pomocniczy kąt przystawienia dla przejściowej krawędzi skrawającej, [°]
λ_s	–	kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej w płaszczyźnie P_s, [°]
μ_i	–	parametr określający położnie wierzchołków naroża ostrza
ξ_i	–	parametr określający położenie głównej krawędzi skrawającej, przecinającej się z granicą głębokości skrawania a_p
ξ'_i	–	parametr określający położenie pomocniczej krawędzi skrawającej, przecinającej się z granicą głębokości skrawania a_p
σ	–	odchylenie standardowe
φ	–	kąt określający położenie rozważanego przekroju promieniowego powierzchni obrobionej, [°]
φ_p	–	kąt dobiegu ostrza do punktu S_p, [°]
Δ	–	błąd graniczny na poziomie ufności 1-α dla wartości średniej
Δ_1	–	graniczny błąd systematyczny
Δ_2	–	graniczny błąd przypadkowy na poziomie ufności 1-α dla wartości średniej
ΔF_f	–	przyrost siły posuwowej F_f, [N]
ΔF_v	–	przyrost siły obwodowej F_v, [N]
Ψ	–	kąt styku ostrza z materiałem obrabianym, [°]
Ψ_j	–	kąt "jałowy" ostrza z materiałem obrabianym, [°]

SKRÓTY

2D	–	two-dimensional (grafika dwuwymiarowa)
3D	–	three-dimensional (grafika trójwymiarowa)
DNiPS	–	Diagnostyka Narzędzia i Procesu Skrawania
CCD	–	Charge Coupled Device - matryca światłoczuła
EN CW612N	–	stop mosiądzu (dawne oznaczenie MO 59)
EN PN C45	–	stop stali (dawne oznaczenie stal 45)
HDD	–	Hard Disk Drive - dysk twardy komputera
LED	–	Light-Emitting Diode (dioda elektroluminescencyjna)
KSO	–	Katastroficzne Stępienie Ostrza
R245	–	głowica frezowa z płytkami wymiennym z powierzchnią dogładzającą b_s
R390	–	głowica frezowa z płytkami wymiennym z zaokrąglonym narożem r_ε

R245mod	–	głowica frezowa z płytkami wymiennym z powierzchnią dogładzającą b_s po modyfikacji geometrii ostrza
R390mod	–	głowica frezowa z płytkami wymiennym z zaokrąglonym narożem r_ε po modyfikacji geometrii ostrza
SGP	–	Struktura Geometryczna Powierzchni
TCMS	–	Tool Condition Monitoring Systems - system monitorowania stanu narzędzia
TiN	–	Titanium Nitride - azotek tytanu

WSTĘP

Wśród podstawowych metod wytwarzania części maszyn jest obróbka skrawaniem i ocenia się, że stanowi około 50% ogólnej liczby operacji stosowanych w produkcji. Związane z nią są dziedziny dotyczące produkcji - obrabiarek, narzędzi, metrologii warsztatowej, oprzyrządowania i projektowania procesów produkcyjnych. Należy ona do rodzajów obróbek uniwersalnych, umożliwiających stosowanie narzędzia o zdefiniowanej geometrii i liczbie ostrzy [ŻEB 98].

Od dziesiątków lat prowadzone są badania dążące do uogólnienia zjawisk w procesach skrawania w oparciu o prawa fizyki, badania własności mechanicznych materiałów skrawanych [KUK 94], [KUK 02]. Ocenia się przydatność nowych materiałów narzędziowych i tworzy się wieloparametrowe modele optymalizacji przy doborze warunków obróbki. Wyraźnie to jest widoczne w materiałach publikowanych przez ostatnie dziesięciolecie z zakresu rozwoju badań obróbki skrawaniem, zwłaszcza dotyczące wzrostu wydajności i jakości obróbki. Dotyczą one także zastosowania nowoczesnych wysokowydajnych materiałów na narzędzia skrawające, uwzględniają zmiany konstrukcyjne i geometryczne ostrzy.

Prowadzone badania pozwalają wyróżnić narzędzia składane, które są powszechnie stosowane w warunkach przemysłowych do kształtowania powierzchni [DMO 80], [CIC 06], a rozwój narzędzi frezarskich powoduje, że wypierają one inne odmiany obróbki takie jak struganie, dłutowanie, gwintowanie, a nawet obróbkę otworów o dużych średnicach. Jedną z odmian obróbki powierzchni jest frezowanie walcowo – czołowe. Wykorzystuje się do tego celu frezy i głowice frezowe z płytkami wymiennymi, które są zaliczane do narzędzi składanych. Korpusy tych narzędzi wykonane są ze stali hartowanych, do których mocuje się płytki wymienne jako ostrza skrawające, przydatne zarówno do obróbki zgrubnej i wykończeniowej. Zauważalny obecnie jest wyraźny postęp w miniaturyzacji płytek wymiennych z jednoczesnym podwyższaniem prędkości obrotowych głowic przy zachowaniu optymalnych prędkości skrawania.

Można zatem prognozować, że kierunek rozwoju procesu frezowania jest właściwy, a w obecnych zastosowaniach jest to najtańszy i najwygodniejszy sposób obróbki przy zachowaniu dostatecznej wydajności i efektywności wytwarzania części maszyn [FIL 00].

Mając to na uwadze, uznano, że bardzo przydatne będą badania procesu frezowania ze zwróceniem szczególnej uwagi na pracę krawędzi skrawającej – szczególnie zjawisk przykrawędziowych dla ostrzy o zmiennych geometriach i ich modyfikacjach, a które pozwolą w przyszłości tworzyć bazy danych dla konstruktorów narzędzi.

W przedstawionej rozprawie doktorskiej uznano, że należy wykorzystać wiedzę o pracy pojedynczego ostrza [KUN 69], [ŻUR 06 - 1] i zbadać możliwość modelowania pracy narzędzi wieloostrzowych ze zwróceniem szczególnej uwagi na tworzenie *SGP* - struktury geometrycznej powierzchni frezowanej. Po badaniach wstępnych uznano, że należy określić ograniczenia

umożliwiające przeniesienie warunków skrawania pojedynczym ostrzem do warunków pracy dla narzędzi wieloostrzowych.

W związku z tym w kolejnych częściach pracy opisano: ustawienia płytek wymiennych z uwagi na bicie czołowe (osiowe) i promieniowe charakterystyczne dla pracy głowic frezowych, rozwiązań dotyczących kilku typowych i modyfikowanych geometrii ostrzy oraz dla każdego z nich, wyznaczyć przebiegi ich zużycia.

Uporządkowano także modele kinematyczne opisujące teoretyczne trajektorie ruchu każdego z ostrzy i rozpatrzono warunki pierwszego styku krawędzi skrawającej ostrza z materiałem obrabianym.

Monitorowano zarówno zmiany zużycia i jednocześnie tworzenia nierówności na powierzchni obrobionej po przejściu kolejnych ostrzy w głowicy frezowej. Opisano modele tworzenia nierówności na obrobionej powierzchni, podczas obróbki jednoostrzowej i przeprowadzono próbę wykorzystania ich, do modelowania narzędzia wieloostrzowego na przykładzie głowicy frezowej. Opisano metody pośrednie i bezpośrednie pomiaru zużycia ostrza. Tę część podsumowano wnioskami.

W części badawczej w poszczególnych rozdziałach, praca podporządkowana została dążeniu do stworzenia zależności między zużyciem ostrzy i *SGP* powierzchni obrobionej po frezowaniu walcowo – czołowym. Po badaniach wstępnych i analizie literatury sformułowano hipotezę badawczą, której podporządkowano właściwą część pracy.

Zgodnie z tytułem i zakresem praca dotyczyła:

- wykorzystania trzech rodzajów ostrzy; z powierzchnią dogładzającą b_s, z zaokrąglonym narożem r_ε i o zmodyfikowanej geometrii, mocowanych w dwóch różnych głowicach frezowych,
- zapisu obrazów cyfrowych zużycia kolejnych ostrzy,
- zapisu obrazów cyfrowych z powierzchni obrobionej,
- innych wskaźników opisu struktury geometrycznej powierzchni *SGP* po obróbce,
- zmiennych parametrów skrawania,
- skrawania bez udziału cieczy obróbkowych „na sucho”, podczas frezowania materiału EN PN C45.

W dalszej części wykorzystano metody statystyczne w połączeniu z zastosowaniem technik komputerowych, które pozwoliły na opracowanie wyników badań. Dane pozyskiwane z wykorzystaniem cyfrowej reprezentacji obrazów powierzchni obrobionych, powstałych po zakończeniu obróbki, porównywano je z obrazami śladów wytarcia naroży, każdego z ostrzy oddzielnie, po określonej drodze skrawania L_s. Otrzymywane w ten sposób oryginalne dane, przedstawiono w postaci obrazów *2D* i *3D*.

Widoczne jest, że przedmiotem dysertacji, nawet po skrótowym jej omówieniu było zagadnienie monitorowania powierzchni i zużycia ostrzy po frezowaniu. Wykorzystanie nowoczesnych narzędzi statystycznych do analizy zjawisk przykrawędziowych pozwoliły na głębszą interpretację fizykalnych zjawisk na styku powierzchni zużywających się naroży ostrzy oraz tworzoną przez nie powierzchnie obrobioną.

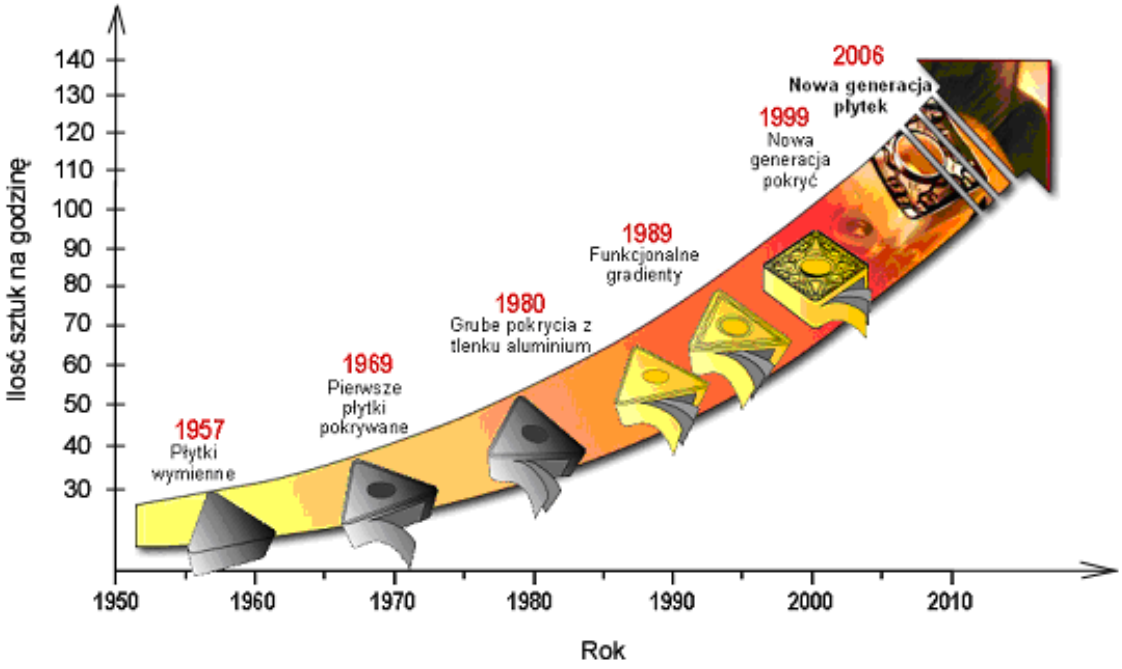
Mając na uwadze, że stosowane obecnie w przemyśle systemy monitorujące narzędzia, nie zapewniają możliwości identyfikacji stanu ich zużycia, uznano za celowe przeprowadzenie opisanych badań, które zbliżają do stworzenia bezpośrednich systemów aktywnej kontroli procesu skrawania na obrabiarce. Wskazanie stanu zużycia każdego z ostrzy ułatwiłoby ocenę jego przydatności do dalszej pracy.

1. WPROWADZENIE

Obróbka skrawaniem jak toczenie, frezowanie czy wiercenie służą do wytwarzania części maszyn dla większości produktów codziennego użytku [SOR 03]. Narzędzia skrawające spełniają ważną rolę w procesie technologicznym, które ciągle są doskonalone i unowocześniane oraz gwarantują wytwarzanie [DES 02] przy zachowaniu warunków wysokiej wydajności i dużej dokładności [FIL 02].

Dla osiągnięcia tych oczekiwań w obróbce wykorzystuje się między innymi frezowanie do kształtowania powierzchni płaskich. Wieloostrzowe głowice frezowe uzbrojone w płytki wymienne z ostrzami o zdefiniowanej geometrii tworzą bardzo złożony obraz topografii powierzchni obrobionej po frezowaniu.

Płytki wymienne zostały zaprojektowane w latach 50 XX-go wieku (rys. 1.1). Wytwarzane są ze spieków twardych, a z czasem zastosowano cienkie pokrycia ochronne, które miały grubość kilku mikrometrów. Pokrycia spowodowały możliwość podwyższenia wydajności narzędzi skrawających i poprawienie jakości obróbki. W głównej mierze pozwoliło to na zwiększenie prędkości skrawania dzięki podwyższeniu odporności na wysoką temperaturę skrawania [MEL 91], [WYS 98].

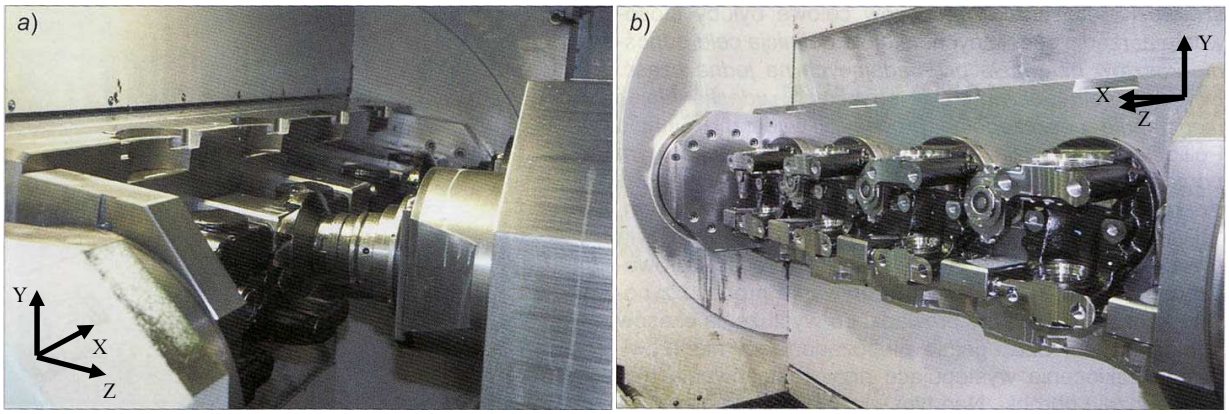


Rys. 1.1. Rozwój materiału narzędziowego na ilość wytworzonych części [SÖD 01]

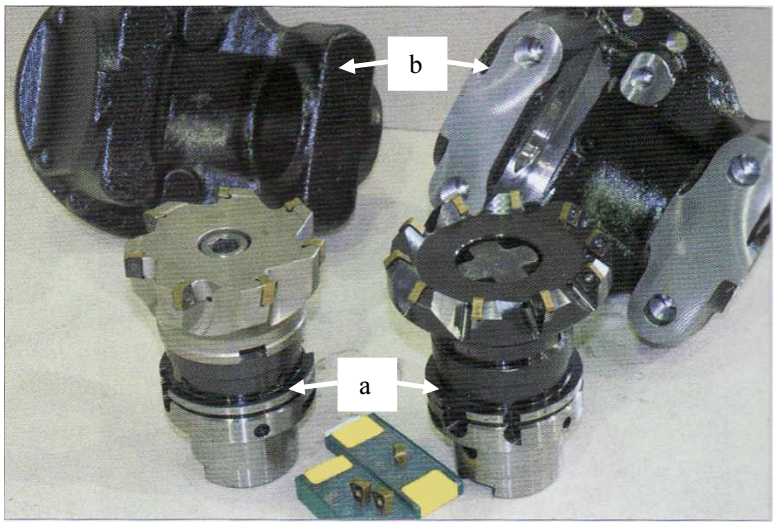
Natomiast w głowicach frezowych stosowane się dwa różne rozwiązania stereometryczne ustawiania płytki wymiennej w gnieździe korpusu, z dodatnim lub ujemnym kątem pochylenia krawędzi skrawającej λ_s i natarcia γ_n. Takie wartości geometryczne części roboczej ostrza wymusiły jednoznacznie pozycjonowanie głowicy względem przedmiotu obrabianego. Płytki ustawione dla dodatniego kąta natarcia (+) γ_n pozwalają na zmniejszenie składowych sił skrawania i stabilizują proces

skrawania przy frezowaniu. Dodatnie kąty znajdują zastosowanie w obróbce materiałów nieżelaznych i stali stopowych. Kształt płytki wymiennej przy ujemnym kącie natarcia (-) γ_n wpływa na podwojenie liczby użytecznych krawędzi skrawających. Głowice z ujemnymi kątami wykorzystuje się w obróbce zgrubnej i przy frezowaniu materiałów trudnoobrabialnych.

Przykładowe zastosowanie głowic zaprezentowano na rysunku 1.2a, gdzie widoczne jest narzędzie o osi zorientowanej prostopadle do powierzchni obrobionej oraz części po obróbce (rys.1.2b). Budowę głowicy frezowej do obróbki powierzchni płaskich pokazano na rysunku 1.3a oraz przedmiotów przed i po obróbce (rys. 1.3b).



Rys. 1.2. Obróbka zwrotnic do samochodów ciężarowych.
a) obróbka realizowana na obrabiarce,
b) na obrotowej kołysce można mocować półfabrykaty lub pobierać gotowe elementy



Rys. 1.3. Głowice frezowe z płytkami wymiennymi do obróbki zwrotnic samochodowych
a) do powierzchni płaskich, b) powierzchnie przed i po obróbce

W uproszczeniu modele obróbki wskazują na stereometryczno – kinematyczne odwzorowanie wierzchołków ostrzy skrawających i tworzenie śladów na powierzchni obrobionej, określanych nazwą

struktury geometrycznej powierzchni obrobionej. Zmiany pochodzą od niedoskonałości przyjmowanych położeń kolejnych naroży ostrzy, które biorą udział w skrawaniu [KAC 70].

Podczas frezowania przebiegi zużycia każdego z ostrzy są nierównomierne i powoduje to, że zmienne są efekty ekonomiczne frezowania [KOS 04].

Zaobserwowano, że w wyniku oddziaływania pojedynczego ostrza, oprócz kinematyczno - geometrycznego odwzorowania na powierzchni obrobionej pojawiają się deformacje świadczące o innych zjawiskach, związanych z plastycznością materiału obrabianego. Zaobserwowano także, że przy małych posuwach rzeczywista wysokość chropowatości jest znacznie większa niż teoretyczna [STO 89].

Zależność zużycia obserwowanego na powierzchni przyłożenia ostrza i powstająca w wyniku wzajemnego oddziaływania topografia powierzchni obrobionej, wymaga zweryfikowania. Wyniki takich badań przedstawiono w znaczących publikacjach [STO 09], [STO 11] dotyczących narzędzi tokarskich – jednoostrzowych.

W obróbce skrawaniem nadzorowanie stanu zużycia ostrza dokonuje operator obrabiarki lub systemy do tego celu przystosowane. W narzędziach wieloostrzowych z kilkoma czy dziesiątkami płytek wymiennych określenie trwałości ostrza sprowadza się do stwierdzenia stanu zużycia jednego z ostrzy, które osiąga dopuszczalne kryterium zużycia [GRZ 98], [CIC 06]. Powoduje to, że zbyt wczesna wymiana nie w pełni zużytego narzędzia jest ekonomicznie nieuzasadniona, natomiast zbyt późna wymiana skutkuje obniżeniem jakości wyrobu [KOS 96] lub uszkodzeniem powierzchni obrobionej jak i samej obrabiarki [SHA 04]. Wiele prac poświeconych monitorowaniu, diagnostyce narzędzia i przedmiotu obrabianego, dotyczą stosowanych systemów monitorujących: DNiPS, KSO [JEM 02], [JEM 04], [OLS 08], TCMS [LAN 01], [SHA 04], [GHO 07], które częściowo przybliżają do poprawnej oceny stanu ostrza. Celowe zatem jest prowadzenie dalszych badań dotyczących technik monitorowania i diagnozowania, które ułatwiają ocenę zużycia ostrza i struktury geometrycznej powierzchni obrobionej.

Oprócz monitorowania stanu ostrza ważny jest pomiar i definiowanie struktury geometrycznej powierzchni, z uwagi na ekonomiczne wytwarzanie [COK 96], [BEL 00], [BEN 02], [OZC 06], [COL 07], [PRI 07].

Każdy przedmiot obrabiany wykazuje odstępstwa od swego geometrycznie idealnego kształtu nominalnego, a wykonywanie powierzchni zbliżonych do ideału staje się coraz droższe. Wszystkie odstępstwa od powierzchni idealnej geometrycznie mają wpływ na funkcjonalne zachowania przedmiotu, czyli na takie charakterystyki jak odporność na ścieranie, własności ślizgowe, smarujące, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na korozję, itd. Udział tolerancji chropowatości stanowi niejednokrotnie do 50% tolerancji wymiarowej.

Ocena procesu skrawania w głównej mierze sprowadza się do szybkiej analizy wyników w konsekwencji w znaczący sposób decyduje o efektach ekonomicznych w przedsiębiorstwie [SOR

03]. Dla poprawienia wyników wytwarzania w warunkach przemysłowych dąży się, do podwyższenia wydajności i opłacalności produkcji podczas wdrażania najnowszych technologii, dbając o jakość wytwarzania, bezpieczeństwo i elastyczność produkcji [CIC 06]. Rozwinięcie tych zagadnień w warunkach przemysłowych znakomicie wypełnia wybór racjonalnej obróbki frezowania.

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA W ŚWIETLE LITERATURY

2.1. Skrawanie narzędziami jednoostrzowymi

Rodzaje narzędzi, które pracują pojedynczym ostrzem to: toczenie, struganie, dłutowanie. Podział dotyczy warunków pracy narzędzi podobnych do noży tokarskich i dalszy pogłębiony podział dotyczy warunków skrawania określanych jako toczenie swobodne lub nieswobodne. Toczenie swobodne – ortogonalne, to praca prostoliniowej krawędzi o kącie przystawienia κ_r=90°. W toczeniu nieswobodnym – nieortogonalnym główna krawędź skrawająca pracuje skośnie, a kąt przystawienia oraz kąt pochylenia krawędzi jest κ_r; $\lambda_s \neq$90°. Taki podział prowadzi do modelowania, stanu odkształceń płaskich i przestrzennych oraz przybliża do teorii skrawania, która wyjaśnia kierunek spływu wióra, współczynnika spęczenia, mocy skrawania itp. Toczenie ortogonalne i nieortogonalne należy rozpatrywać względem kierunku wektora prędkości skrawania [GRZ 98]. W skrawaniu skośnym wyróżnia się ostrza o dwóch krawędziach skrawających, a tym samym dwóch powierzchniach natarcia na których tworzą się dwa różne wióry.

Dostępne w handlu ostrza o zmodyfikowanej geometrii sprawdzają się w obróbce powierzchni płaskich, szczególnie materiałów kompozytowych i tam gdzie występuje wiór odpryskowy oraz w znacznym ograniczeniu lub wyeliminowaniu cieczy obróbkowych. Pozwalają one także na skrawanie z małymi głębokościami, w wyniku tworzy się cieńsza warstwa wierzchnia w porównaniu z ostrzami o promieniem zaokrąglenia naroża r_ε. Na przykład po toczeniu, w takich samych warunkach skrawania, dla modyfikowanych ostrzy uzyskano znacznie mniejsze wartości parametrów chropowatości, niż dla ostrzy handlowych bez modyfikacji [LAT 06], [LAT 07], [LAT 08], [LAT 09], [LAT 10].

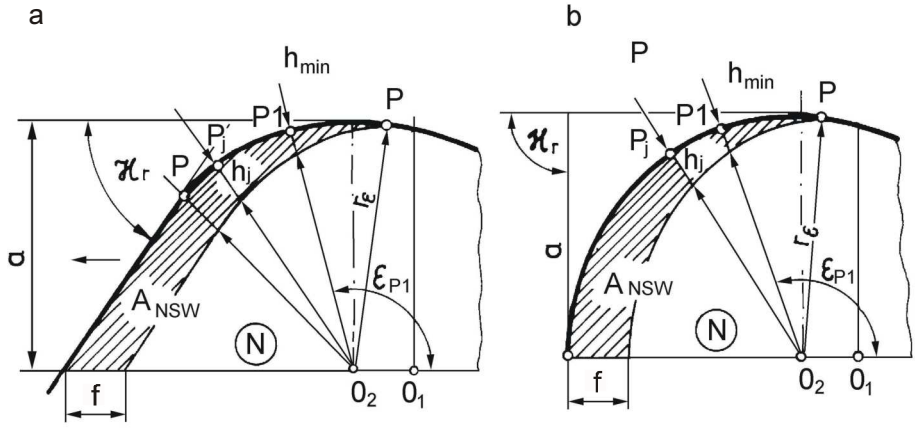
Przejściowa powierzchnia przyłożenia w praktyce jest kształtowana najczęściej jako wycinek powierzchni walca. Uproszczenia konstrukcji ostrza wprowadzane przez producentów, polegające na zastąpieniu łuku wielobokiem składającym się z prostych odcinków krawędzi, powodują skrócenie trwałości ostrza ze względu na skupione zużycie w wyniku skoncentrowanych naprężeń na krawędzi.

2.1.1. Model analityczny skrawania w obróbce jednoostrzowej

W toczeniu nieswobodnym wierzchołek ostrza wykonany jest z trzech fragmentów; głównej, pomocniczej i przejściowej krawędzi skrawającej, wzdłuż której zmienia się wartość głównego kąta przystawienia κ_r, a wraz z nią – grubość warstwy skrawanej h_i (rys. 2.1). Grubość tę w dowolnym przekroju krawędzi skrawającej wyliczyć można z zależności (2.1) wyprowadzonej z układu dwóch równań okręgów o promieniu r_ε, przesuniętych w kierunku posuwu o wartość f_i równania prostej wychodzącej ze środka 0_2 okręgu [STO 80], [POP 84], [STO 89]. Przy tych założeniach równanie określające i – tą grubość warstwy skrawanej h_i otrzyma postać:

$$h_i = r_\varepsilon - f \cos \varepsilon_{Pi} - \sqrt{r_\varepsilon^2 - f^2 \sin^2 \varepsilon_{Pi}} \tag{2.1}$$

Ponieważ w przekroju P_1, zgodnie z powyższymi analizami odnoszącymi się do granicznej grubości warstwy skrawanej, następuje rozdzielenie krawędzi skrawającej na część tworzącą wiór i drugą o warunkach ograniczających jego tworzenie. Ważne zatem jest wyliczenie miejsca położenia tego przekroju.



Rys. 2.1. Teoretyczny przekrój warstwy skrawanej dla toczenia nieswobodnego a) ukośnokątnego, b) prostokątnego [STO 80], [POP 84], [STO 89], [STO 06]

Kąt $\varepsilon_{Pi} = \varepsilon_{P1}$ wyznaczający położenie przekroju, w którym grubość warstwy skrawanej jest równa minimalnej otrzymuje się, gdy przyrówna się $h_i = h_{\min}$:

$$\cos \varepsilon_{P1} = \frac{f^2 - 2 r_\varepsilon h_{\min} + h_{\min}^2}{2 f \left(r_\varepsilon - h_{\min}\right)} \tag{2.2}$$

a po wykorzystaniu zależności na $h_{\min} = f(A_c, A_f)$ otrzymuje się wyrażenie [STO89]:

$$\cos \varepsilon_{P1} = \frac{f^2 - 2 r_\varepsilon r_n \left[1 - \frac{A_f / A_c}{\sqrt{1 + (A_f / A_c)^2}}\right] + r_n^2 \left[1 - \frac{A_f / A_c}{\sqrt{1 + (A_f / A_c)^2}}\right]^2}{2 f \left[r_\varepsilon - r_n \left(1 - \frac{A_f / A_c}{\sqrt{1 + (A_f / A_c)^2}}\right)\right]}. \tag{2.3}$$

gdzie:

A_c; A_f – tangensy kątów pochylenia funkcji w zależności F_c i $F_f = f(h)$,

Wyprowadzone wyrażenie jest analityczno - doświadczalnym opisem strefy skrawania nieswobodnego. Uwzględnia zarówno geometryczne, jak i fizyczne parametry procesu skrawania. Można się nim posługiwać przy ograniczonym zużyciu ostrza, gdy zmiany parametrów ostrza r_n i r_ε nie są zbyt duże, czyli gdy ostrze jest zużyte niezauważalnie z punktu widzenia zmian siły i temperatury skrawania. Z równania (2.3) wynikają następujące stwierdzenia [STO 89], [STO 06]:

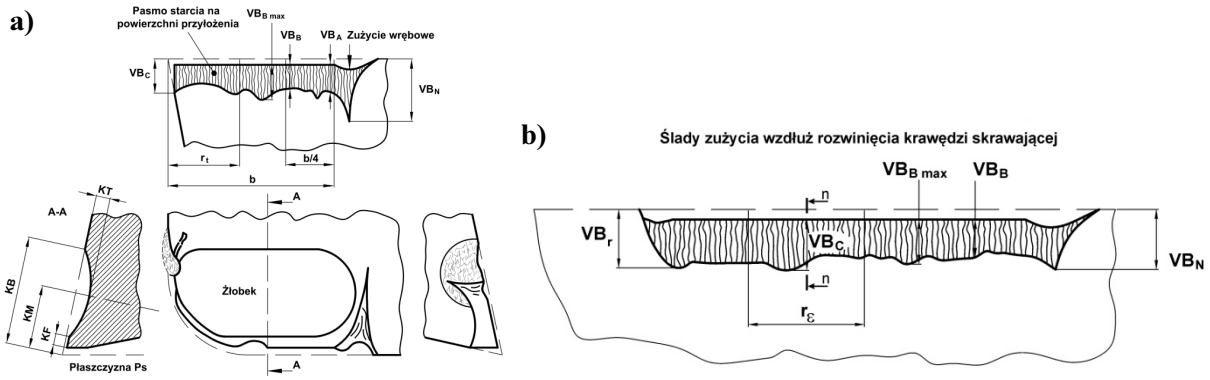
1. Położenie charakterystycznego punktu P_1, leżącego na wierzchołku naroża ostrza opisuje wyliczona wartość pomocniczego kąta ε_{P1}.

2. Położenie punktu P_1 zależy od wielkości geometrycznych i parametrycznych oraz od ilorazu współczynników kierunkowych A_c i A_f zależnych od właściwości materiału obrabianego, które z kolei zależą od wielu zmiennych procesu skrawania posuwu, prędkości skrawania, chłodziwa, temperatury itd., działających w danym momencie. Występujący w tym równaniu iloraz dla najczęściej skrawanych materiałów zawiera się w przedziale między zerem, a jednością i dlatego, że w przeważającej mierze analizowanych przypadków wartość A_c jest mniejsza niż A_f.
3. Punkt P_1 rozdziela warstwę przewidzianą do skrawania na dwie części:
   a) przechodzącą w wiór,
   b) pozostającą na powierzchni materiału obrabianego.

Trudne jest jednoznaczne określenie właściwego w każdym przypadku, granicznego momentu zastosowania przedstawionego modelu. Należy zwrócić uwagę na to, że dotyczy on krótkotrwałego, początkowego okresu pracy ostrza. Pojawienie się wyraźnych śladów zużycia powoduje tak istotne zmiany geometryczne naroża ostrza, że należałoby opracować odpowiedni, adekwatny model strefy skrawania.

2.1.2. Modelowanie zużycia dla pojedynczego ostrza

Wielkość zużycia na głównej powierzchni przyłożenia oraz na powierzchni natarcia ocenia się wykorzystując znormalizowane wskaźniki zużycia ostrza z normy ISO 3685. Przedstawione są na przykładzie ostrza tokarskiego [SZA 06], są wykorzystywane do opisywania zużycia we frezowaniu (rys. 2.2) [D'ER 97]. Na te wskaźniki powołuje się wielu autorów w pracach poświęconych pomiarom i badaniu zużycia ostrza [POR 91], [KOS 96], [GRZ 98], [STO 01], [CIC 06].



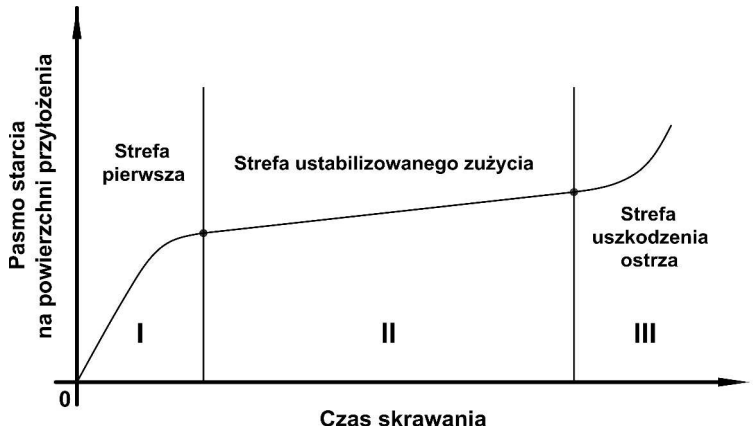
Rys. 2.2. Wskaźniki zużycia ostrza a) wg PN-ISO 3685, b) propozycja własna

Obowiązująca norma [PN-ISO 3685] (rys. 2.2a) nie przedstawia wszystkich ważnych i zaobserwowanych śladów na wierzchołku ostrza. Słabo także opisuje część aktywnej krawędzi skrawającej, co należy wyraźnie podkreślić, konstytuującej strukturę geometryczną powierzchni obrobionej. Zaproponowany na rysunku 2.2b własny obraz to syntetyczny widok zużycia od stron powierzchni przyłożenia roboczej części wierzchołka, która pozostając bezpośrednio w styku

z powierzchnią obrobioną, tworzy strukturę geometryczną. Na lewo od przekroju n-n dominuje tworzenie nierówności na powierzchni obrobionej, na prawo zaś widoczna część krawędzi skrawającej ma najważniejszy udział w tworzeniu wióra.

W czasie obróbki zużycie ostrza przebiega w sposób ciągły i charakteryzuje się przebiegiem nieliniowym. Ważnym zagadnieniem jest fakt określenia czasu dla podjęcia decyzji o wymianie ostrza.

Gdy ostrze zostanie wymienione zbyt wcześnie, to nie spełni swojego zadania, gdyż nie zostanie osiągnięte kryterium zużycia. Przedwczesna wymiana ostrza jest przyczyną nieekonomicznego wzrostu kosztów narzędziowych. Zwykle gdy ostrze przekracza przyjęte kryterium zużycia wpływa to na pogorszenie jakości wymiarowo - kształtowej oraz strukturę geometryczną powierzchni obrobionej [KOS 96]. Model opracowany przez Taylora [TAY 07] opisuje deterministyczną wartość zużycia dla zmiennych warunków obróbki [LIN 98], [CHA 06]. Zależność ta jest wciąż ulepszana i przybliża wyniki do rzeczywistych. W technice zrozumienie tego modelu doprowadziło do racjonalnego wykorzystania narzędzi w obszarze II, który w monitorowaniu jest najkorzystniejszy, o prawie liniowym przebiegu (rys.2.3)



Rys. 2.3. Typowa krzywa pasma starcia na ostrzu zależna od czasu skrawania według Lorenza [LI 06]

Okres I zużycie wstępne $0 < t < t_1$,

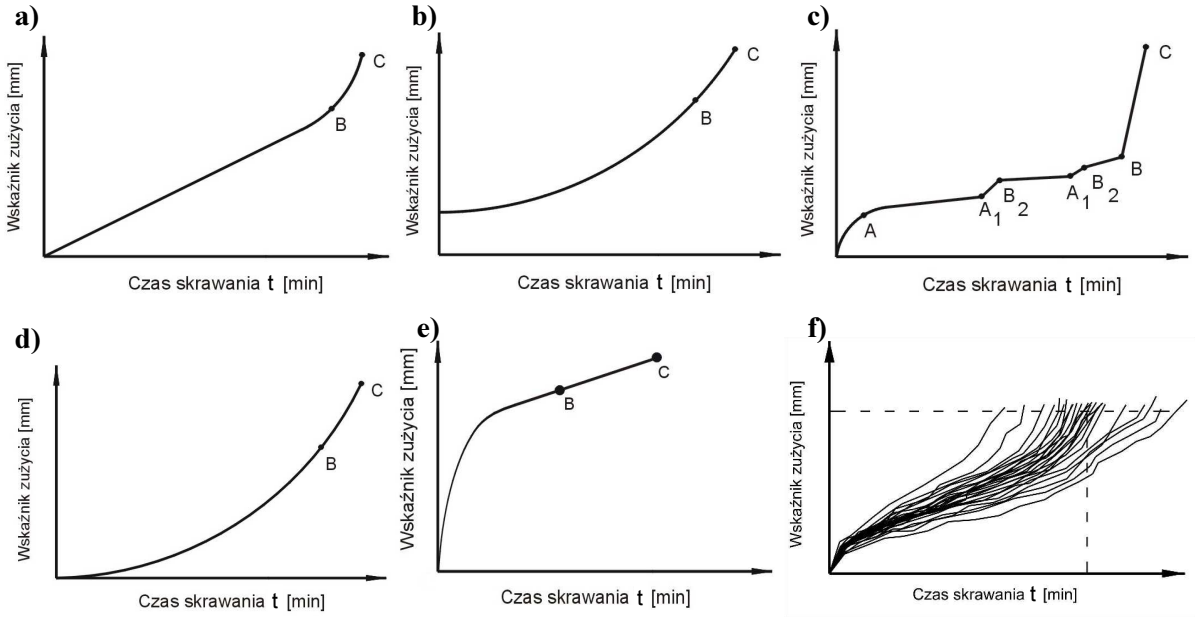
Okres II zużycie umiarkowane $t_1 < t < t_2$,

Okres III zużycie przyspieszone $t_2 < t$ do utraty zdolności skrawania [KAR 74].

Na strukturę geometryczną powierzchni obrobionej wpływa głównie oddziaływanie otoczenia naroża ostrza na materiał obrabiany. Przebiegi zużycia ostrza skrawającego można zapisać w funkcji czasu i sprowadzić do postaci krzywej Lorenza (rys. 2.3). Kształt tej krzywej podlega zmianom w zależności od doboru parametrów skrawania (rys. 2.4f), stosowanych płynów obróbkowych, właściwości plastycznych materiału obrabianego oraz właściwości i wytrzymałości narzędzi skrawających [GRZ 98], [STO 01], [STO 06], [GRZ 10].

Pierwszy okres (I) to stan „docierania" ostrza. W tej fazie przyrost powierzchni zużycia ostrza następuje bardzo szybko. Powodem tego są nierówności na ostrzu powstałe w procesie ostrzenia. W I przedziale

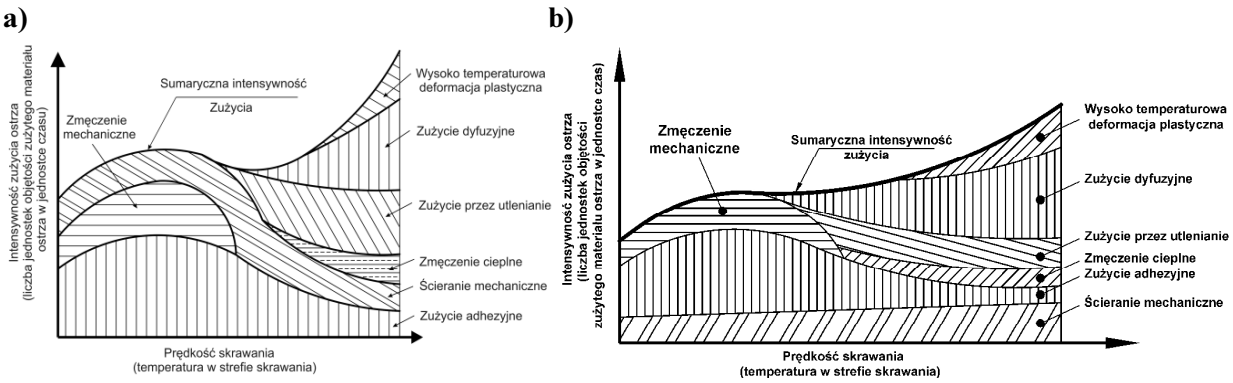
wartość zużycia ostrza jest niewielka i trudna do zarejestrowania, a które trwa do kilkudziesięciu sekund. Z reguły czas docierania nie może być pominięty. Zmiany wymiaru spowodowane przebiegiem nieliniowym, mogą powodować odchyłki wymiaru i jeśli mieszczą się one w polu tolerancji, to nie ma zagrożenia wadliwej produkcji. Drugi, najdłuższy okres (II) to stan ostrza o stopniowym, równomiernym i liniowym przebiegu zużycia. Trzeci okres (III) to stan ostrza, w którym następuje gwałtowny przyrost zużycia doprowadzający ostrze do wskaźników katastroficznych, a tym samym eliminacje narzędzia z pracy [GRZ 98], [GÓR 99], [STO 01], [STO 06], [CIC 06], [GRZ 10].



Rys. 2.4. Różne postacie przebiegów zużycia w funkcji czasu a), b), c), d), e), f)
[GRZ 98], [JEM 02], [JEM 04], [CIC 06], [GRZ 10]

Typowe przebiegi krzywych zużycia ostrza dla stali szybkotnących przedstawiono na rysunku 2.4a, b, d [GRZ 98]. Dla materiałów ceramicznych i supertwardych przebieg zużycia przedstawia rysunek 2.4e, natomiast dla węglików spiekanych i CBN rysunek 2.4c [CIC 06], [ŻUR 06 - 1], [ŻUR 06 - 2], [ŻUR 07].

W opisie modelu zużycia ostrza należy rozróżnić zjawiska fizyko-chemiczne występujące w czasie obróbki. Powszechnie znane są rodzaje zużycia mechanicznego, dyfuzyjnego, adhezyjnego, cieplnego i chemicznego, które podczas zużycia ostrza występują razem (rys. 2.5). Różnią się intensywnością oraz momentem wystąpienia w procesie skrawania. Zależą od materiału obrabianego, materiału narzędzia i parametrów skrawania [GRZ 98], [ŻEB 04], [GRZ 10].



Rys. 2.5. Dynamika elementarnych zjawisk mechanicznych, fizycznych i chemicznych w zależności od stanu termodynamicznego pod wpływem prędkości skrawania według:
a) Makarova [MAK 76], b) Storcha [STO 09]

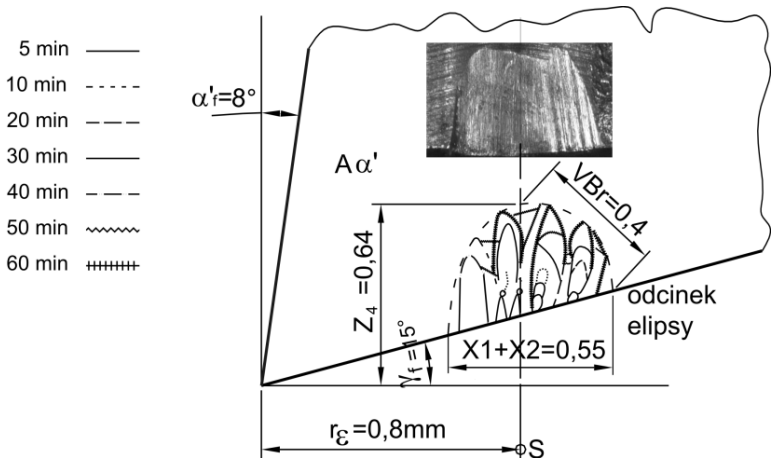
Interpretacje graficzne o charakterze jakościowym występowania odmiennych rodzajów zużycia przedstawiono na rysunku 2.5a,b. Prowadzone badania ujawniają, że podczas skrawania z podwyższonymi parametrami, zużycie ostrza przebiega znacznie szybciej. O ile styk i wynikające z tego ścieranie mechaniczne, to fizyczne zjawisko uwidocznione zarówno na wytarciu naroża ostrza i na powierzchni obrobionej, to pozostałe w większości przebiegają na poziomie atomowym, w warstwach zależnych w głównej mierze od temperatury skrawania w obszarze wierzchołka ostrza. Takie zużycia jak adhezja, dyfuzja czy utlenianie znajdują się w fazach badań teoretycznych i przyjętych hipotez przebiegu.

W pracy [STO 09] odmiennie zinterpretowano fizykalną cechę zużycia ostrza przedstawioną na rysunku 2.5b. Rozpatrując oddziaływanie powierzchni trących ostrza i materiału skrawanego, stwierdzono wzajemne oddziaływanie. Wytarcie na narożu ostrza jest skupione w ściśle określonym obszarze. Natomiast zjawisko tarcia w obszarze wzajemnego styku daje obraz nierówności, jak to pokazano na rysunku 2.6. W powiększeniu 50 - krotnym widoczne są narastające ślady wytarcia.

Nie dotyczy to wymiaru głębokości rysek, które są przynajmniej o rząd mniejsze. Nie ma to znaczenia dla rozważań, utrudniłoby jedynie zobrazowanie problemu metodą wykreślną.

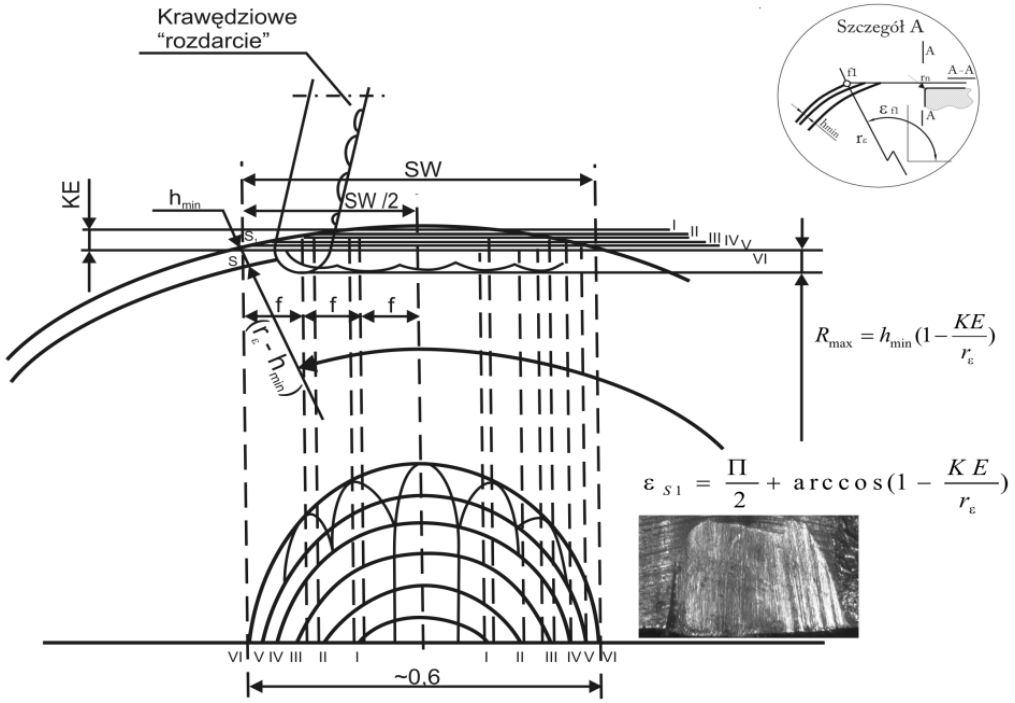
W przeprowadzonych badaniach na rzucie wykreślono zarejestrowane eksperymentalnie, odpowiadające kolejnym fazom zużycia krzywe elips wytarcia.

Obroty przedmiotu w równych odstępach posuwu f prowadzą do zetknięcia powstałej krawędzi „rozdarcia” z wytarciem widocznym na powierzchni przyłożenia naroża.



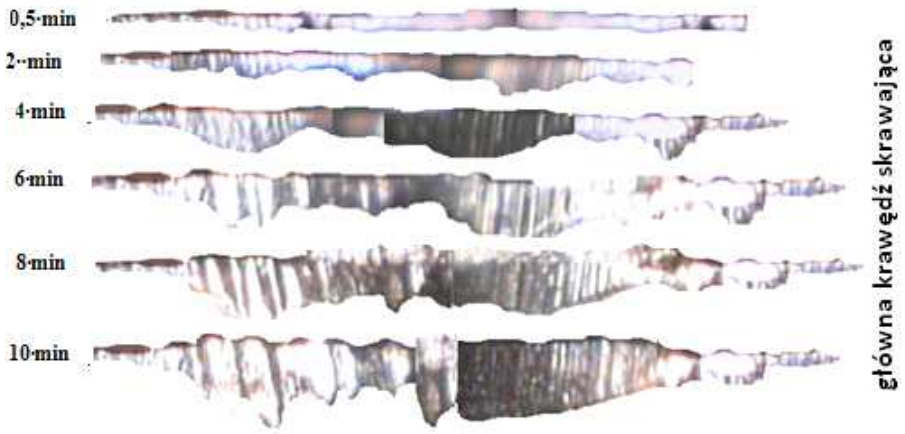
Rys. 2.6. Ślady zużycia na powierzchni przyłożenia naroża w 50 - krotnym powiększeniu [STO 89], [STO 06], [STO 09]

W przykładowych punktach oznaczonych na rysunku 2.7 jako od *1* do *N*, przedstawiono ten mechanizm skracania o kolejne warstwy oznaczone jako *KE*. Stosownie do tego założenia na kolejnych elipsach, oznaczonych od I do VI, wrysowano położenie rys linią przerywaną. Rysy te, w miarę upływu czasu skrawania, w sposób nieuporządkowany ulegają wydłużeniu wraz z powiększaniem się rozmiarów wycinka elipsy. Nakładające się ślady wycierają i spłycają te, które powstały w fazie poprzedzającej. Usuwana jest warstwa i zmienia się ukształtowanie powierzchni wytarcia z fazy poprzedzającej na obwiednię nowych elips wytarcia. W wyniku tego na obserwowanej powierzchni zużycia powstają rysy o stałej w przybliżeniu głębokości. Porównywanie otrzymanych z badań danych z wyliczonymi dowiodło, że wszystkie ślady narastającego zużycia mieszczą się w obszarze wyznaczonym analitycznie (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Obraz śladów wytarcia na ostrzu [STO 89], [STO 06], [STO 09]

Im szersze jest wytarcie *SW*, tym większy jest wpływ tego wzajemnego oddziaływania. Przy niezmiennych wymiarach geometrycznych wierzchołka ostrza, obraz śladu wytarcia na powierzchni przyłożenia w otoczeniu naroża zależy od posuwu. Widoczne na rysunku 2.7 ślady, w zależności od posuwu mniejszego czy większego, różnią się liczbą żłobków i ich wielkością. Mechanika ich powstawania jest analogiczna, a przedstawiony mechanizm tłumaczy również i to, że długość wytarcia *SW* jest zawsze iloczynem posuwu i liczby widocznych śladów.



Rys. 2.8. Zestawienie śladów wytarcia w rozwinięciu wzdłuż zaokrąglenia naroża ostrza dla różnych czasów skrawania [STO 09]

Zmierzone w narastającym czasie skrawania ślady wytarcia wykazują powiększanie wymiarów wytarcia co przykładowo przedstawiono na rysunku 2.8 [STO 09].

2.1.3. Model tworzenia nierówności za pomocą pojedynczego ostrza

Rozwijające się ślady zużycia ostrza wywołują stosowne zmiany w topografii powierzchni obrobionej.

W jednej z prac [STO 09] uogólniono mechanizm tworzenia nierówności, dzięki obserwacjom śladów zużycia, szczególnie pomocniczej powierzchni przyłożenia w otoczeniu naroża ostrza.

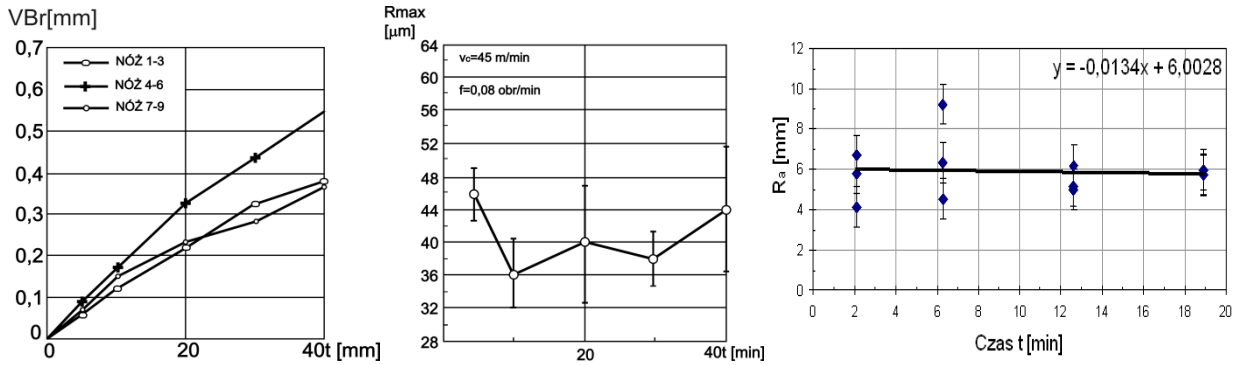
W wyniku przytoczonych zjawisk stykowych z podrozdziału 2.1.1, obraz powierzchni jest wyraźnie zróżnicowany i nieuporządkowany. O wynikowym kształcie struktury geometrycznej powierzchni obrobionej decyduje bardzo złożony mechanizm współpracy części zużytego naroża ostrza z nowo utworzoną powierzchnią, a które w każdej chwili wzajemnie siebie tworzą i zmieniają. Zachodzi tu sprzężenie zwrotne.

Pomiar nierówności za pomocą parametrów chropowatości *Ra*, *Rz* i innych, które w swej postaci są jedynie wyrażeniami matematycznymi o charakterze statystycznym, nie pozwalają jednoznacznie ocenić struktury powierzchni. Tym bardziej, że o zmianach na ostrzu decydują różnorakie procesy zależne od temperatury w skrawaniu [KAC 01].

Dla takich samych parametrów *Ra*, *Rz* obserwuje się zupełnie różne obrazy utworzonej powierzchni. To zainspirowało badaczy do wyjaśnienia w części fizycznej mechanizmu tworzenia powierzchni

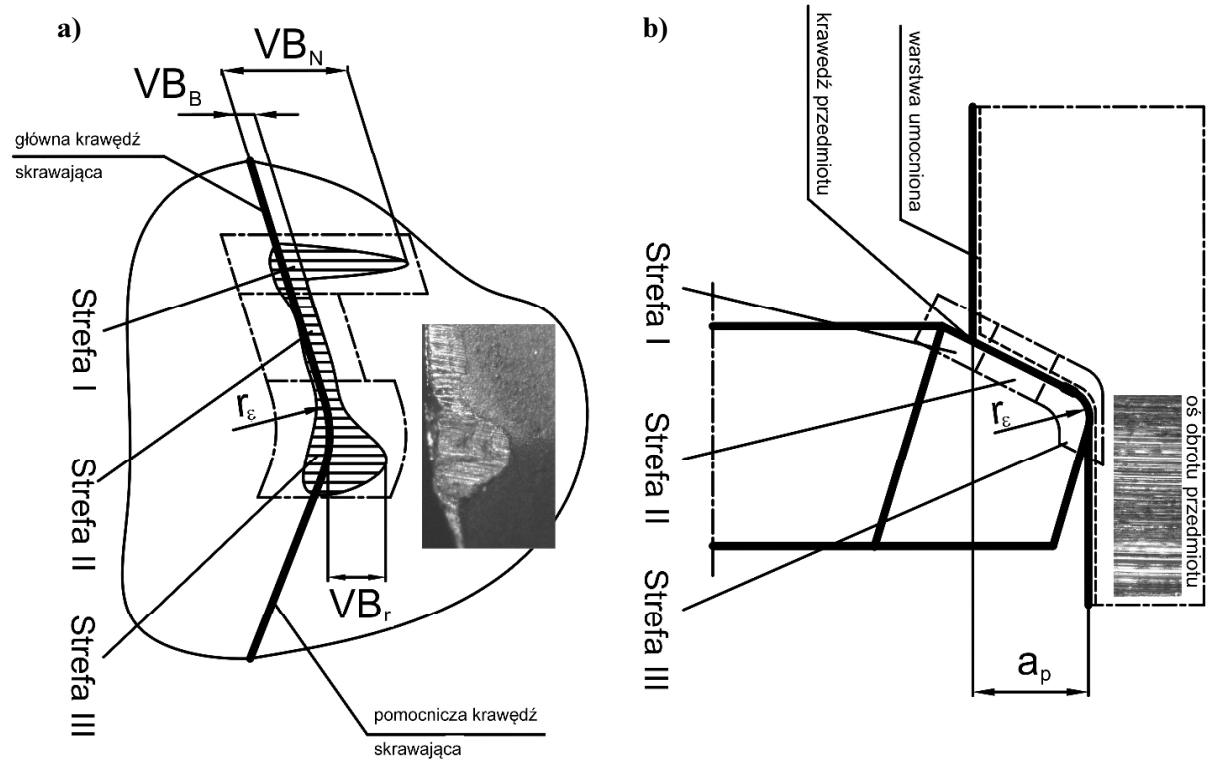
obrobionych, które w sposób jednoznaczny identyfikują strukturę stereometryczną tworzonej powierzchni.

Jeżeli prześledzi się przykładowe wyniki badań tworzenia chropowatości na powierzchni obrobionej oraz przebieg zużycia naroża ostrza, to po tym samym czasie skrawania otrzymuje się przebiegi jak na rysunku 2.9.



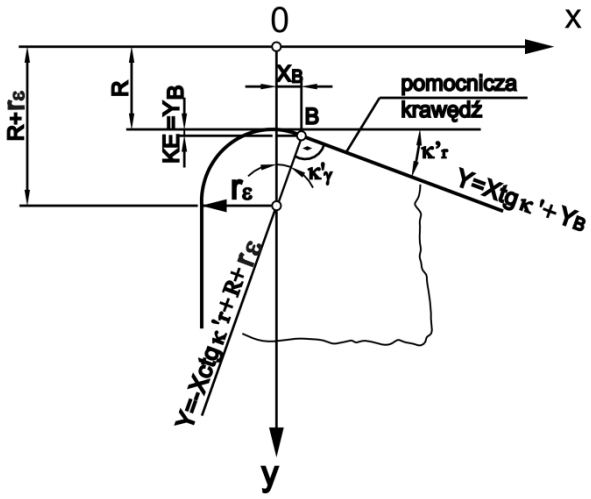
Rys. 2.9. Przykładowe zmiany VB_r i parametrów *Rmax* i *Ra*, w funkcji czasu skrawania [STO 09]

Parametr chropowatości *Rmax*, o prawie liniowych przebiegach zużycia w zależności od czasu skrawania, nie jest w wyraźny sposób skorelowany z VB_r. Zmiany VB_r – wytarcia na powierzchni przyłożenia nie mają większego lub żadnego związku ze zmianą *Rmax* i *Ra* nierówności [STO 09].



Rys. 2.10. Ślady na a) powierzchni przyłożenia wierzchołka ostrza i b) powierzchni obrobionej [STO 89], [STO 06], [STO 09]

Badania zużycia ostrza z promieniem zaokrąglenia r_ε uwidoczniają ślady na powierzchni obrobionej przedmiotu i powierzchni przyłożenia w otoczeniu naroża ostrza, co pokazano na rysunku 2.10.
Modelowanie zjawiska tworzenia nierówności powierzchni obrobionej rozpoczęto od opisu mechanizmów na powierzchni przyłożenia ostrza w otoczeniu naroża ostrza.



Rys. 2.11. Model strefy wierzchołka ostrza [STO 89], [STO 06], [STO 09]

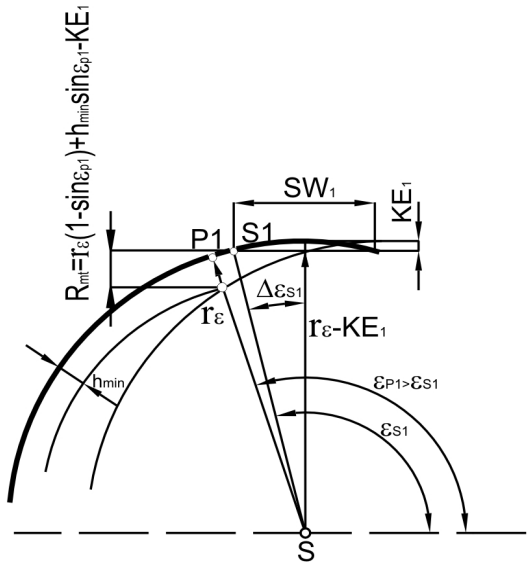
Na przykład: dla wałka o średnicy D = 100 mm, promienia zaokrąglenia wierzchołka r_ε = 1 mm i dla przyjętej wartości zużycia VB_r = 0,4 mm, obliczono z odpowiednich równań [STO 89] współrzędne punktów charakterystycznych (rys. 2.11). Otrzymano skrócenie: KE = 0,036 mm, a szerokość wytarcia SW = 0,55 mm, które pojawia się niemal natychmiast, po kilku sekundach od rozpoczęcia skrawania. Bardzo szerokie wytarcie SW = 0,55 mm, jest wielokrotnie większe od posuwów z przedziału 0,04 - 0,2 mm/obr., właściwego dla obróbki wykończeniowej.

Dla wymienionych posuwów musi nastąpić ponowne (od około 2 do około 7 krotnego) zetknięcie naroża ostrza z nowoutworzonymi nierównościami na powierzchni obrobionej. Głębokość skrawania nie ma znaczenia w tym mechanizmie.

Bez wątpliwości powierzchnia wytarcia w otoczeniu naroża przesuwa się z rosnącym skróceniem KE, a wysokość nierówności Rz, pozostaje niezmienna.

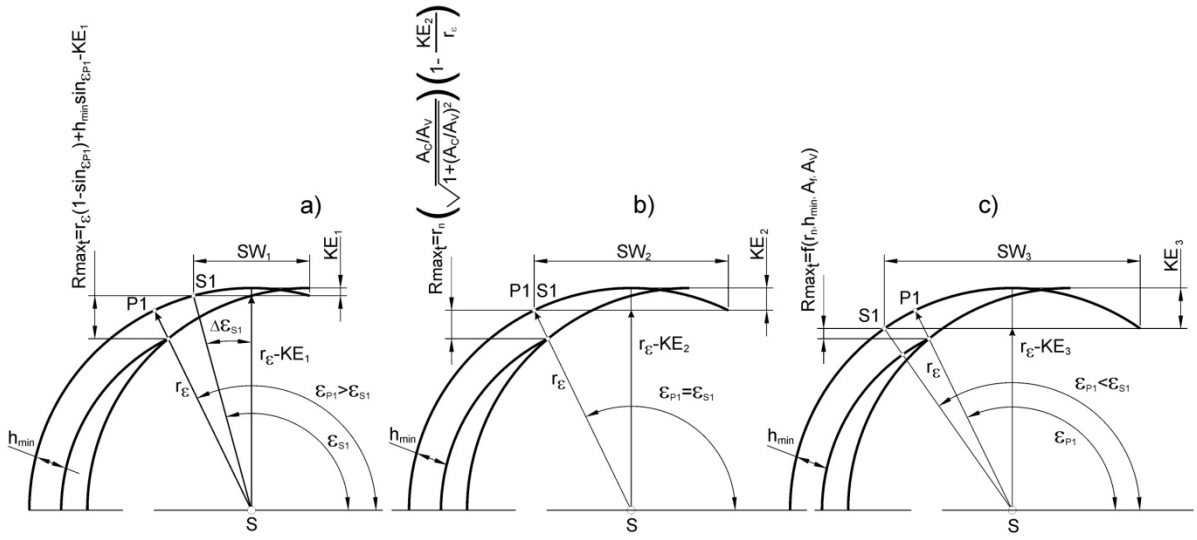
Znamienne jest jednak to, że zaobserwowano trzy różne tendencje zmian parametrów profilu chropowatości przedmiotu w zależności od czasu skrawania:

- w I okresie, gdy $\varepsilon_{S1} < \varepsilon_{P1}$ (rys. 2.12) parametr chropowatości $Rmax$ maleje od wartości odpowiadającej nowemu ostrzu do innej wartości charakterystycznej – okres pomijalny, bardzo krótko trwający, do kilku sekund,
- w II okresie $\varepsilon_{S1} = \varepsilon_{P1}$ – z wyraźnymi wahaniami – wartości parametrów chropowatości utrzymują się w określonym przedziale - to najbardziej stabilny okres,
- w III gdy $\varepsilon_{S1} > \varepsilon_{P1}$ to następuje wyraźny wzrost chropowatości, aż do momentu zniszczenia ostrza.



Rys. 2.12. Składowe teoretycznej nierówności w obszarze zużycia w otoczeniu naroża ostrza [STO 09]

Od tych ogólnych prawidłowości obserwuje się więc pewne odstępstwa tylko w III okresie. Na rysunku 2.12 pokazano, że punkt *S1* przesuwa się w kierunku posuwu w sposób ciągły i na długości wytarcia *SW* styk z umocnioną krawędzią odbywa się z okresem równym posuwowi *f*. Odcinki skrajne – pierwszy z lewej i ostatni z prawej – są "przerysowane" przez krawędź rozdarcia tylko raz. Te zaś, które znajdują się bliżej środka symetrii ostrza, są "przerysowywane" wielokrotnie. Świadczy to, że topografia pomocniczej powierzchni przyłożenia konstytuuje się w sposób ciągły.

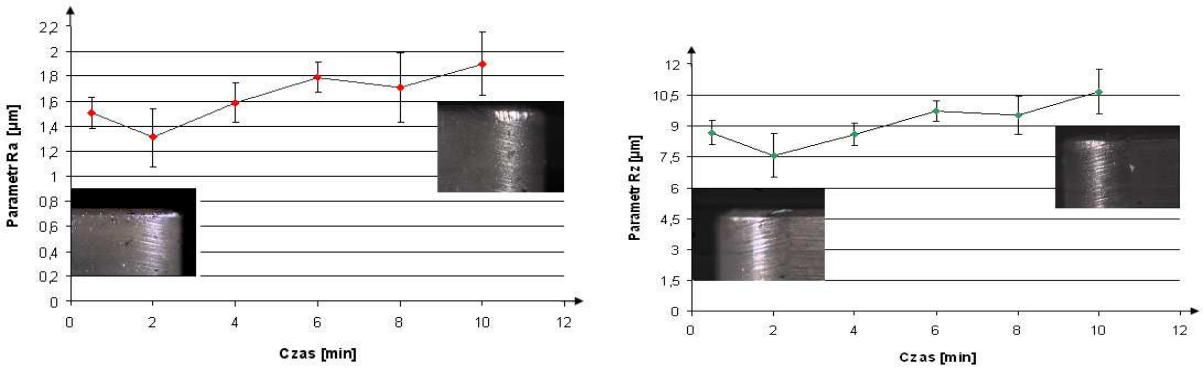


Rys. 2.13. Schematy do obliczenia teoretycznych wysokości nierówności [STO 89], [STO 09]

Związki pomiędzy teoretyczną wysokością nierówności, a postępującym zużyciem wypisano na rysunku 2.13.

Brak właściwej interpretacji mechanizmu tworzenia nierówności powstrzymuje wielu Autorów do zamieszczania zależności parametrów chropowatości od czasu lub drogi skrawania.

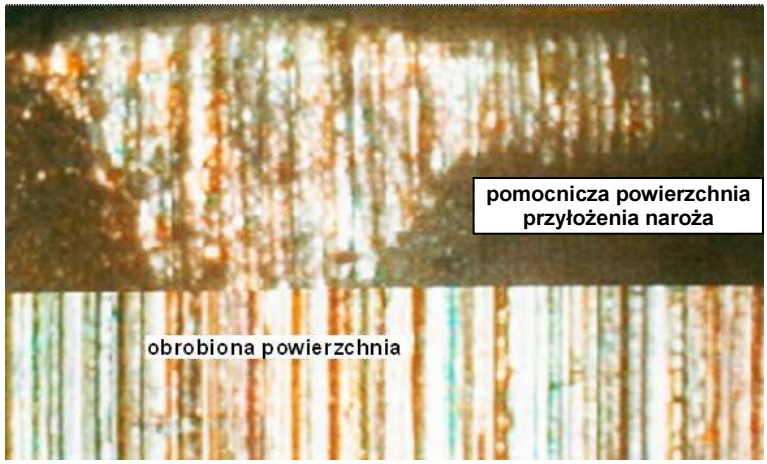
Maksymalne dopuszczalne wartości zużycia na narożu mieszczą się do 1 mm. Wytarcie na powierzchni przyłożenia w otoczeniu naroża ostrza tokarskiego są małe, a ślady rozmieszczone są na zaokrąglonej powierzchni walcowej o promieniu r_ε.



Rys. 2.14. Wartość parametru *Ra* i *Rz* chropowatości powierzchni obrobionej w funkcji czasu skrawania [STO 09]

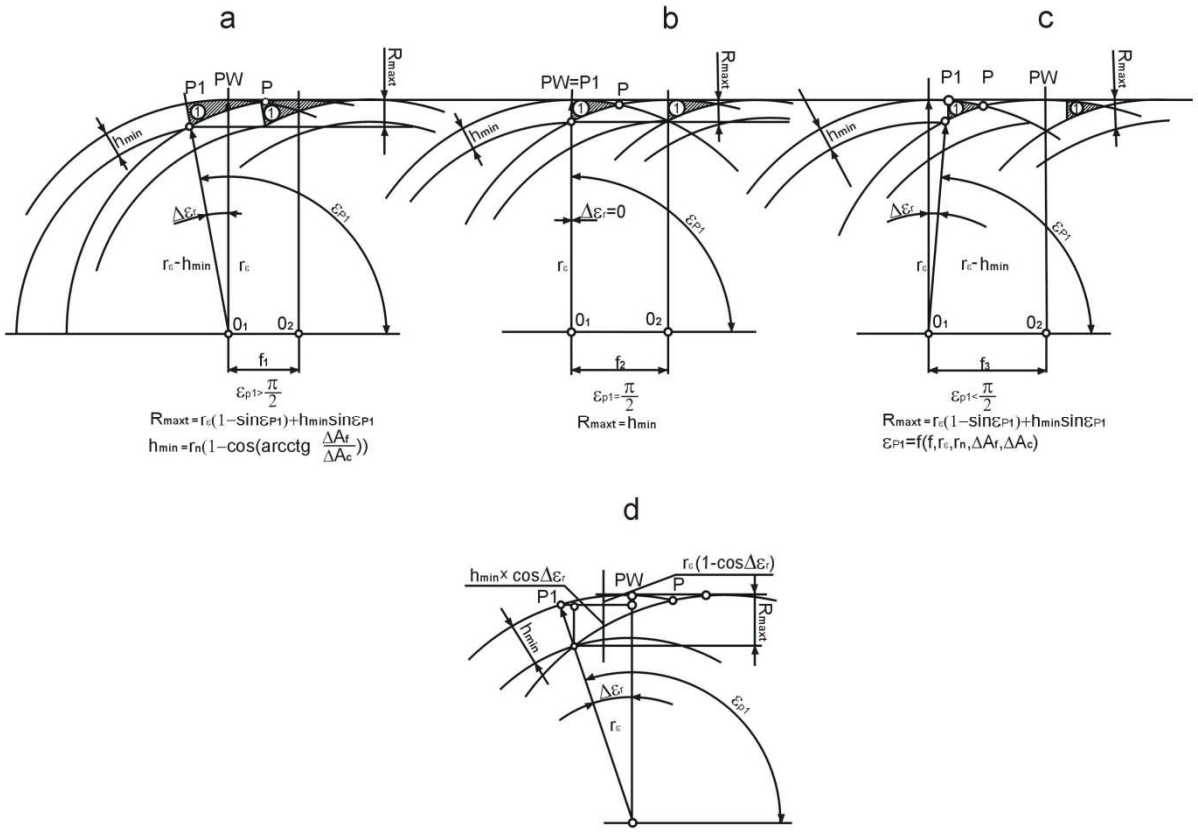
Przykładowe przebiegi i fotografie z badań zużycia pokazano na rysunku 2.14. Należy zwrócić uwagę na fakt, że metodą optyczną uwidacznia się znacznie więcej szczegółów niż przez zapis *2D* lub *3D* na profilometrach.

W wyniku przytoczonych zjawisk stykowych, obraz tej powierzchni jest wyraźnie zróżnicowany i nieuporządkowany. O wynikowym kształcie stereometrycznym powierzchni obrobionej decyduje bardzo złożony mechanizm współpracy części zużytego naroża ostrza z nowo utworzoną powierzchnią, a które w każdej chwili wzajemnie siebie tworzą i zmieniają.



Rys. 2.15. Złożenie obrazu nierówności wytarcia na narożu ostrza oraz odpowiednich nierówności na powierzchni obrobionej [STO 06], [STO 09]

Na rysunku 2.15, na którym złożono obraz zużycia naroża z obrazem wycinka powierzchni obrobionej, widoczne jest podobieństwo zaobserwowanych obrazów, które zebrano przy jednoczesnym oświetlaniu dwoma barwnymi wiązkami światła – niebieską i czerwoną.



Rys. 2.16. Pomocnicze schematy dla wyznaczenia wysokości nierówności [STO 89], [STO 06]

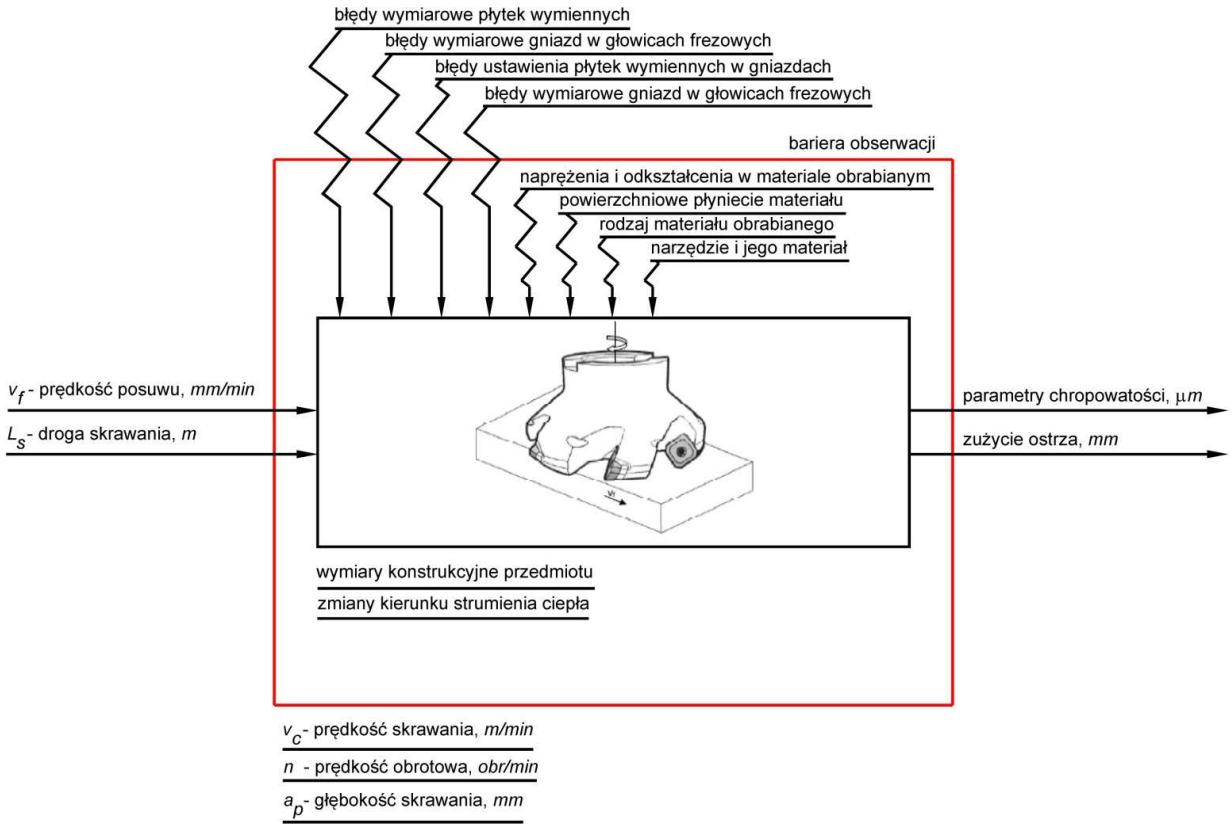
Podczas skrawania ostrzem o zdefiniowanej geometrii istotny wpływ na chropowatość powierzchni posiada promień krawędzi skrawającej r_n. Aby nastąpił proces oddzielenia części materiału musi zostać spełniony warunek minimalnej warstwy skrawanej h_{min}, który jest ułamkiem promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n (rys. 2.16 i 2.17) [STO 89], [STO 06].

2.2. Skrawanie narzędziami wieloostrzowymi

Proces frezowania rozpatrzono jako obiekt badań z dwiema zmiennymi wejściowymi, prędkością posuwu v_f i drogą skrawania L_s oraz wyjściowymi parametrami chropowatości, zużycie ostrza (rys. 2.17).

W opisie układu rzeczywistego uwzględniono wielkości stałe nieobserwowalne i zakłócenia nieobserwowalne i niemierzalne oznaczone wektorem o module łamanym, które znajdują się miedzy barierą obserwacji, a obiektem badań.

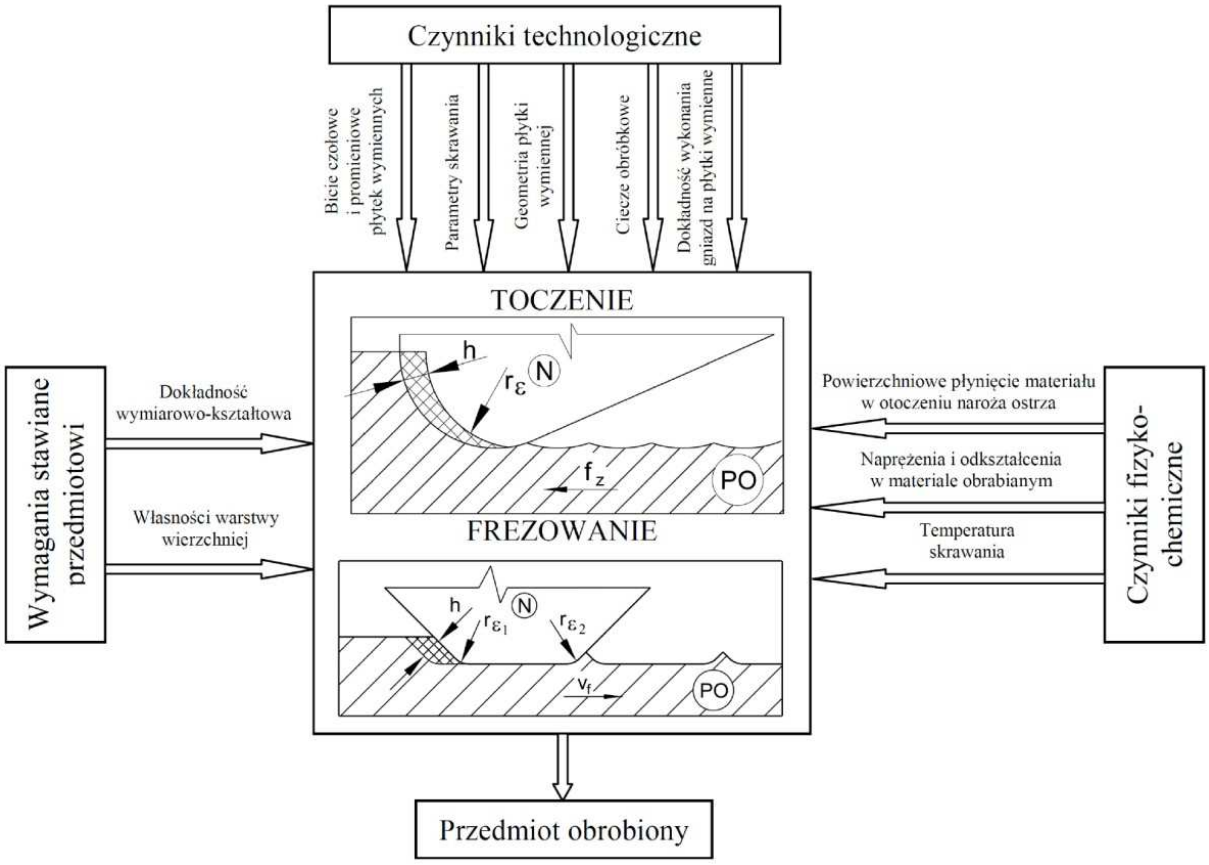
Wielkości stałe obserwowalne oraz zakłócenia mierzalne i niesterowalne opisano jako założenia poza barierą obserwacji.



Rys. 2.17. Model frezowania wejścia/wyjścia z czynnikmi zmiennymi, stałymi i zakłóceniami

Podczas frezowania występuje powtarzalność, zależna od liczby ostrzy, zjawisk fizycznych i chemicznych zachodzących miedzy ostrzem skrawającym, a powierzchnią obrabianą (rys. 2.18).

Widoczne jest, że na jakość powierzchni po frezowaniu, wpływają te same czynniki, które są zauważalne w zjawiskach towarzyszących podczas pracy pojedynczego ostrza.



Rys. 2.18. Czynniki wpływające na jakość powierzchni obrobionej podczas frezowania

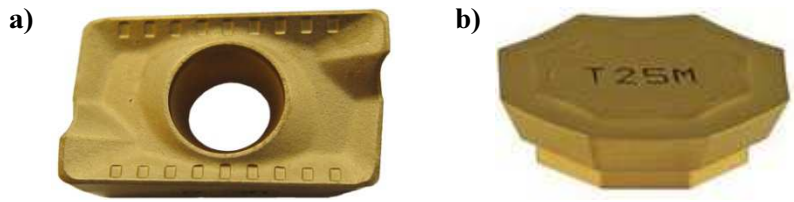
Skutkiem oddziaływań czynników modelowania (rys. 2.17), stanu fizycznego warstwy pod ostrzem (rys. 2.18), jest tworzenie struktury geometrycznej powierzchni, przy czym trudno o jednoznaczne wyróżnienie tych, od których zmiennych to zależy.

Coraz bogatsza rodzina frezów, wprowadza nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe na narzędzia [CIC 06]. Związane to jest także z istotną modyfikacją geometrii ostrza.

Modyfikacji podlegają:

- powierzchnie natarcia A_γ ostrza do lepszego odprowadzania wióra podczas obróbki,
- promienie zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n,
- pomocnicze powierzchnie przyłożenia ostrza κ' [MEL 91], [MIL 06], [CIC 06], [OLS 08].

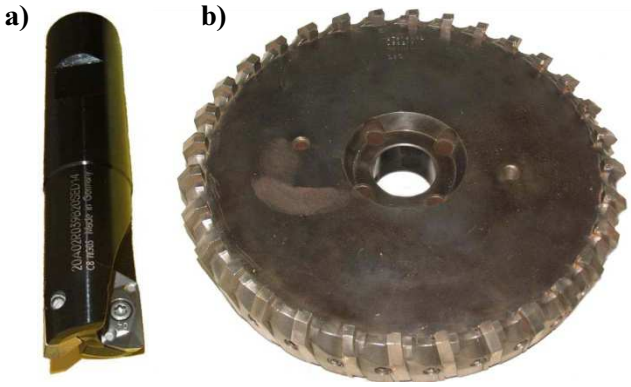
Głowice frezowe to narzędzia wieloostrzowe, a płytki wymienne mają od 2 do 8 krawędzi skrawających oraz wieloboczną geometrię na narożach w postaci faz lub ścięć (rys. 2.19).



Rys. 2.19. Płytki wymienne z ostrzami a) dwoma i b) ośmioma

Charakterystyczną cechą geometryczną takich płytek jest przejściowa pomocnicza krawędź skrawająca zwana dogładzającą, która jest kilkakrotnie dłuższa od wartości posuwu na ostrze. Rzadko wykorzystuje się płytki o zaokrąglonym narożu r_ε chyba, że podczas skrawania wymagana jest duża wytrzymałość [CIC 06].

W narzędziach o zmodyfikowanej krawędzi i powierzchni przyłożenia przez fazki lub ścięcia, które są o długości kilkakrotnie większej niż posuw na ostrze powoduje, że kolejne ostrza zagładzają ślady pochodzące ze styku poprzedzających. Liczba płytek wymiennych występujących w narzędziu może być od dwóch do kilkudziesięciu (rys. 2.20).



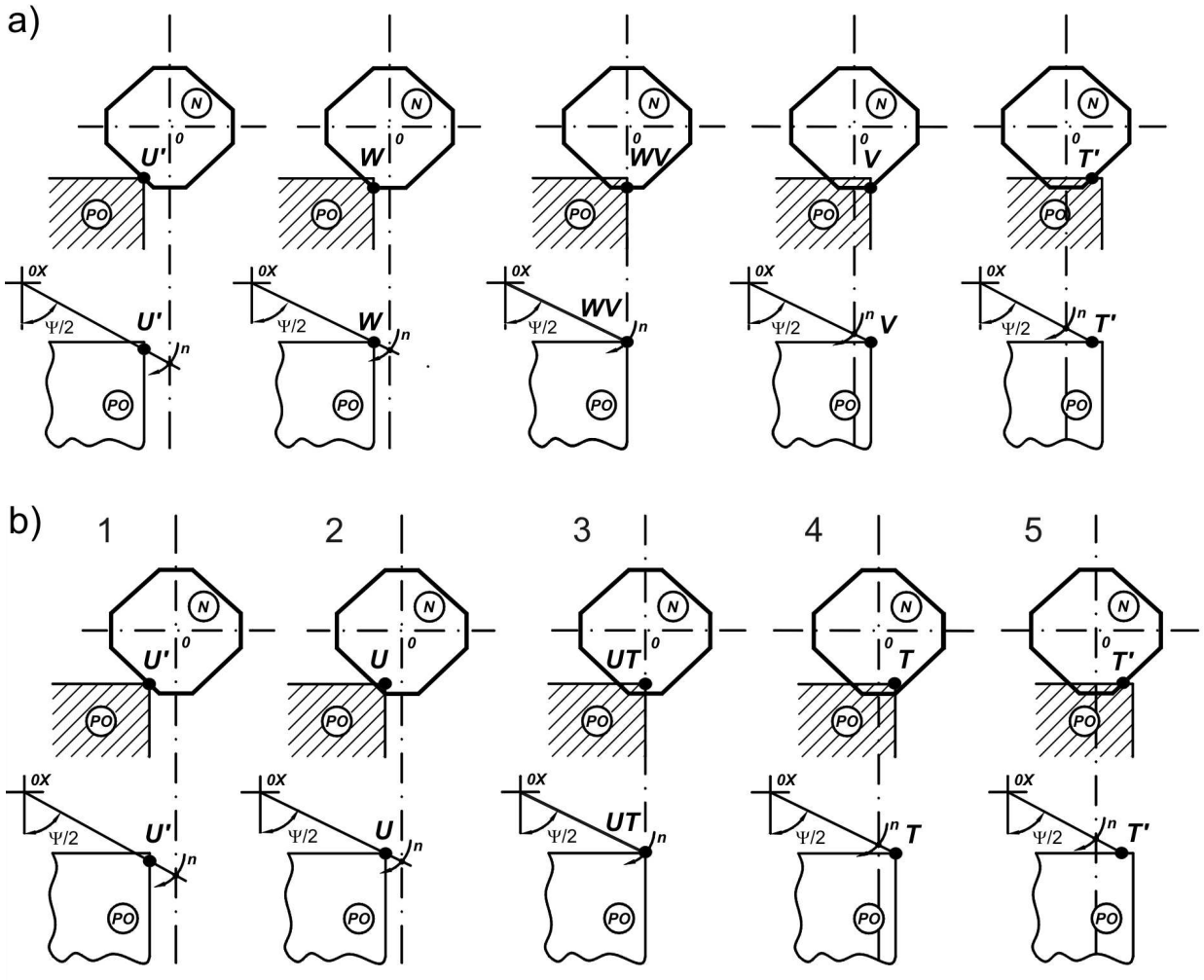
Rys. 2.20. Głowice frezowe z liczbą ostrzy a) 2 i b) 32

W narzędziach składanych wieloostrzowych, z dużą liczbą ostrzy, takich jak głowice frezowe, występuje bicie czołowe płytek wymiennych. Skutkuje to tym, że krawędzie ostrzy nie są ustawione na jednej płaszczyźnie. Ustawienie płytek w głowicy frezowej nasuwa spostrzeżenie, że praca każdej z nich jest odmienna. W przypadku, gdy ostrza są w jakikolwiek sposób modyfikowane, należy oczekiwać, że ich zachowanie podczas pracy nie poddaje się uogólnionemu opisowi.

Obserwowane różnorodne zużycie w otoczeniu naroża powoduje, że powstająca powierzchnia tworzona jest przez najbardziej wysuniętą płytkę [ŻUR 06-1]. W konsekwencji monitorowaniu powinny być poddane wszystkie pracujące naroża ostrzy i niewiele danych dostarczy obserwowanie tylko wybranego fragmentu naroża.

2.2.1. Uogólnienie warunków pracy ostrza głowicy frezowej

Położenia punktów rozpoczynania pracy przez ostrze skrawające są zmienne i zależą od szerokości obrabianego materiału, średnicy głowicy frezowej, kąta natarcia oraz odmiany frezowania. Cecha ta, określana jest jako kontakt ostrza skrawającego z materiałem obrabianym w momencie rozpoczynania skrawania. Nazywane jest to charakterem uderzenia [KUN 69].



Rys. 2.21. Rozpoczynanie pracy ostrza płytki wymiennej dla a) dodatniego kąta natarcia γ_n, b) ujemnego kąta natarcia γ_n [ŻUR 05]

Z analizy modeli, widoczne jest, że rozpoczynanie pracy możliwe jest w sposób punktowy. Modele rozpatrzono dla dodatniego i ujemnego kąta natarcia γ_n. Praca ostrza następuje pomocniczą krawędzią skrawającą w punkcie *U'* (rys. 2.21a1, 2.21b1). Przypadek ten jest charakterystyczny dla frezowania symetrycznego niepełnego, niesymetrycznego niepełnego lub wtedy, gdy szerokość materiału obrabianego jest mniejsza od średnicy głowicy frezowej. W punkcie *T'* rozpoczynanie pracy przez ostrze skrawające następuje na głównej krawędzi skrawającej κ i takie warunki będą przy frezowaniu symetrycznym pełnym. Kolejnym sposobem rozpoczynania pracy przez ostrze skrawające jest działanie bezpośrednie tylko naroży *W* i *V* płytki wymiennej na materiał obrabiany (rys. 2.21a2, 2.21a4). Rozpoczynanie pracy przez ostrze odbywa się z udziałem krawędzi dogładzającej b_s, czyli dla punktu *WV*, leżącego na osi symetrii płytki wymiennej (rys. 2.21a3). Rozpatrując przypadki *U*, *UT*, *T* można stwierdzić, że pierwszy kontakt z materiałem obrabianym będzie odbywał się z udziałem powierzchni natarcia A_γ.

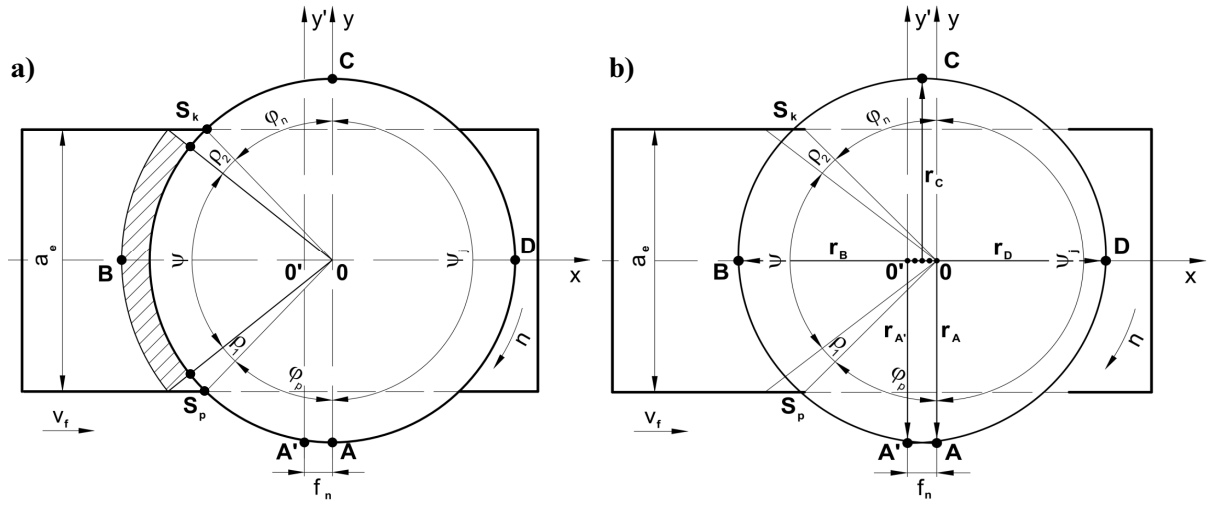
Współcześnie głowice frezowe wyposażone są coraz częściej w płytki z modyfikacjami w otoczeniu naroża i dla każdego przypadku frezowania, ustawienie ich w gniazdach głowicy można wyznaczyć

położenie punktu rozpoczęcia pracy jak to pokazano na rysunku 2.21.

Znane opisy rozpoczynania pracy ostrzy nie uwzględniają jednak żadnych modyfikacji w otoczeniu wierzchołka ostrza. Wiadomo także, że podczas frezowania praca każdego z ostrzy ma przerywany charakter i obserwowane ślady zużycia mogą uwidaczniać się na jego powierzchniach roboczych.

Zależności kinematyczne

Ostrze narzędzia wieloostrzowego podczas pracy zmienia położenie względem osi OX i jednocześnie wykonuje ruch obrotowy wokół osi OZ (rys. 2.22a). Sprawia to, że ostrze wędruje po linii spiralnej (po cykloidzie wydłużonej) wynikającej z prędkości posuwu v_f przedmiotu obrabianego [ŻUR 05].

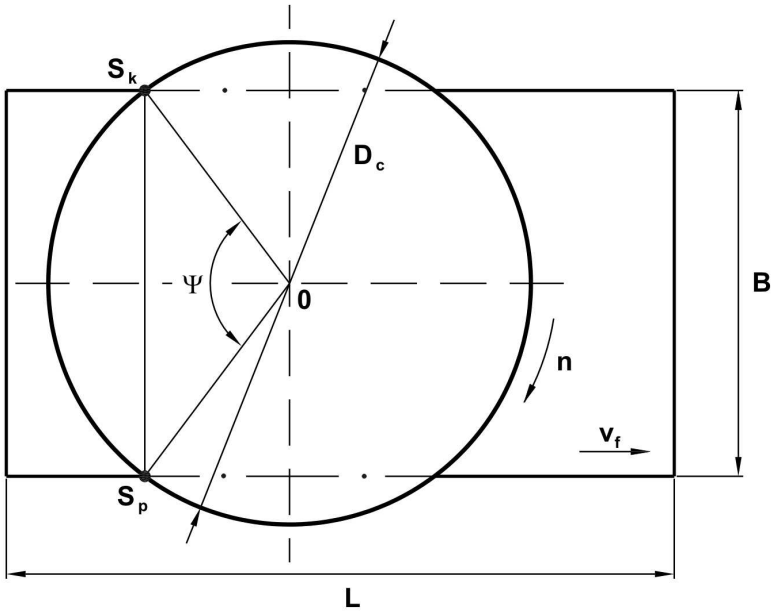


Rys. 2.22. a) Położenia charakterystycznych punktów ostrza w ruchu głowicy, b) geometria ruchu ostrza [ŻUR 05]

Położenie punktu *A*, naroża jednego z ostrzy poruszającego się po linii spiralnej (rys. 2.22b) przy zachowaniu posuwu o wartość f_n, przemieszcza się do położenia *A'* po wycinku spirali zachowując stały promień *r* głowicy. Kąt obrotu powoduje, że położenie ostrza osiąga punkt S_p zawarty pomiędzy kątem dobiegu φ_p, a osią *OY*. W punkcie S_p rozpoczyna się praca ostrza. Następne położenie ostrza, przy ustalonym promieniu głowicy, wzdłuż osi *OX*, przypada w punkcie *B*, czyli po przesunięciu osi głowicy o 1/4 f_n. W punkcie *B* ostrze skrawa maksymalną grubość warstwy $h_{max.}$. W punkcie S_k kończy się proces skrawania i ostrze rozpoczyna swobodny ruch aż do punktu S_p. Gdy głowica przemieści się o 2/4 f_n wzdłuż osi *OX*, ostrze znajdzie się w punkcie *C*. Położenie głowicy w punkcie *D* następuje po jej przemieszczeniu wzdłuż osi *OX* o 3/4 f_n. Po przejściu wzdłuż trajektorii, przez punkty *A*; S_p; *B*; S_k; *C*; *D*, deklinacja ostrza znajdzie się w położeniu *A'*, gdzie rozpoczyna się skrawanie kolejnej warstwy.
Współrzędne punktów *A* i *A'*, w których ostrze rozpoczyna i kończy pracę, są ujemne i przesunięte o wartość f_n na osi OX. Wynika to z przyjętego układu współrzędnych, gdzie *A'* to początkowe położenie następnej trajektorii ostrza [ŻUR 05]

Rzeczywista droga skrawania L_s pojedynczego ostrza

Kolejnym nie opisanym i pomijanym zagadnieniem w ocenie zużycia ostrza w narzędziach wieloostrzowych jest czas kontaktu ostrza z materiałem obrabianym. Praca ostrzy charakteryzuje się tym, że styk każdego z nich z powierzchnią skrawania zależy od kąta styku Ψ zawartego pomiędzy punktami *0*, S_p – skrawania początkowego i *0*, S_k – skrawania końcowego. Wartość tego kąta zmienia się w zakresie od 0° do 180° i zależy od szerokości frezowanego materiału B oraz średnicy narzędzia D_c (rys. 2.23).



Rys. 2.23. Rysunek pomocniczy do wyznaczenia kąta styku Ψ z trójkąta $0S_pS_k$ w zależności od średnicy narzędzia wieloostrzowego i szerokości materiału obrabianego

Kąt styku Ψ ostrza z powierzchnią przedmiotu oblicza się z równania (2.4) [FIL 00].

$$\sin\frac{\psi}{2}=\frac{B}{D_c},\quad mm \tag{2.4}$$

gdzie: B – szerokość materiału obrabianego [mm]

D_c – średnica narzędzia [mm]

Z wyrażenia na obliczenie czasu maszynowego t_m dla frezowania wyznaczono przemieszczenie materiału obrabianego względem ruchu obrotowego narzędzia.

$$t_m=\frac{L}{v_f},\quad \min \tag{2.5}$$

gdzie: L – długość materiału obrabianego [mm]

v_f – prędkość posuwu [mm/min]

W wyrażeniu tym (2.5) brak jest informacji o czasie styku ostrza z materiałem obrabianym, który jest niezbędny do wyznaczenia zużycia ostrza.

Po rozwinięciu równania (2.5) i podstawieniu nowych zmiennych z wyrażenia (2.4) obliczono drogę skrawania L_s wyrażoną w metrach.

$$L_s = \frac{\pi \cdot \psi \cdot D_c \cdot L}{1000 \cdot 360^\circ \cdot f_z \cdot z}, \quad m \tag{2.6}$$

gdzie: Ψ – kąt styku [°]

D_c – średnica narzędzia [mm]

L – długość materiału obrabianego [mm]

f_z – posuw na ostrze [mm/ostrze]

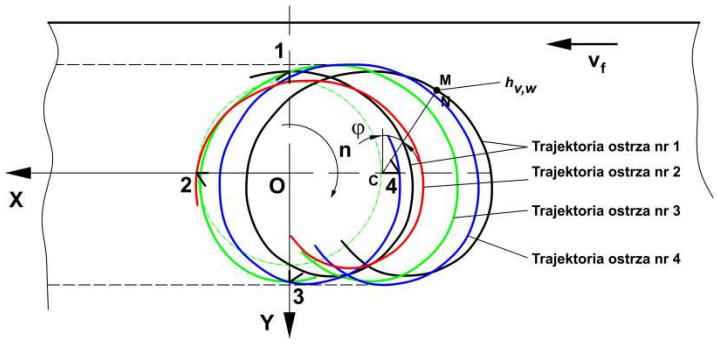
z – liczba ostrzy w narzędziu

2.2.2. Model pracy ostrza narzędzi wieloostrzowych

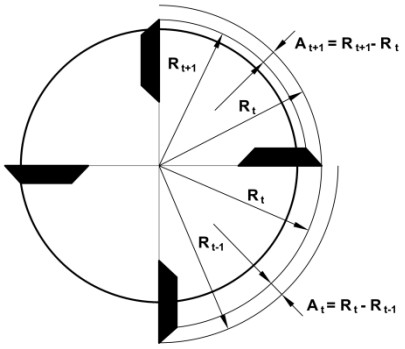
W gnieździe korpusu głowicy frezowej, oprócz różnic w wymiarach i ukształtowaniu geometrii płytek wymiennych, każde z ostrzy jest inaczej ustawione względem płaszczyzny równoległej lub prostopadłej do powierzchni obrabianej [GÓR 99], [NAR 01], [BAK 01], [ZHE 03], [LI 04], [FRA 04], [CIC 06], [SCH 07], [ŻUR 07].

Obserwuje się tak zwane bicie promieniowe i czołowe (osiowe) ostrzy wpływające na tworzoną powierzchnie obrobioną, które w początkowej fazie pracy skrawania zależy tylko od jednego z nich, najbardziej wysuniętego naroża ostrza [CIE 97], [GÓR 99].

Zazwyczaj opis bicia promieniowego pracy ostrza sprowadza się do rozważań nad zmianą grubości warstwy skrawanej, która ma wpływ przy tworzeniu wióra lub zmian składowych sił skrawania (rys. 2.24 i 2.25) [LI 04].



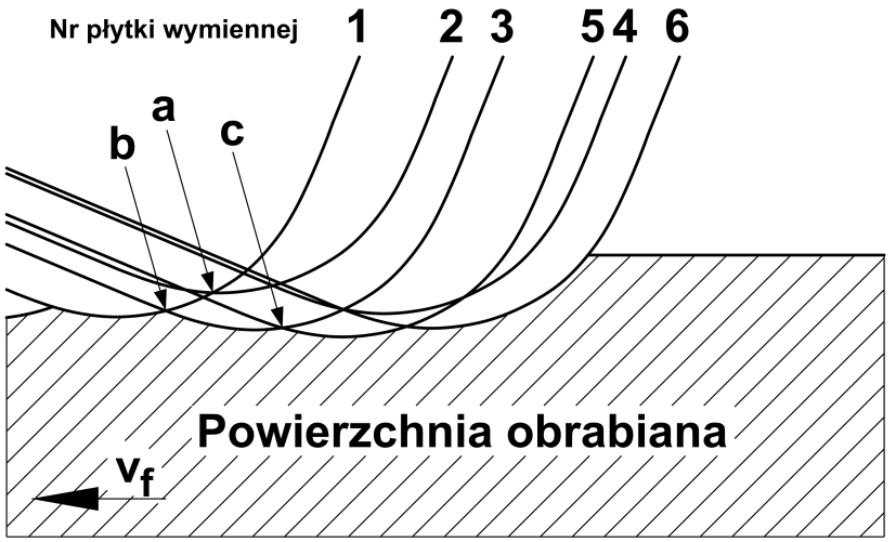
Rys. 2.24. Modelowa zmiana tworzenia wióra z uwzględnieniem bicia promieniowego [LI 04]



Rys. 2.25. Zasada promieniowego bicia ostrzy dla czterech różnych ustawień płytek wymiennych w głowicy frezowej [SEE 00]

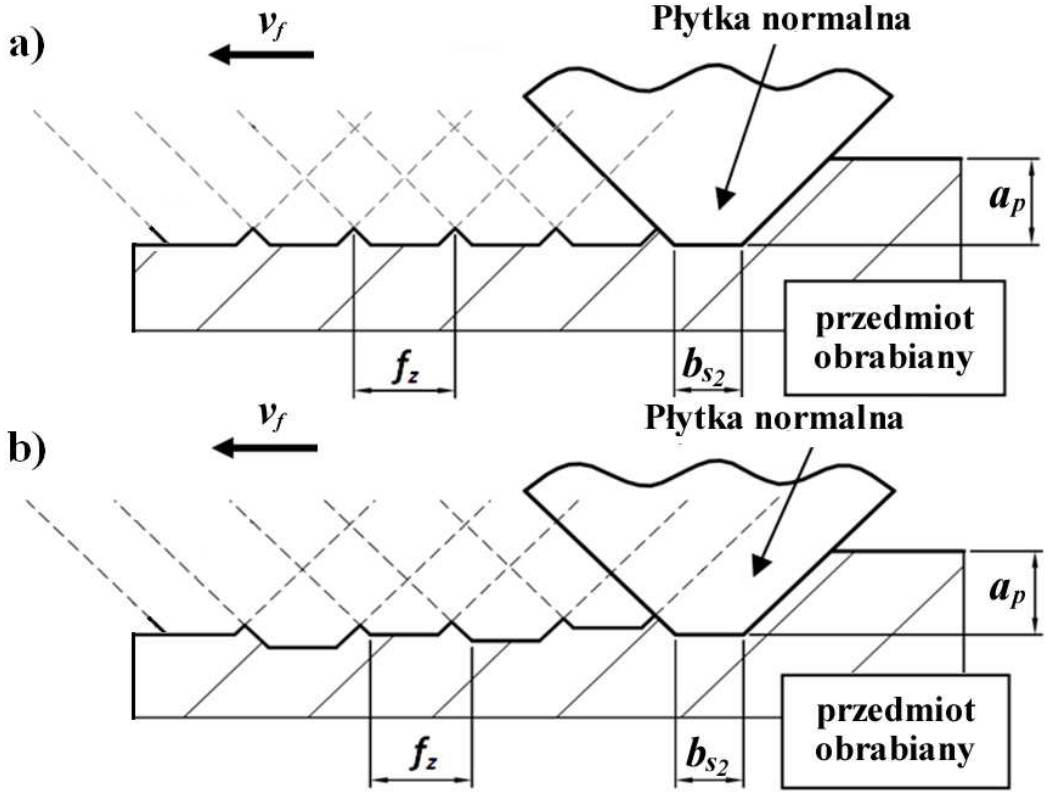
Bicie promieniowe płytek wymiennych zależy między innymi od luzu wrzeciona obrabiarki [SAS 00], ale w artykule [SEE 00] wskazano, że nie ma to większego znaczenia, a bardziej dokładność wykonania w określonej tolerancji gniazd, na płytki wymienne w głowicy frezowej.

Wpływ bicia promieniowego i czołowego (osiowego) dla ostrzy o zaokrąglonym narożu na zarys geometryczny powierzchni obrabianej przedstawiono na rysunku 2.26.



Rys. 2.26. Modelowy profil powierzchni obrobionej sześcioma ostrzami po jednym obrocie głowicy frezowej [BAK 01]

Tradycyjnie ostrza z zaokrąglonym narożem r_ε wykorzystuje się w przypadkach, gdy wymagana jest duża jego wytrzymałość. Konstrukcja geometryczna sprowadza się do wykonania przejściowej krawędzi b_{s2} (rys. 2.27), która ma dogładzać powierzchnię obrobioną jak pokazano na rysunku 2.27 a i b [MEL 91], [CIC 06].

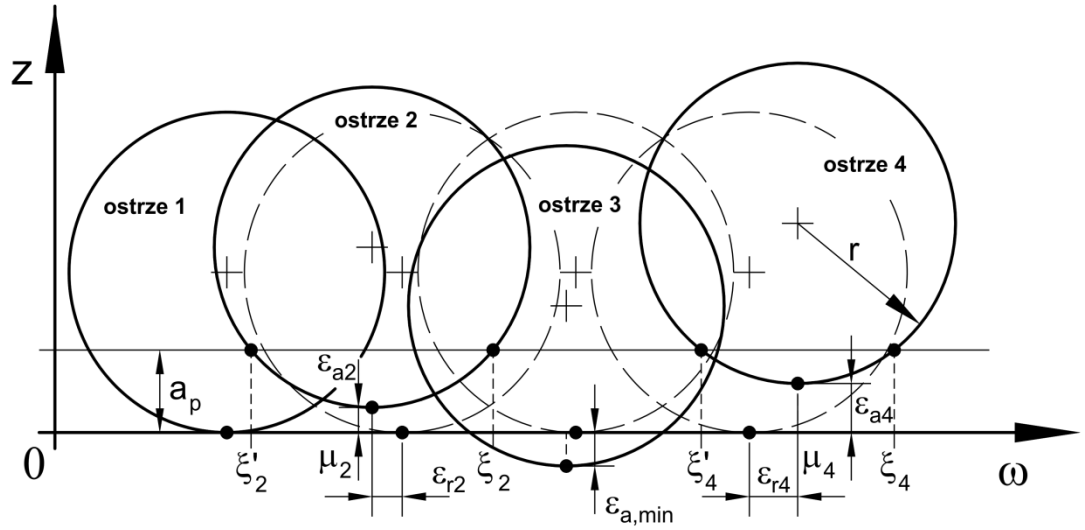


Rys. 2.27. a) Płytki z powierzchnią dogładzającą stosowane w głowicach frezowych [NAR 01] i b) z uwzględnieniem bicia czołowego płytek wymiennych [CIC 06]

W katalogach [NAR 01], które opisują użycie płytki z krawędzią dogładzającą wzmiankuje się, że poprawia ona jakość powierzchni przy wysokich parametrach obróbki, a długa równoległa powierzchnia styku płytki z powierzchnią obrobioną pozwala na zwiększenie posuwu na obrót f_n nawet czterokrotnie w stosunku dotychczas stosowanego. Im większa jest średnica głowicy, tym większy może być posuw f_n i dłuższe modyfikacje krawędzi.

We frezowaniu powierzchni płaskich stosuje się także płytki okrągłe. Zilustrowany model na rysunku 2.28 jest funkcją warunków skrawania, geometrii ostrzy i błędów wykonania narzędzia.

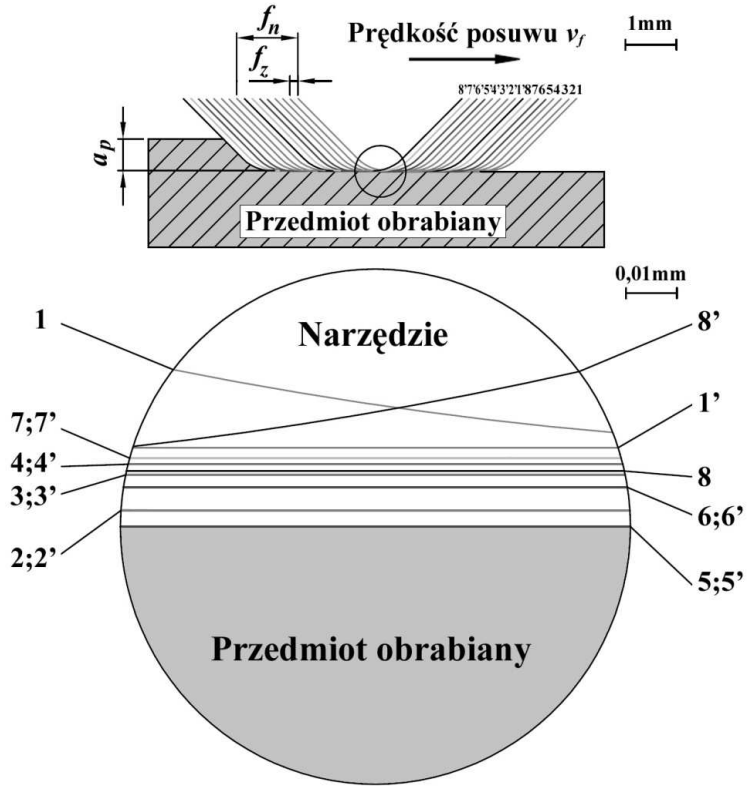
Wystąpić mogą błędy w ustawieniu płytek wymiennych w kierunku prostopadłym i równoległym do powierzchni obrabianej, a ich bicia w kierunku prostopadłym czołowym (osiowym) oznaczono jako ε_{ai} i w promieniowym ε_{ri}. Określono parametry położenia krawędzi płytek ξ_i i ξ'_i , które powstają w wyniku ich przecięcie z linią głębokości skrawania a_p. W wyniku bicia promieniowego i czołowego (osiowego) są przesunięte wierzchołki naroży μ_i. Opisane mechanizmy pracy naroży mają wpływ na przyszłą strukturę powierzchni obrobionej [FRA 04], [FRA 08].



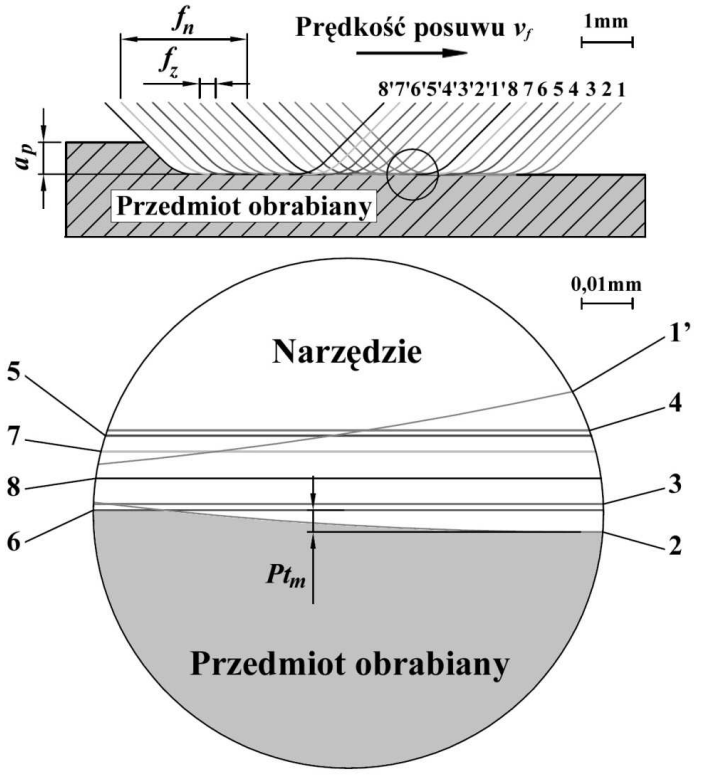
Rys. 2.28. Ustawienie okrągłych płytek wymiennych w głowicy frezowej [FRA 04]

Po rozpoznaniu literatury na temat badań modelowych dla płytek wymiennych otrzymano dane, które zostały wykorzystane do opracowania dalszych modeli ich pracy, do poznania zależności w monitorowaniu powierzchni obrobionej po frezowaniu, jak również do zadań optymalizacyjnych związanych doborem parametrów obróbki oraz obliczaniem kosztów ekonomiczno – wydajnościowych.

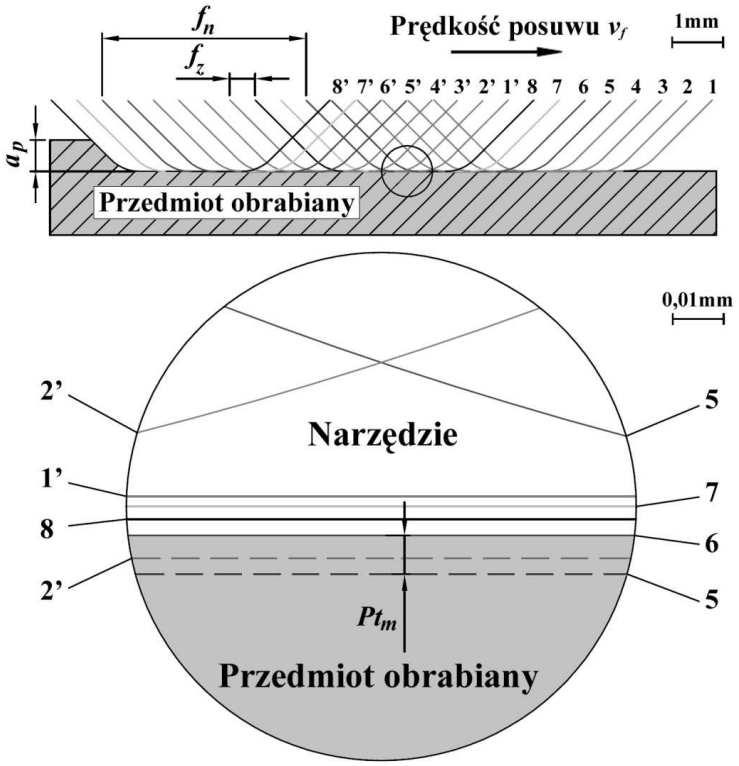
W pracy [ŻUR 10-1] przedstawiono model dotyczący przecinających się zarysów krawędzi ostrzy 1-8 i 1'-8', w 1000 krotnym powiększeniu. Wysokość teoretycznego pierwotnego profilu Pt_m pokazano na rysunkach rys. 2.29 - 2.31 dla kolejnych trzech wartości posuwu. Ostrza opisano cyframi.



Rys. 2.29. Model części warstwy skrawanej dla posuwu f_z = 0,15 mm/ostrze [ŻUR 10-1]



Rys. 2.30. Model części warstwy skrawanej dla posuwu f_z = 0,31 mm/ostrze [ŻUR 10-1]



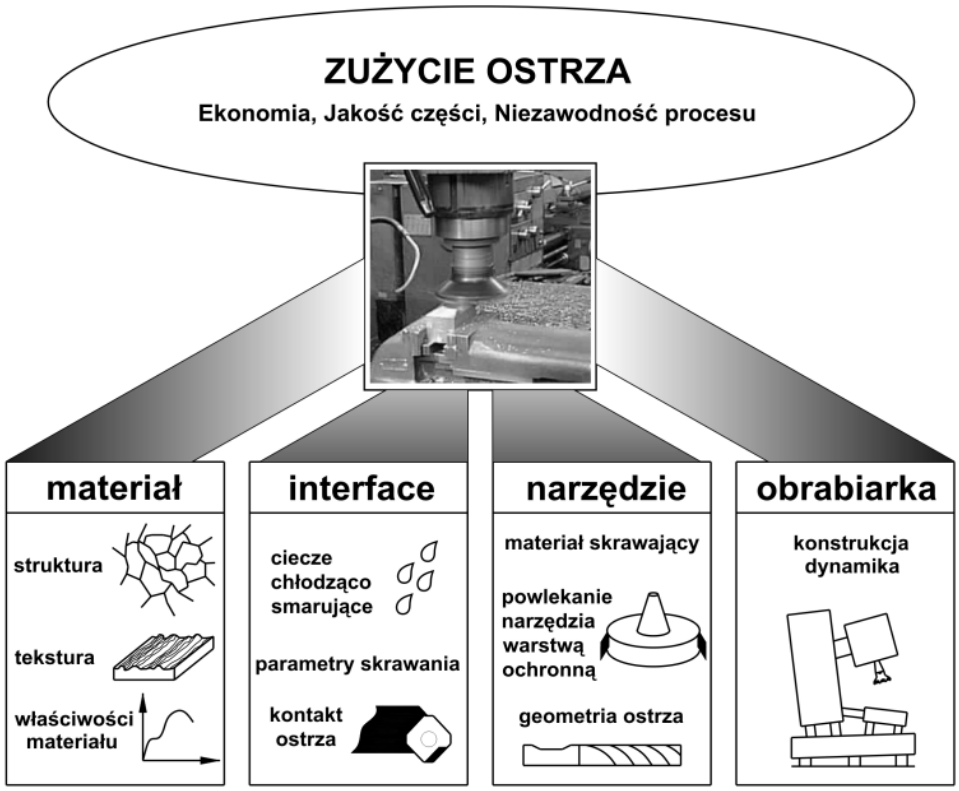
Rys. 2.31. Model części warstwy skrawanej dla posuwu f_z = 0,5 mm/ostrze [ŻUR 10-1]

W przedstawionych modelach liczba ostrzy, prędkość posuwu i bicie płytek wymiennych decydują istotnie o wysokości nierówności powierzchni i powinny zostać wykorzystane do opracowania metod i analiz w monitorowaniu powierzchni obrobionej oraz zużycia ostrza po frezowaniu.

2.2.3. Model zużycia ostrza narzędzia wieloostrzowego

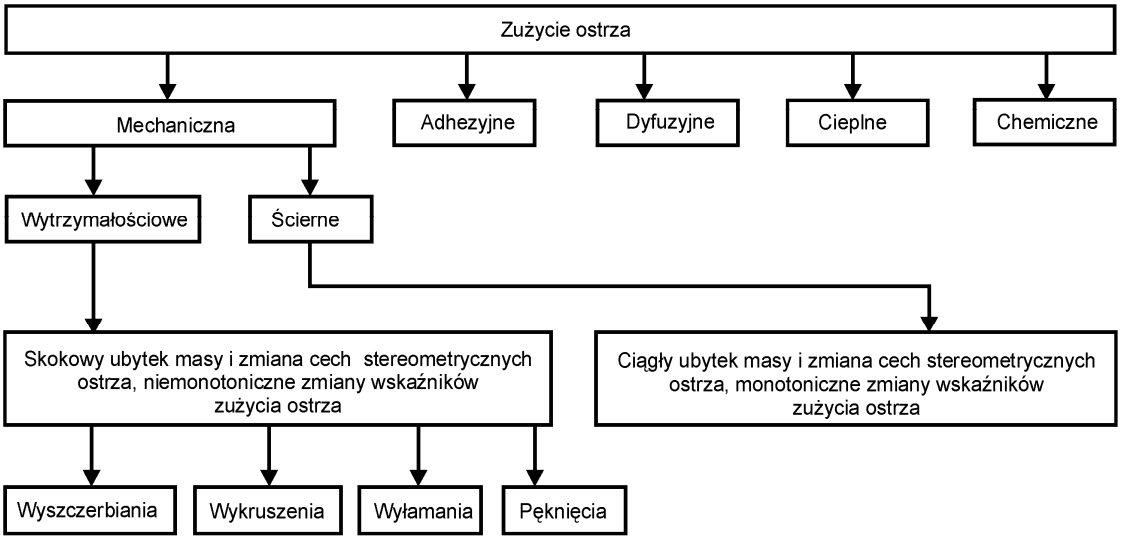
Frezowanie głowicą frezową to złożony proces, podczas którego z materiału obrabianego wytwarza się przedmioty przez usunięcie naddatku materiału za pomocą energii mechanicznej. Wpływają na to zmienne: materiał obrabiany, geometria ostrza, sztywności i podatności obrabiarki, stabilność parametrów obróbki (rys. 2.32) oraz zjawiska występujące podczas skrawania [DĄB 01]. Do innych czynników odpowiedzialnych za kształtowanie powierzchni są: zużycie narzędzia, postać wióra, narost z materiału obrabianego na ostrzu [OLS 08].

Przedstawione w literaturze wyniki badań opisują zużycia ostrzy na głównej powierzchni przyłożenia, pomocniczej powierzchni przyłożenia oraz powierzchni natarcia i można zauważyć, że interpretacja tego zużycia świadczy o tym, że ma ono nierównomierny charakter [GÓR 99].



Rys. 2.32. Cztery grupy elementów w procesie skrawania wpływające na zużycie ostrza [YEN 04]

Przedwczesne zużycia ostrzy, które mają zagwarantować wytwarzanie wyrobów niezawodnych i dobrej jakości zależą od procesów ściernych, wytrzymałościowych, termicznych i chemicznych. Podczas frezowania częstą przyczyną zużycia ostrza mogą być drgania narzędzia oddziaływane względem przedmiotu obrabianego, powtarzalność występowania narostu, tworzenie wióra, pierwszego kontaktu ostrza z materiałem obrabianym [CIC 06], oraz pęknięcia termiczne, zużycia plastyczne i dyfuzja [GUJ 99], [GHO 07]. Ogólny podział zużycia ostrza przedstawia rysunek 2.33.



Rys. 2.33. Podział i odmiany zużycia ostrza [DMO 80], [STO 01], [CIC 06]

Możliwe klasyfikacje zużycia ostrza takie jak:

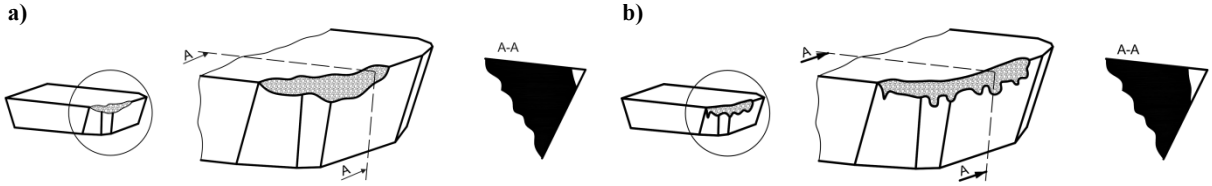
- złamanie,
- wyszczerbienie,
- zużycie wytrzymałościowe,
- wytarcie na pomocniczej i głównej powierzchni przyłożenia,
- powstanie żłobka i narostu na powierzchni natarcia ostrza,

przedstawiono w artykule [LAN 01].

Pozostałe rodzaje zużycia jak: adhezyjne, dyfuzyjne, cieplne i chemiczne opisano w [STO 01].

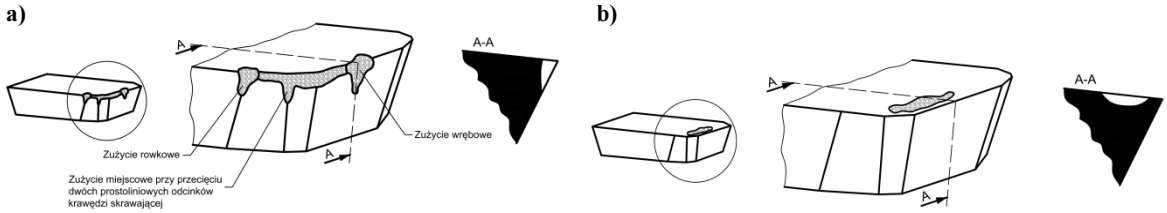
Międzynarodowa norma ISO 3685 opisuje procedury badań nad trwałością i zużyciem ostrzy tokarskich. Wprowadzenie tej normy zmusiło do opracowania podobnych norm dotyczących sposobów obróbki wiórowej przez frezowanie. W celu poprawienia niezawodności i porównywalności wyników badań Międzynarodowa Organizacja ds. Badań Technologii Maszyn (CIRP) stworzyła projekt, mówiący o operacjach wykonywanych frezem walcowo czołowym z płytkami wymiennymi z węglików spiekanych stosowanych w przemyśle [PN-ISO 8688-1:1996]. Zdefiniowano tam kryterium wartości zużycia narzędzia na głównej powierzchni przyłożenia oraz na powierzchni natarcia płytki z węglików spiekanych we frezie walcowo-czołowym Przykłady zostały zilustrowane według normy PN-ISO 8688-1:1996 na rysunkach 2.34 - 2.40 [ALA 95-1], [GUJ 99].

Równomierne zużycie powierzchni przyłożenia to pasmo starcia zwykle o stałej szerokości rozciągniętej wzdłuż fragmentów czynnej krawędzi skrawającej (rys. 2.34a). Zużycie nierównomierne powierzchni przyłożenia charakteryzuje się pasmem starcia o nieregularnej szerokości i zarys śladu wytarcia na powierzchni przyłożenia jest w każdym miejscu zróżnicowany (rys. 2.34b).



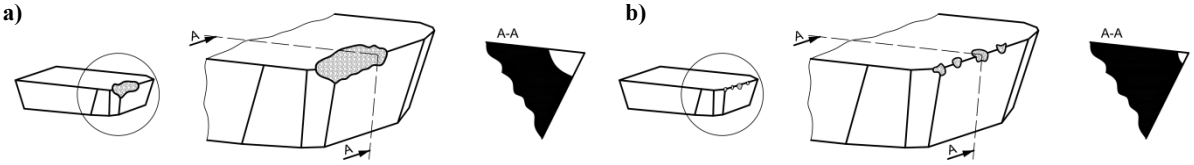
Rys. 2.34. Zużycie a) równomierne i b) nierównomierne powierzchni przyłożenia

Miejscowe zużycie powierzchni przyłożenia uwidacznia się w postaci starcia na powierzchni przyłożenia ostrza i pojawia się w określonych punktach na ostrzu (rys. 2.35a). Zużycie to występuje w trzech szczególnych odmianach. Zużycie wrębowe w części głównej powierzchni przyłożenia i zużycie rowkowe w części pomocniczej powierzchni przyłożenia. Zdarza się wystąpienie zużycia miejscowego w punktach przecięcia dwóch prostoliniowych odcinków krawędzi skrawającej.



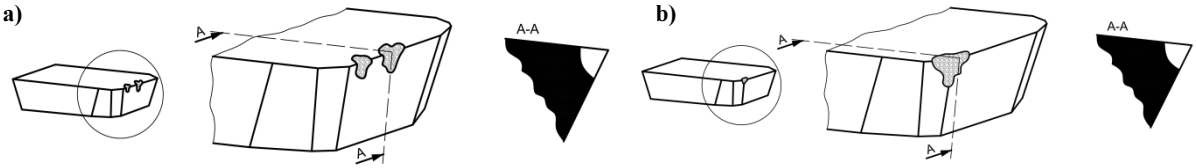
Rys. 2.35. Zużycie miejscowe a) powierzchni przyłożenia i b) żłobkowe

Stopniowy ubytek materiału spowodowany tarciem powierzchni wióra o powierzchnię natarcia ostrza wywołuje powstanie śladu wytarcia na powierzchni natarcia w osi równoległej do krawędzi skrawającej. Taka forma zużycia nazywana jest „żłobkiem" lub „kraterem", który może ulec wyłamaniu z powierzchni natarcia, aż do połączenia się z główną powierzchnią przyłożenia (rys. 2.35b).



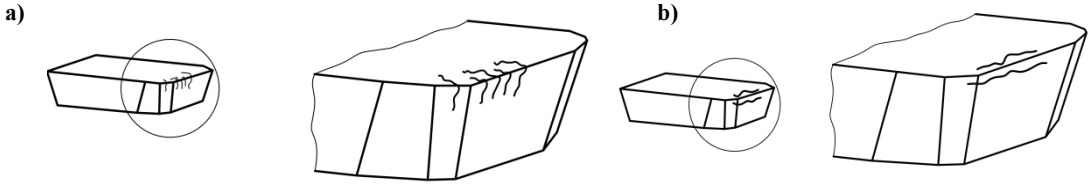
Rys. 2.36. Zużycie schodkowe powierzchni natarcia a) i wykruszenie równomierne b)

Postać zużycia schodkowego na powierzchni natarcia jest definiowana prostopadle do powierzchni natarcia i występuje na przecięciu śladu zużycia z główną powierzchnią przyłożenia (rys. 2.36a). Ubytek materiału ostrza wzdłuż krawędzi skrawającej o jednakowych wymiarach nazywa się wykruszeniem równomiernym, co daje wyraźną równomierność szerokości pasma zużycia na powierzchni przyłożenia (rys. 2.36b).



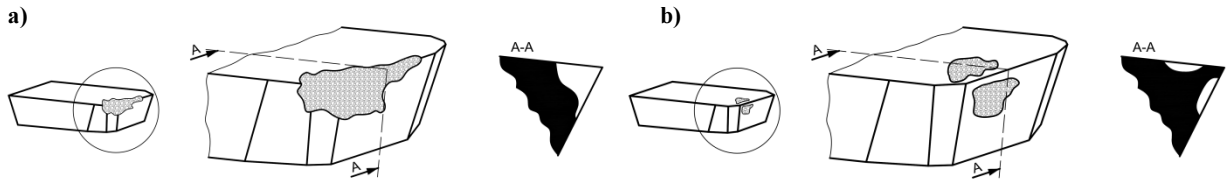
Rys. 2.37. Wykruszenie nierównomierne a) i miejscowe b)

Wykruszenie nierównomierne w połączeniu z pęknięciami występuje głównie w niewielu miejscach wzdłuż czynnych krawędzi skrawających (rys. 2.37a), lecz bez przejścia od jednej do drugiej krawędzi. Skoncentrowane zużycie, w pewnych miejscach wzdłuż czynnej krawędzi skrawającej, nazywane jest wykruszeniem miejscowym (rys. 2.37b).



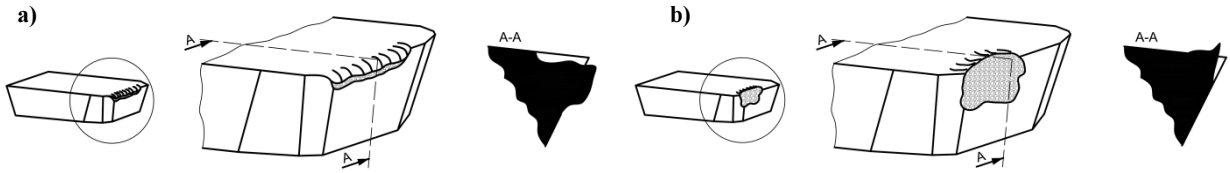
Rys. 2.38. Pęknięcia grzebieniowe a) i równoległe b)

Pęknięcia grzebieniowe lub termiczne to pojawiające się ślady na powierzchni przyłożenia i natarcia skierowane prostopadle do głównej krawędzi skrawającej (rys. 2.38a). Pęknięcia równoległe pojawiają się na powierzchni natarcia narzędzia lub na powierzchni przyłożenia, zorientowane równolegle do głównej krawędzi skrawającej (rys. 2.38b),



Rys. 2.39. Uszkodzenia katastroficzne a) i złuszczenie b)

Uszkodzenia katastroficzne występują jako gwałtowne zużycie prowadzące do utraty skrawności ostrza (rys. 2.39a). Przy stosowaniu płytek wieloostrzowych powlekanych można zaobserwować zjawisko ubytku fragmentów narzędzia w postaci złuszczeń na powierzchni narzędzia (rys. 2.39b).



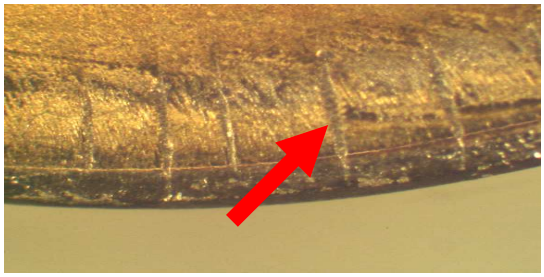
Rys. 2.40. Odkształcenie plastyczne a),b)

Odkształcenia plastyczne ostrza w stosunku do początkowego jego kształtu (rys. 2.40a i b) to utrata własności skrawnych bez zauważalnego ubytku materiału narzędzia. Utrudnieniem w monitorowaniu ostrza jest określenie wartości wskaźnika tego zużycia [ZHO 95]. Trwałość ostrza to wyznaczony w minutach czas jego przydatności do skrawania. Wyznaczenie granicznych wartości czasu polegają na pomiarze i obserwacji wielu różnych wskaźników śladów wytarcia, określane jako wytarcia, wykruszenia, pęknięcia lub wyłamania krawędzi skrawającej. Przedstawione niżej formy zużycia ostrza [FRE 04] opisano w wielu katalogach firm wytwarzających narzędzia skrawające [WER], [NAR 01], [CUT 05], [MIL 06], [KAT 09]. Zaprezentowane rzeczywiste postacie zużycia powstałe na głównej powierzchni przyłożenia (rys. 2.41), na powierzchni natarcia w formie krateru (rys. 2.42), narostu (rys. 2.43), pęknięć cieplnych (rys. 2.44), wykruszeń (rys. 2.45), zużyć wrębowych (rys. 2.46), które mają wpływ na pogorszenie jakości wymiarowo – kształtowej, osłabienie krawędzi skrawającej, łuszczenie się powierzchni obrobionej i złamanie ostrza.

Rys. 2.41. Starcie na głównej powierzchni przyłożenia

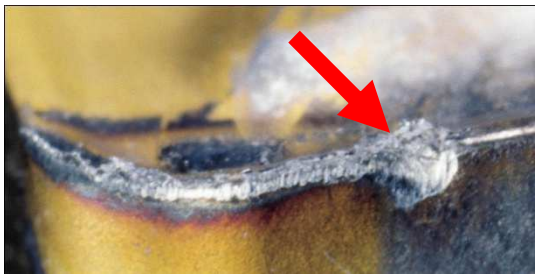
Rys. 2.42. Zużycie na powierzchni natarcia w formie krateru

Rys. 2.43. Narost materiału obrabianego na ostrzu

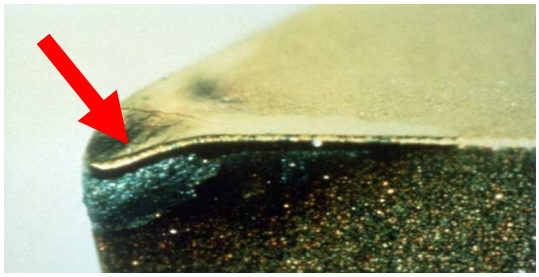


Rys. 2.44. Pęknięcia cieplne

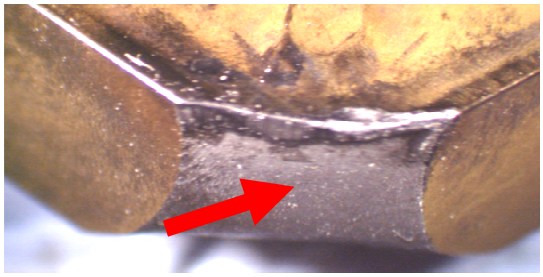
Rys. 2.45. Wykruszenia na narożu ostrza



Rys. 2.46. Zużycie wrębowe



Rys. 2.47. Plastyczna deformacja naroża ostrza



Rys. 2.48. Zużycie krytyczne - złamanie ostrza

Uwzględniając możliwe przypadki rozpoczynania pracy ostrza przedstawione na rys. 2.21 można poddać obserwowane ślady zużycia analizie, która pozwoli na wyjaśnienie złożonego charakteru ich pracy. Jak to podkreślono modele te w ogóle nie uwzględniają zjawisk plastyczności materiału obrabianego wokół strefy skrawania.

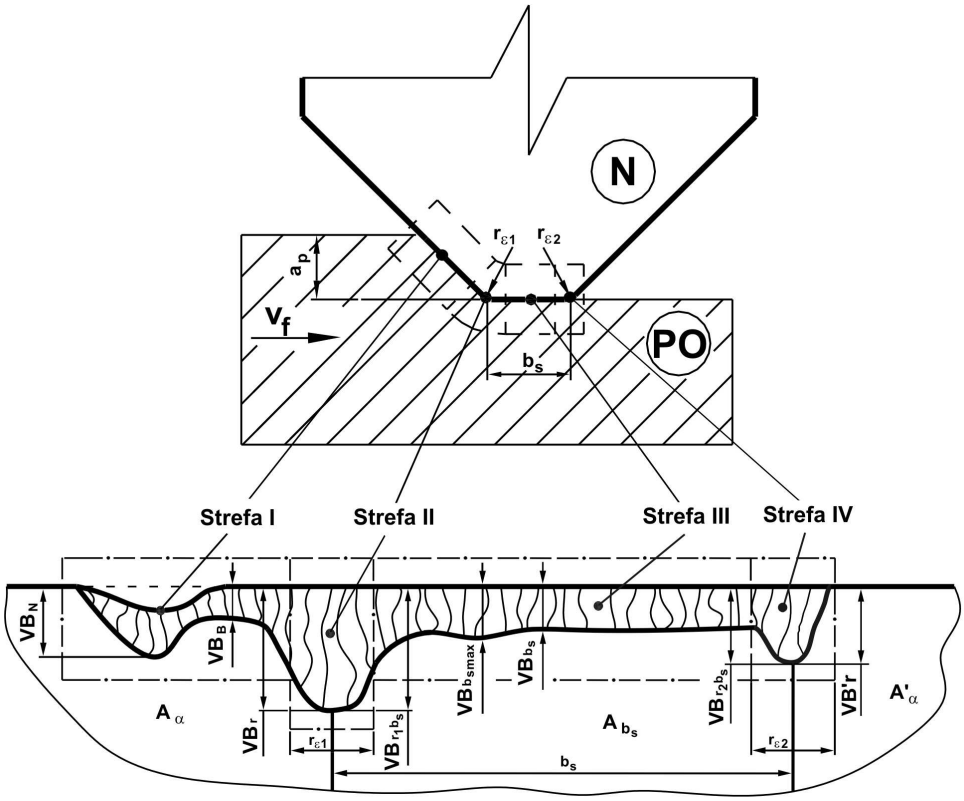
Odkształcenia plastyczne na głównej powierzchni przyłożenia (rys. 2.47) doprowadzają do zmiany geometrii krawędzi skrawającej, co prowadzi do tworzenia postaci wióra niedopuszczalnego i niebezpiecznego w procesie skrawania. Częstym, krytycznym zużyciem jest złamanie płytki wymiennej (rys. 2.48). W wyniku takiego zdarzenia może ulec uszkodzeniu przedmiot obrabiany oraz inne części głowicy frezowej [NAR 01], [FRE 04].

Przedstawione rysunki typowych odmian zużycia we frezowaniu, z rzeczywistych warunków skrawania i z polskiej normy prezentują pełen obraz postaci ostrzy skrawających po obróbce głowicami walcowo-czołowymi. Do oceny zużycia ostrza stosuje się wskaźniki występujące w różnych miejscach na ostrzu, które opisano w normach. Zarówno dla toczenia jak i dla frezowania ślady wytarcia wykazują podobieństwo. Do ich opisu wykorzystuje się podobne oznaczenia szczególnie dla głównej powierzchni przyłożenia. Różnią się jedynie symbolem zapisu. W normach uwzględnia się tylko wskaźniki zużycia

na głównej powierzchni przyłożenia ostrza. Doprowadziło to do rozwinięcia istniejących modeli zużycia ostrza, wprowadzając nowy wskaźnik VB_r opisujący wytarcie na pomocniczej powierzchni przyłożenia w otoczeniu naroża ostrza [STO 89], [STO 01], [ZAW 01], [STO 06], [STO 09].

Modele skrawania ostrzami o zróżnicowanej geometrii w głowicy frezowej

Modelowanie strefy skrawania dla ostrzy z udziałem dogładzającej krawędzi skrawającej o szerokości b_s pozwala wyróżnić dwa fragmenty wierzchołka, jedną na styku z powierzchnią obrobioną i drugą na prostoliniowej głównej krawędzi skrawającej.



Rys. 2.49. Wskaźniki zużycia ostrza frezarskiego na głównej i pomocniczej powierzchni przyłożenia oraz powierzchni dogładzającej A_{bs}

Znana geometria wierzchołka wymiennej płytki skrawającej zachęca do opracowania prawdopodobnego obrazu zmian w wyniku zużycia powierzchni przyłożenia.

Na rysunku 2.49 i 2.50 przedstawiono modele dotyczące przewidywanych śladów zużycia na powierzchni dogładzającej A_{bs} i na głównej oraz pomocniczej powierzchni przyłożenia ostrza. Skupiono się głównie na nieopisywanym jak do tej pory wytarciu na pomocniczej powierzchni przyłożenia dla płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą A_{bs}.

Wprowadzono nowe wskaźniki i strefy zużycia (rys.2.49):

- VBr_1b_s – zużycie na narożu ostrza. W połączeniu z VBr tworzą charakterystyczny eliptyczny kształt wytarcia. Tu zużycie rozwija się najszybciej.

- VBb_{smax} – zużycie nierównomierne. Może wystąpić w każdym miejscu na powierzchni dogładzającej A_{bs}. Jest to największe miejscowe wytarcie.
- VBb_s – zużycie równomierne. Występuje na całej długości na powierzchni dogładzającej A_{bs}. W początkowej fazie skrawania może wystąpić tylko w okolicy naroża ostrza. Ale po dłuższej drodze skrawania rozwija się na całą powierzchnie dogładzającą A_{bs}.
- VBr_1b_s – zużycie na drugim narożu ostrza, które można zaobserwować po dłuższych drogach skrawania, kiedy wskaźnik VBb_s będzie miał wartość około 0,2 mm.
- $VB'r$ – zużycie na pomocniczej powierzchni przyłożenia. Wspólnie z VBr_1b_s tworzą wytarcie w postaci elipsy. Określa się, że wielkość pola powierzchni jest dwa razy mniejsze niż na VBr.

Strefa I – na główniej powierzchni przyłożenia zaczyna pojawiać się wytarcie w postaci zbliżonej do prostokątnego pasma starcia albo zużycia wrębowego. Związane jest to z głębokością warstwy skrawanej a_p oraz z przecięcia się głównej krawędzi skrawającej z umocnioną warstwą na powierzchni obrobionej powstałej z poprzedniej obróbki.

Strefa II – zużycie na narożu ostrza jest wynikiem złożonych mechanizmów. Gdy promień zaokrąglenia jest $r_\varepsilon > 0$ to grubość warstwy skrawanej zmienia się tak, że $h < h_{min}$ przy stosowaniu posuwów na ostrze $f_z < 0{,}2$ mm/obr.

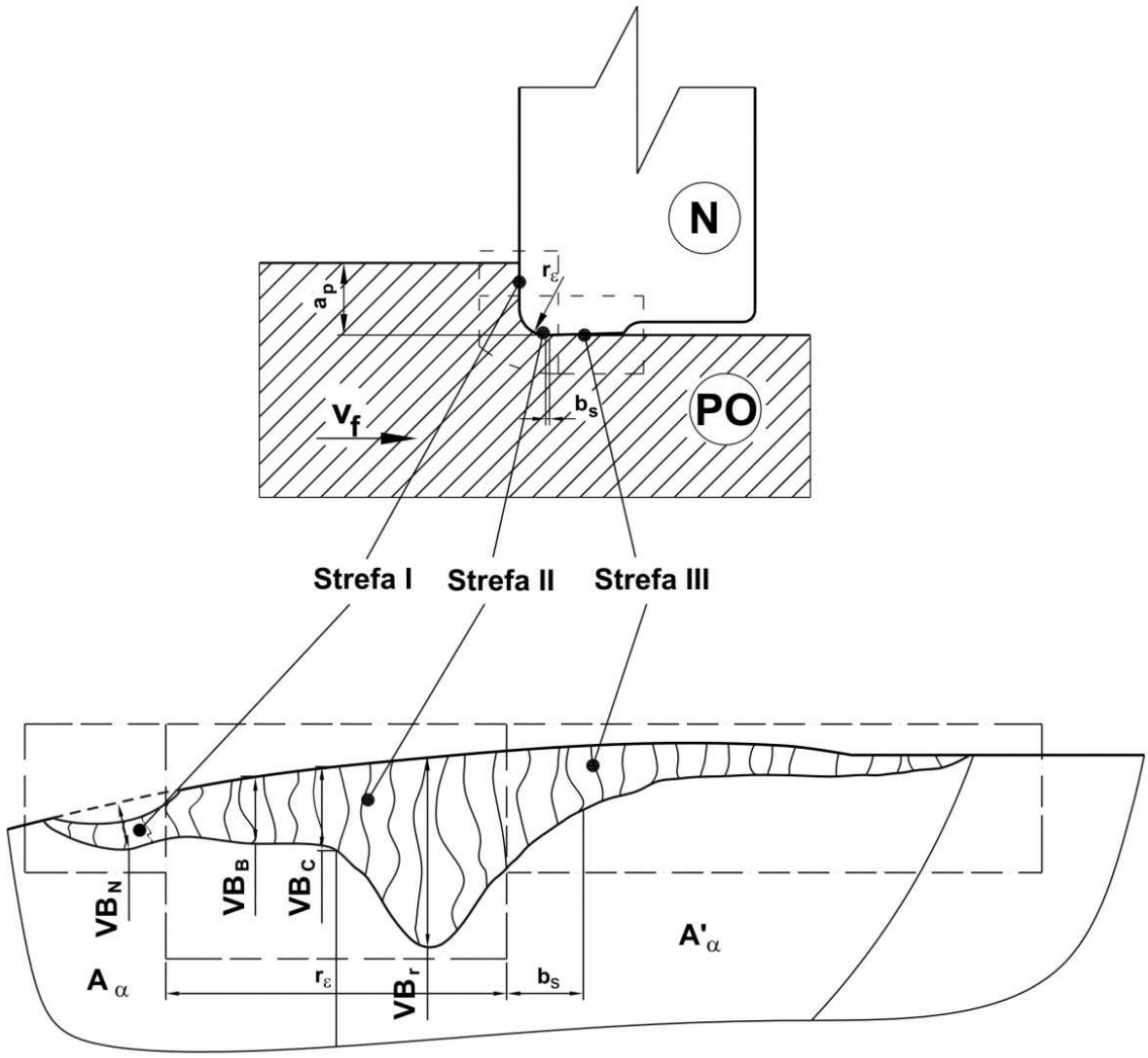
Strefy I i II zostały szczegółowo opisane w literaturze [STO 89], [STO 01], [ZAW 01], [STO 06], [STO 09].

Strefa III – dotyczy zużycia ostrza na powierzchni dogładzającej A_{bs}. W tej części wytarcie może wystąpić w trzech postaciach:

- rozpoczyna się przy narożu ostrza i rozwija, o różnych wartościach zużycia na całą długość powierzchni dogładzającej A_{bs} dla dłuższej drogi skrawania,
- bezpośrednio wystąpi na całej powierzchni dogładzającej A_{bs} o zbliżonych wartościach wytarcia,
- zużycie nie wystąpi.

Wymienione przypadki zależą od bicia czołowego ostrzy.

Strefa IV – w tej strefie zużycie ujawnia się po dłuższych drogach skrawania. Zazwyczaj występują lekkie przypalenia z wyraźną granicą w postaci elipsy na pomocniczej powierzchni przyłożenia A'_α oraz wytarcia na ostrzu. Zachodzi tu bardzo złożony proces zużycia i przypuszcza się, że to w tej strefie ślad zużycia naroża ostrza, odwzorowuje się na powierzchni obrobionej i jest zależny od bicia czołowego ostrzy i posuwu.



Rys. 2.50. Wskaźniki zużycia ostrza frezarskiego na głównej i pomocniczej powierzchni przyłożenia

Dla ostrza z zaokrąglonym narożem r_ε zużycie w strefach I i II będzie przebiegało w podobny sposób jak dla ostrza z krawędzią dogładzającą b_s. Należało jednak uwzględnić podczas analiz udział w procesie skrawania strefy III. Strefa ta, dotyczy zużycia ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia A'_α. W tej części wytarcie rozpoczyna się przy narożu ostrza, przechodząc ze strefy II i w połączeniu z *VBr* rozwija się na całą długość pomocniczej powierzchni przyłożenia A'_α (rys. 2.50).

Wykonywana, przez producenta płytek wymiennych "fazka" b_s=0,3 mm na pomocniczej powierzchni przyłożenia A'_α, nie zmienia w istotny sposób jej charakteru zużycia. Dla ostrzy z krawędzią dogładzającą b_s, zachodzą złożone procesy zużycia i przypuszcza się, że w tej strefie ślad tego zużycia odwzorowuje się na powierzchni obrobionej.

2.2.4. Model tworzenia nierówności na powierzchni obrobionej ostrzem do frezowania

Właściwy dobór parametrów skrawania, wymiarów i tolerancji płytek wymiennych mogą mieć wpływ na poprawę charakterystyk jakościowych powierzchni obrobionej. Zbyt wysokie parametry skrawania powodują wzrost temperatury na narożu ostrza co skraca ich trwałość. Po frezowaniu powierzchnia obrobiona może mieć wyraźnie różne wartości chropowatości w różnych jej miejscach. Ostrze pozostające w styku z powierzchnia obrobioną o zmieniającym się ukształtowaniu, w różnych miejscach pomiędzy kolejnymi przejściami, jest odwzorowane na tej powierzchni [MIL 06].

Według danych katalogowych, parametr *Ra* chropowatości powierzchni obrobionej po frezowaniu wykończeniowym zawiera się w zakresie 32 do 150 μm. Osiągnięcie większej wartości niż prognozowana, parametru *Ra* jest wynikiem oddziaływania kilku zmiennych niezależnych takich jak: niejednorodność materiału obrabianego, sztywność obrabiarki, geometria ostrza, zużycie ostrza, prędkość posuwu i skrawania oraz postaci wióra.

Do oceny przewidywalnej chropowatości powierzchni po frezowaniu wykorzystuje się różne numeryczne i statystyczne modele matematyczne. Przykładem może być teoretyczny model do wyznaczenia średniego parametru chropowatości powierzchni *Ra* dla frezowania walcowo-czołowego. W modelach tych brakuje założenia, między innymi dotyczących uwzględnienia wibracji, ugięcia przedmiotu, drgań czy narostu na krawędzi skrawającej, a charakterystycznych dla pracy narzędziami wieloostrzowymi. Wpływ tych zmiennych powoduje, że wyznaczona z modelu chropowatość różni się istotnie (2.7), (2.8) [ALA 95-2] od tej po zrealizowaniu skrawania, a różnice dochodzą do kilkudziesięciu procent. Rzeczywiste wartości parametru *Ra* są dużo większe od modelowych.

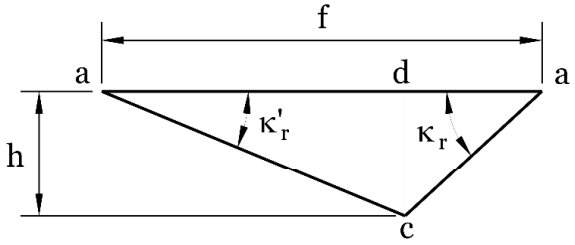
$$Ra = \frac{f_z^2}{32(r_\varepsilon \pm f_n / \pi)}, \quad \mu m \qquad (2.7)\ [\text{ALA 95-2}]$$

$$Ra = \frac{f_z^2}{32 r_\varepsilon}, \quad \mu m \qquad (2.8)\ [\text{ALA 95-2}]$$

f_z – posuw na ostrze [mm/ostrze]
f_n – posuw na obrót [mm/obr.]
(+) – dla frezowania przeciwbieżnego
(-) – dla frezowania współbieżnego
r_ε – promień zaokrąglenia naroża [mm]

Na wysokość nierówności powierzchni wpływają warunki geometryczne kształtu ostrza skrawającego, warunki kinematyczne oraz posuw. Efekt rozmiarowy wynikający ze stosunku udziału grubości warstwy skrawanej h i promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n powoduje, że na powierzchni obrobionej pozostaje nieusunięta cześć materiału [GRZ 98], [MIK 04]. Modele oparte tylko na funkcjach trygonometrycznych kątów ostrza głównej powierzchni przyłożenia i pomocniczej powierzchni przyłożenia pomijają ten efekt rozmiarowy.

W literaturze opisane są cztery odwzorowania geometryczno – kinematyczne dla wyznaczenia teoretycznej nierówności powierzchni, a jednym z nich to przypadek odwzorowania liniowego (rys. 2.51) [GRZ 98], [GÓR 99], [MIK 04].



Rys. 2.51. Kształt nierówności powierzchni po frezowaniu dla odwzorowania liniowego [GRZ 98], [GRZ 10]

Uproszczony model matematyczny liniowej wysokości nierówności dla frezowania walcowo - czołowego może mieć postać jak w zależności (2.9), (2.10) lub (2.11).

$$Rz_t = f_z \frac{\sin\kappa_r \sin\kappa_r^{'}}{\sin\left(\kappa_r + \kappa_r^{'}\right)} \sin\varphi, \quad \mu m \qquad (2.9)\ [\text{GRZ 10}]$$

f_z – posuw na ostrze [mm/ostrze]
κ_r – główny kąt przyłożenia
κ'_r – pomocniczy kąt przyłożenia
φ – kąt określający położenie rozważanego przekroju promieniowego powierzchni obrobionej

$$Rt_o = f_z \frac{tg\kappa_r tg\kappa_r^{'}}{tg\left(\kappa_r + \kappa_r^{'}\right)} \sin\varphi, \quad \mu m \qquad (2.10)\ [\text{MIK 04}]$$

lub

$$Rz_t = f_z \frac{tg\kappa_r tg\kappa_r^{'}}{tg\left(\kappa_r + \kappa_r^{'}\right)}, \quad \mu m \qquad (2.11)\ [\text{GÓR 99}]$$

f_z - posuw na ostrze [mm/ostrze]
κ - główna kąt przyłożenia
κ'- pomocnicza kąt przyłożenia

W przypadku gdy głowica frezowa wyposażona jest w ostrza o ostrym narożu, wówczas model matematyczny przyjmuje postać jak w zależności (2.12),

$$Rao = \frac{f_z}{4} \frac{tg\kappa_r tg\kappa_r^{'}}{tg\left(\kappa_r + \kappa_r^{'}\right)}, \quad \mu m \qquad (2.12)\ [\text{MIK 04}]$$

a dla zaokrąglonego naroża r_ε (2.13).

$$Rao = \frac{f_z^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\varepsilon}, \quad \mu m \qquad (2.13)\ [\text{MIK 04}]$$

We frezowaniu przy ustalonych warunkach skrawania każde z ostrzy usuwa podobną warstwę o zbliżonych wymiarach nominalnych. Przy idealnej sztywności przedmiotu obrabianego i narzędzia powstają ślady na powierzchni obrobionej po przejściu każdego z nich. Są to odcinki łuków z okręgu

o promieniu równym połowie średnicy głowicy frezowej. Model dla teoretycznej chropowatości powierzchni dla takiego przypadku można przedstawić w zależności (2.14) [PEI 04], [KAW 09].

$$Rt = \frac{f_z^2}{8r_\varepsilon}, \quad \mu m \qquad (2.14)\ [PEI\ 04]$$

f_z – posuw na ostrze [mm/ostrze]

W jednej z prac [BEL 00] dla teoretycznego opisania chropowatości powierzchni zastosowano zależności (2.15) i (2.16). W równaniach tych nie uwzględniano głębokości i prędkości skrawania, kątów roboczych ostrza i dynamiki obrabiarki.

$$Rt = 125\frac{f_z^2}{D/2 + f_z z/\pi}, \quad \mu m \qquad (2.15)\ [BEL\ 00]$$

$$Rt = 125\frac{f_z^2 z^2}{r_\varepsilon}, \quad \mu m \qquad (2.16)\ [BEL\ 00]$$

f_z – posuw na ostrze [mm/ostrze]
D – średnica głowicy frezowej [mm]
r_ε – promień zaokrąglenia naroża [mm]
z – liczba ostrzy

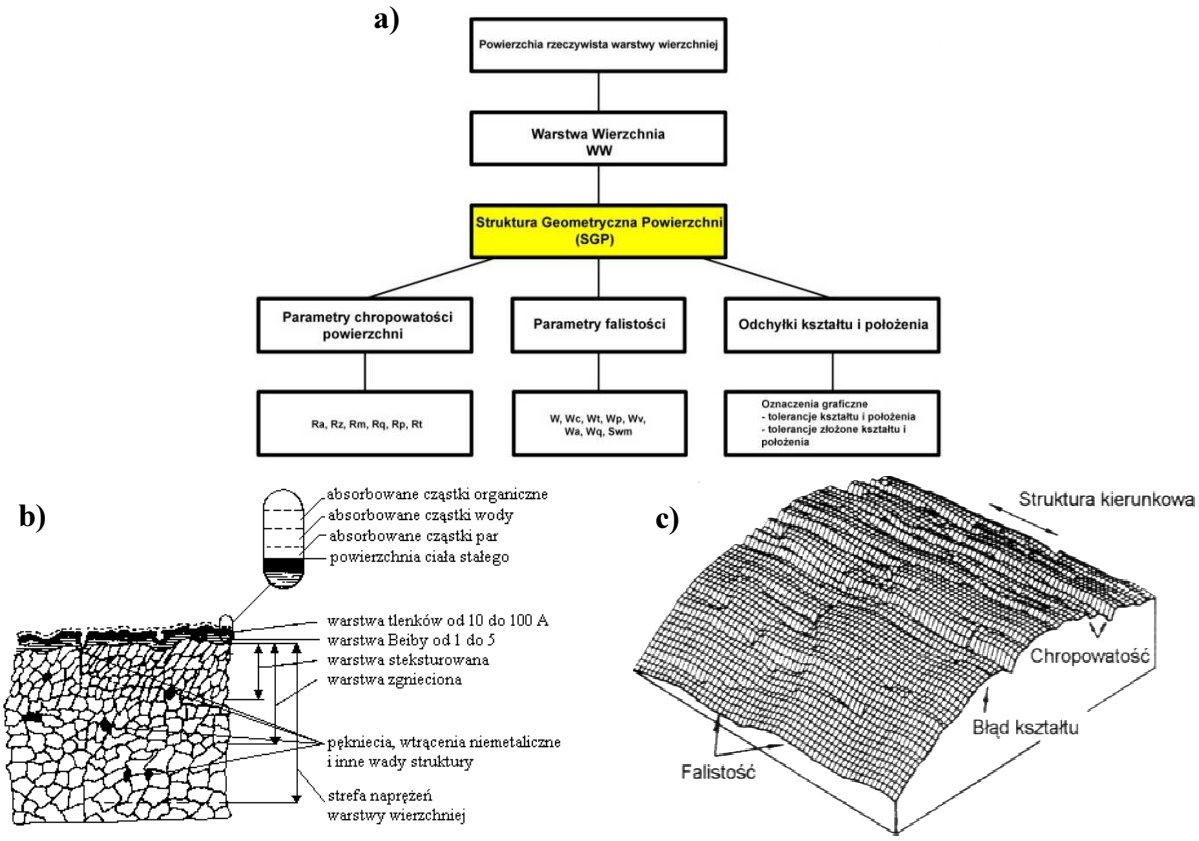
Wyznaczone teoretyczne wartości chropowatości powierzchni po frezowaniu z wykorzystaniem zależności dla pojedynczego ostrza nie dają jednoznacznych wyników, a bywa, że są one bardzo rozbieżne [ŻUR 05], [OLS 08]. Tego typu zależność (2.7-2.16) nie można stosować do opisu chropowatości powierzchni dla nowoczesnych narzędzi typu Wiper lub z powierzchnią dogładzającą A_{bs} [KAW 09].

2.3. Charakterystyki struktury geometrycznej powierzchni *SGP*

Po obróbce frezowaniem według polskiej normy *PN* można zdefiniować warstwy o szczególnych cechach (rys. 2.52a). Pod powierzchnią rzeczywistą, tak zwaną warstwą wierzchnią, obserwuje się strefę zmiennych struktur materiału jak pokazano na rysunku 2.52b. W metrologii powierzchnia obrobiona określana jest jako struktura geometryczna powierzchni *SGP* [NOW 91], [GÓR 99]. Ta część materiału znajdująca się pod powierzchnią wykazuje zmienione cechy fizyczne, a niekiedy chemiczne w stosunku do materiału rdzenia [GÓR 83]. Zmienione własności fizyczne w głąb od powierzchni geometrycznej, pod wpływem działania ostrza, pozwoliły wyróżnić charakterystyczne strefy. Opisane w literaturze warstwy nakładają się wzajemnie, bez wyraźnych granic i kolejno są to:

- część strefy zgniecionej sięgająca do setnych części milimetra - strefa włóknista,
- steksturowane ziarna materiału obrabianego w wyniku bezpośrednich oddziaływań powierzchni ostrza (rys. 2.52c),
- warstwa o naprężeniach wynikowych sięgająca do dziesiątych części milimetra.

W wyniku wytwarzanego przez ostrze ciepła współbieżnie zachodzą rozmaite zmiany w strukturze materiału. Sięgają one najczęściej do granicy strefy zgniecionej.



Rys. 2.52. Modele technologicznej warstwy wierzchniej a) strukturalny, b), c) metrologiczny [NOW 91]

Struktura geometryczna powierzchni *SGP* opisuje zatem powierzchnię rzeczywistą i jest zbiorem wszystkich nierówności powierzchni, odchyłki kształtu, falistości i chropowatości (rys. 2.52c).

Chropowatość to zbiór nierówności, które pozostają po obróbce na powierzchni obrobionej, których wysokości zmieniają się od angstremów do milimetrów. Ocenę zbioru nierówności wykonuje się na podstawie zarejestrowanego przez profilometr ich zmian, ale w jednej płaszczyźnie i są oznaczane jako *2D*. Zaleca się, aby dla zapewnienia pełnej charakterystyki warstwy wierzchniej podawać także niezbędne dane takie, jak: l_n - długości odcinka pomiarowego, powiększenie pionowe i poziome, t_n - krzywą udziału materiałowego profilu chropowatości, fotografie powierzchni z podaniem wad struktury, wykres naprężeń warstwy wierzchniej. Struktury powierzchni spotykanych w technice są skomplikowane i obejmują zbiory nierówności rozłożone w zmienny sposób o bardzo zróżnicowanej wysokości. Dla oceny cech jakościowych konieczny jest pomiar parametrów dla powierzchni i ich właściwa analiza.

2.3.1. Opis metod stykowych

Tworzenie powierzchni obrobionej to wynik dwóch powiązanych ze sobą zjawisk: kinematycznych i dynamicznych [WIL 97]. Jeden z badaczy stwierdza, że chropowatość powierzchni wzrasta wprost proporcjonalnie do zużywania się ostrza w czasie skrawania (rys. 2.53) [OZC 06]. Nie uwzględnił jednak przy tym, że powstawanie tej powierzchni, zależy także od parametrów skrawania, materiału obrabianego, narzędzia [WIL 97], [ŻEB 98], [WIE 03], [LO 03], [OZC 06], [ZHA 07] drgań podczas frezowania [MIK 04], zużycia ostrza [COK 96], [OLS 08], kształtu wióra, błędów geometrycznych obrabiarki [BRE 04], bicia ostrzy [MIK 04], [ŻUR 08], metod frezowania [ALA 95-2].

Rys. 2.53. Typowy przebieg zmiany parametru chropowatości *Ra* w czasie pracy narzędzia

Widoczne jest zatem, że chropowatość powierzchni zależy od tak wielu czynników naturalnych i mechanicznych, z których niektóre są trudne do zdefiniowania. Wyróżnia się dziesiątki parametrów, rozkładów i funkcji opisujących cechy chropowatości, które w zależności od ich własności klasyfikowane są na cechy wysokościowe i horyzontalne, kształty nierówności, rozkłady statystyczne, parametry rozkładów, funkcje częstotliwościowe. Zatem w procesach wytwarzania do określenia jakości wyrobu wykorzystuje się szeroką gamę wskaźników.

W normie dotyczącej struktury geometrycznej powierzchni opisane jest 14 parametrów chropowatości [PN - EN ISO 4287:1999]. Natomiast w literaturze można spotkać duże zróżnicowanie parametrów profilu chropowatości i obecnie znanych jest kilkaset różnych wielkości określające nierówności powierzchni obrobionych. Wybór oczekiwanych cech geometrycznych dla obrobionego przedmiotu jest w takim przypadku utrudniony i stwarza wiele problemów interpretacyjnych [WIE 03], [KAC 11].

Zwrócić należy uwagę, że spośród tylu różnych dostępnych parametrów, które opisują *SGP*, większość z nich jest silnie z sobą skorelowane. Wyselekcjonowanie ich z pośród danego zbioru i opracowanie nowych wskaźników do wyznaczenia cech stereometrycznych powierzchni, jest zadaniem trudnym, ale badania nad tym tematem wciąż się rozwijają [KAC 08], [KAC 11].

Dlatego najczęstsze zastosowanie w obliczeniach inżynierskich, mechanice i badaniach naukowych znajdują parametry chropowatości powierzchni wyznaczane z danych statystycznych [HAM 04]. Stanowią one sumę odwzorowania nierówności zużywającej się powierzchni przyłożenia naroża ostrza, które zależą od konstrukcji narzędzia, odkształceń plastycznych i sprężystych warstw materiału powierzchni obrobionej, wskutek tarcia wewnętrznego i stykowego w głąb warstwy materiału na powierzchni obrobionej. Dla znanych cech fizyko-chemicznych i parametrów procesu uzyskanie obrazu struktury geometrycznej powierzchni zalicza się do zadań prostych.

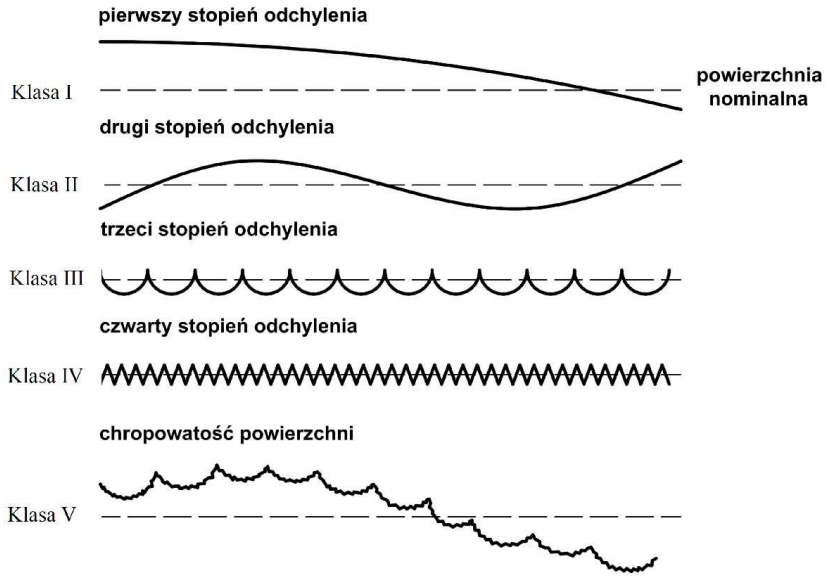
Dla ustalonych warunków dotyczących założeń optycznych, oświetleniowych i powierzchniowych możliwe jest wyznaczenie funkcji i cech statystycznych z wyizolowanego pola powierzchni obrobionej. Takie interpretowanie danych z powierzchni obrobionej zaliczane jest do zadań odwrotnych, gdzie wyznaczenie wartości nierówności powierzchni i parametrów określa się z uzyskanego obrazu. Dla otrzymania poprawnych wyników akwizycja obrazów musi być przeprowadzona przy ustalonych wcześniej założeniach. Niedotrzymanie tych wymagań powoduje, że uzyskuje się różne obrazy struktury geometrycznej powierzchni do czego przyczyniają się zjawiska optyczne takie jak, samozacienienia powierzchni lub odbicia wektorowe [ŁUK 01].

Badania opisane przez CIRP (College International pour la Recherche en Productique) i ASME (American Society of Mechanical Engineers) w latach 1998 do 2004 dowiodły, że prawie 100% przedsiębiorstw wykorzystuje w pierwszej kolejności parametr *Ra* do kontroli jakości powierzchni obrobionych. Rzadziej uwzględniane są pozostałe parametry *Rz* (85%), *Rt* (60%), *Rp* (30%). Inżynierowie uważają, że parametr *Ra* jest najbardziej funkcjonalny w ocenie chropowatości powierzchni. O wiele rzadziej stosowane są pozostałe parametry *Rq*, *Rsk* oraz *Rt* [JAN 06], [OCZ 08], chociaż są to dane tworzone przez profilometry podczas pomiaru. Należy sądzić, że wiedza dotycząca ich interpretacji jest niewielka wśród kadry inżynierskiej.

Współcześnie do identyfikacji i opisu chropowatości powierzchni obrobionej wykorzystuje się coraz więcej metod numerycznych lub statystycznych [KOW 01]. Dotyczy to przetwarzania obrazów cyfrowych, optyki mikroskopowej, urządzeń ze stykową końcówką pomiarową [ŻEB 98], [COL 07],

wielopunktową, tarciową, przenikania warstw, interferencji [KAC 99], przekroju świetlnego, reflektometrii, dyfrakcji, kontrastu plamkowego, optycznej, profilometrycznej, elektrycznej, aktywnej, pneumatycznej, za pomocą replik i stereometrii powierzchni [NOW 91], [ŁUK 01].

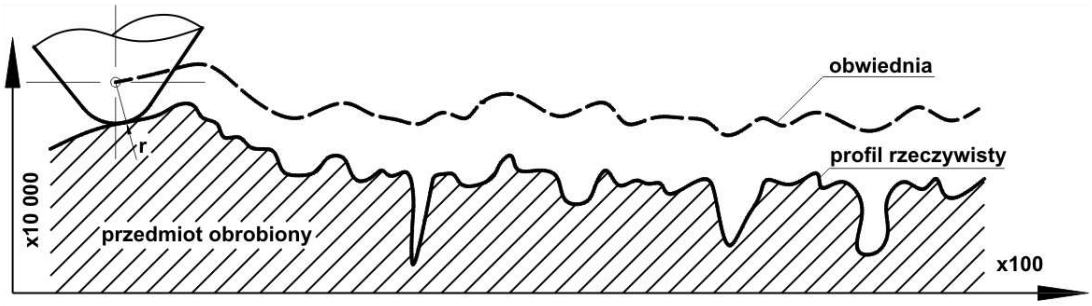
Zdefiniowano w normie [DIN4760] właściwości *SGP* w sześciu klasach opisanych na rysunku 2.54. Pierwsza i druga klasa definiują ukształtowanie, płaskość, kolistość i falistość powierzchni, które pochodzą od błędów geometrycznych obrabiarki, deformacji powierzchni obrobionej, wibracji, niejednorodności powierzchni obrobionej oraz niedokładności mocowania i ustawienia narzędzia.



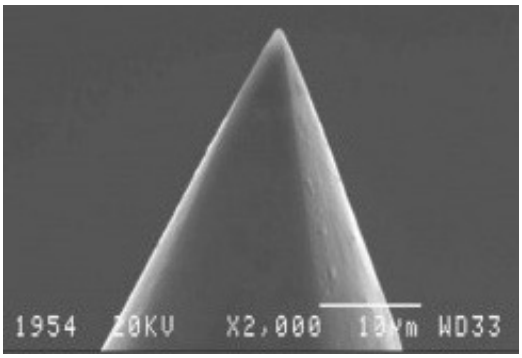
Rys. 2.54. Typowe odchylenia od powierzchni nominalnej [BEN 02], [BEN 03], [ŻEB 04], [COL 07]

Trzecia i czwarta klasa opisuje występowanie okresowych wgłębień, które zależą od geometrii krawędzi skrawającej, stanu ostrza, formowania wióra i kinematyki procesu. Piąta klasa odnosi się do materiałowej struktury powierzchni obrobionej, która zależy od mechanizmów fizyko – chemicznych [BEN 02], [BEN 03], [ŻEB 04].

Stykowe pomiary to rezultat przesuwania się igły pomiarowej, która w tym czasie wykonuje ruch pionowy odwzorowując wierzchołki i zagłębienia profilu jak pokazano na rysunku 2.55. Dane wychylenia końcówki przetwarzane są na sygnały pomiarowe z wykorzystaniem różnych czujników lub detektorów, które po wzmocnieniu są rejestrowane. Końcówka pomiarowa ma niewielki promień zaokrąglenia *r* (rys. 2.56), który jest w tym sensie dolnoprzepustowym filtrem i podczas pomiaru pomija mniejsze elementy profilu chropowatości. W efekcie uzyskujemy jego obwiednię ruchu przemieszczającej się końcówki pomiarowej [ŁUK 01]. W metodach stykowych można zaobserwować pod mikroskopem skaningowym ślady na powierzchni mierzonej po przejściu poruszającej się końcówki diamentowej. Nierówności powierzchni są zatem pewnym wynikiem zależnym od jej ruchu, od jego promienia ostrza, plastyczności podłoża i stabilności układu profilometru [DĘB 90], [ŁUK 01], [KUM 05], [TIA 07].

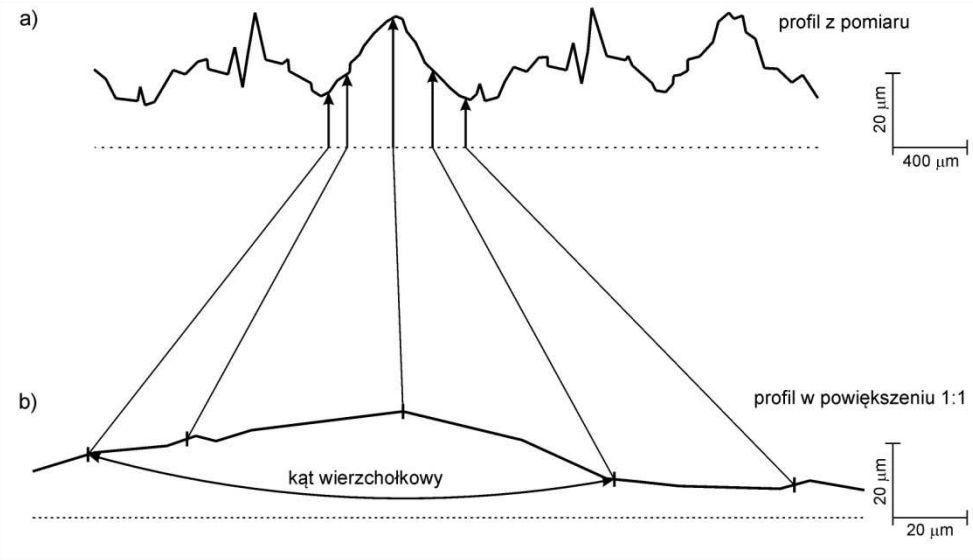


Rys. 2.55. Pomiar chropowatości powierzchni metodą stykową [WIE 03]



Rys. 2.56. Kształt końcówki pomiarowej

Charakterystyczne jest, że na profilometrach stosowane powiększenia poziome 100 razy i pionowe 10000 razy, przedstawiają mocno zafałszowane obrazy kształtów nierówności (rys. 2.57a).



Rys. 2.57. a) Obraz nierówności powierzchni b) i po przeskalowaniu do skali 1:1 [ŻEB 04]

W wyniku przeskalowania zarysu odwzorowania powierzchni do skali 1:1 otrzymuje się zupełnie odmienny profil o prawie płaskim przebiegu, zawarty pomiędzy kątami wierzchołkowymi o wartościach powyżej 160° (rys. 2.57b) [ŻEB 04].

2.3.2. Charakterystyka chropowatości *3D*

Coraz częściej w metrologii, trójwymiarowa struktura geometryczna powierzchni *SGP*, określana jest terminem „topografia powierzchni" [STO 94-1], [BLU 03], [PAW 04]. We Francji stosuje się termin morfologia (biol.), „morfologia powierzchni" i dotyczy opisu budowy organizmów zwierzęcych i roślinnych.

Definicja topografii brzmi następująco - jest to dział geodezji zajmujący się wykonywaniem zdjęć topograficznych w celu sporządzania map topograficznych. Topografia terenu jest to zespół zewnętrznych cech terenu: jego rzeźby, zadrzewienia, cieków wodnych, dróg, zabudowy [PAW 04].

W skrawaniu profil nierówności uzyskany jest z powierzchni obrobionej i jest obrazem *2D*, rejestrowany tylko w dwóch kierunkach *X*,*Y*. W przypadku opisu trójwymiarowego *3D*, istnieje możliwość dokładniejszego jej przedstawienia. Obecnie *3D* wykorzystywany jest do oceny kierunkowości *SGP* [PAW 04] i przydatny do oceny powierzchni [WIE 04]. Większość pojęć charakteryzujących topografię powierzchni została zaczerpnięta z opisu dwuwymiarowego [WIE 04].

W analizie topografii powierzchni wyróżnia się następujące miary [WIE 09]:

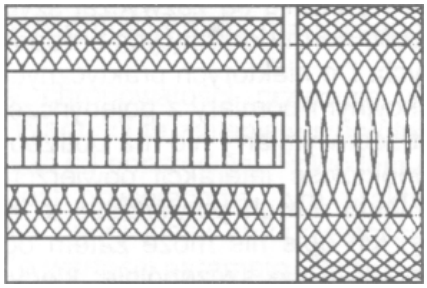
- pomiaru,
- oceny powierzchni z wykorzystaniem parametrów,
- prezentacji powierzchni.

Ostatecznie strukturę geometryczną powierzchni *SGP* określa się jako powtarzające lub losowe odstępstwa od powierzchni nominalnej, które tworzą trójwymiarową topografię powierzchni. "Topografią powierzchni nazywa się zatem ogólny geometryczny opis jej nierówności będących odstępstwami od powierzchni nominalnej" [WIE 04], który jest wiernym odbiciem śladów na powierzchni obrobionej w procesie wytwarzania [WIE 09].

Autor rozprawy rozumie to pojęcie następująco, że topografia powierzchni obrobionej to wynik wzajemnego oddziaływania z zużytymi obszarami powierzchni przyłożenia w otoczeniu naroża z uwzględnieniem *SGP*, falistości, błędu kształtu oraz zauważalnych elementów "bocznych wypływek" ("side flow"), które można obserwować, mierzyć i wykorzystać w monitorowaniu.

Obecnie zdefiniowano 24 parametry do statystycznego opisu powierzchni *3D* i są to wytyczne opracowane w firmach. Do dzisiaj nie ma normy dotyczącej pomiarów topografii powierzchni w ujęciu *3D* [OCZ 08].

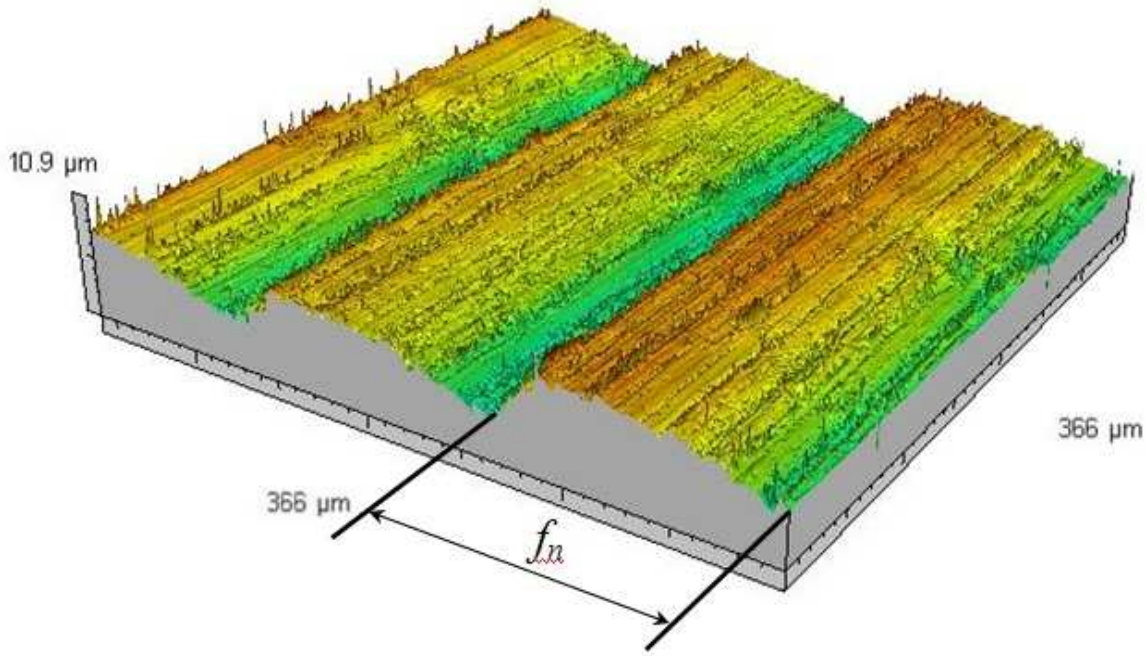
W literaturze wzmiankuje się, że rzeczywisty kontakt powierzchni we wzajemnym styku, według różnych badań nie przekracza 1% powierzchni nominalnej i z zasady jest bardzo mały. Ślady na powierzchni układają się w charakterystyczny sposób pokazany na rysunku 2.58. Zetknięcie wzorcowej, przykładowej powierzchni z przeciw wzorcem o takiej samej strukturze śladów uzasadnia tak niewielki kontakt.



Rys. 2.58. Modelowy przykład powierzchni po frezowaniu [CIE 05]

Próbki z pomiaru nierówności powierzchni wykazują zupełnie różne przekroje. Wprowadzenie zapisu topografii powierzchni przybliża do racjonalizacji technologii jej obróbki w ciągu operacji.

Według *PN* dla profilu *2D* wyznacza się linię średnią, a w analizie *3D* układem odniesienia jest to płaszczyzna średnia. Dla opisu cech stereometrycznych chropowatości stosowane jest dodatkowe oznaczenie. Przykładowe *Ra* oraz parametr stereometryczny *Ra-3D* przedstawiono na rysunku 2.59 [KAC 86], [NOW 91], [KAC 94], [KOW 01].



Rys. 2.59. Przykład zapisu profilu powierzchni po frezowaniu w układzie *3D*

Na długości odcinka pomiarowego 366 μm, widoczne są ślady przemieszczania kolejnych dziesięciu ostrzy frezu po powierzchni obrobionej. W układzie *3D* są wyróżnione prawie trzy fragmenty oznaczone jako f_n. Rozkład położenia wierzchołków, czyli bicia czołowego, tworzy także charakterystyczne obrazy.

Brakuje możliwości porównań danych z trójwymiarowego pomiaru chropowatości powierzchni z wartościami liczbowymi dwuwymiarowych parametrów profilu. Tylko niektóre z nich dają się dostosować do opisu trójwymiarowego i są to wartości średnie i odchylenia standardowe, ale wciąż trwają prace nad stworzeniem przydatnych nowoczesnych metod obliczeniowych, wyróżniających

nieznane dotychczas parametry chropowatości powierzchni.

Za najistotniejsze cechy chropowatości trójwymiarowej uznaje się wysokość wierzchołków, udział materiałowy liczony dla całej powierzchni, gęstość i promienie krzywizny wierzchołków oraz stopień niejednorodności ich rozmieszczenia. Parametry zdefiniowano w czterech podstawowych grupach: amplitudowe, przestrzenne, mieszane i funkcjonalne. Anizotropię charakteryzuje współczynnik wyglądu tekstury oraz współczynnik kierunkowości tekstury powierzchni.

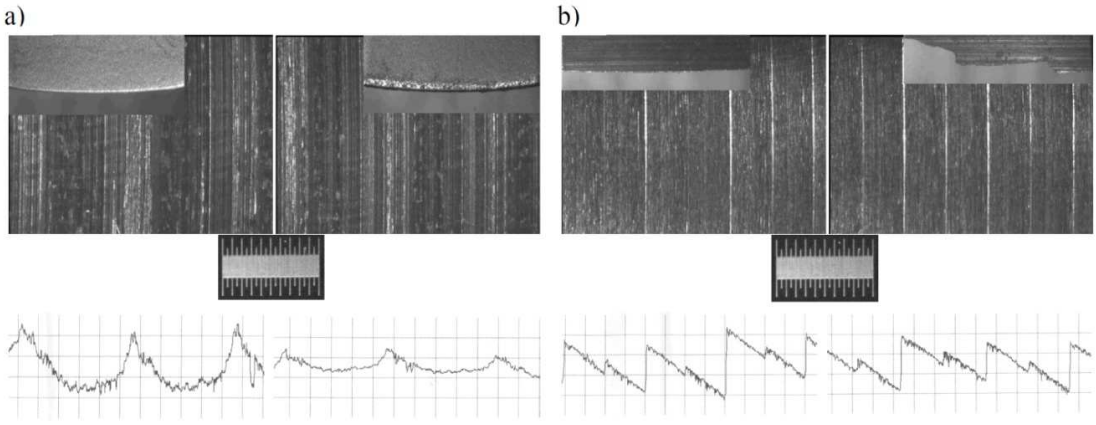
2.4. Monitorowanie powierzchni obrobionej

Od kilkudziesięciu lat wzrasta umiejętność i dostęp do inżynierskich zastosowań komputerów i ich oprogramowania. Podłączenie do komputerów systemów optycznych stworzyło nowe rozwiązania, które można uznać za układy mikroskopii optycznej. Zastosowanie technik cyfrowych do przetwarzania danych z pozyskanych obrazów optycznych powierzchni obrobionych to tworzenie ich cyfrowych reprezentacji.

Wymagało to opracowania nowych metod w ocenie chropowatości powierzchni [ŁUK 01], [ŁUK 02], silnie zintegrowanych z technikami komputerowymi [ŻEB 98], [SCH 06], [AL-K 07], [TIA 07]. Jedną z nich jest metoda pomiaru za pomocą bezstykowych układów optycznych [STO 94] zwana machine vision - „widzeniem maszynowym" [REI 05], [KUM 05], [PRI 07]. Metody bezstykowe, wykorzystuje się w nowoczesnych systemach kontrolno - pomiarowych pracujących w cyklu automatycznym on-line w ramach „aktywnej kontroli" [NOW 91], które znacznie skracają czas obróbki i zmniejszają straty spowodowane przerywaniem procesu produkcyjnego.

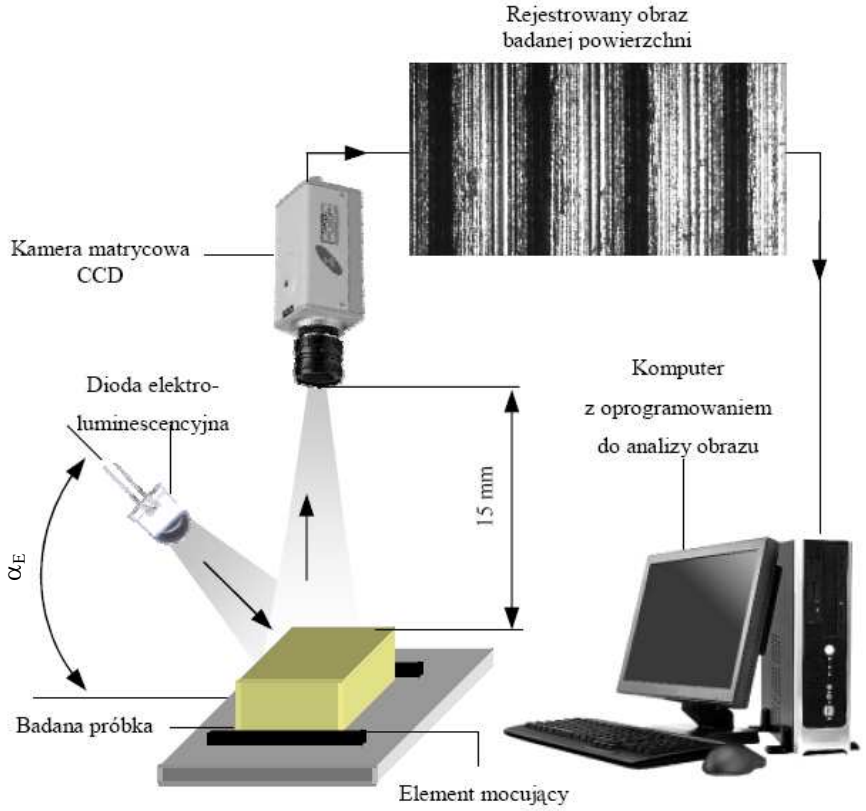
Z badań własnych stwierdzono, że w metodach optycznych poważny wpływ na jakość pozyskiwanych obrazów ma odpowiedni dobór źródła światła. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w optyce rozdzielczość obrazu zależy od natężenia oświetlenia. Im większe natężenie strumienia światła tym lepsza jest zdolność rozróżniania szczegółów. Oświetlając powierzchnię uzyskuje się odbicie i rozproszenie fali światła, które przebiega w sposób odbicia zwierciadlanego i dyfrakcyjnego od powierzchni chropowatej [STO 94], [ZAW 95]. W prowadzonych badaniach udało się rozwiązać ten tak ważny problem. Zamiast wykorzystywać oświetlenie ogólne o natężeniu kilku tysięcy luksów zastosowano oświetlenie z miniaturowymi żarówkami LED o natężeniu oświetlenia w pełni wystarczającym [STO 07].

Na zakończenie tej części rozważań opisanych w dostępnej literaturze pokazano przykładowe obrazy cyfrowe powierzchni obrobionej pozyskanych z układu wizyjnego widoczne na rysunku 2.60. [ŻUR 05], [TIA 07], [ŻUR 08].



Rys. 2.60. Obrazy zużycia ostrza, powierzchni obrobionej po frezowaniu i profilu chropowatości dla a) stali 45, b) mosiądzu M059 [ŻUR 05]

W literaturze opisane są modele teoretyczne do identyfikacji nierówności na powierzchni: kryterium Rayleigha, dyfrakcyjne rozpraszanie światła teorii Kirchhoffa, teorie zaburzeń, rozpraszanie światła na powierzchniach okresowych, które wykorzystują zjawiska samozacienienia powierzchni i odbić wielokrotnych [ŁUK 01], [ŁUK 02],



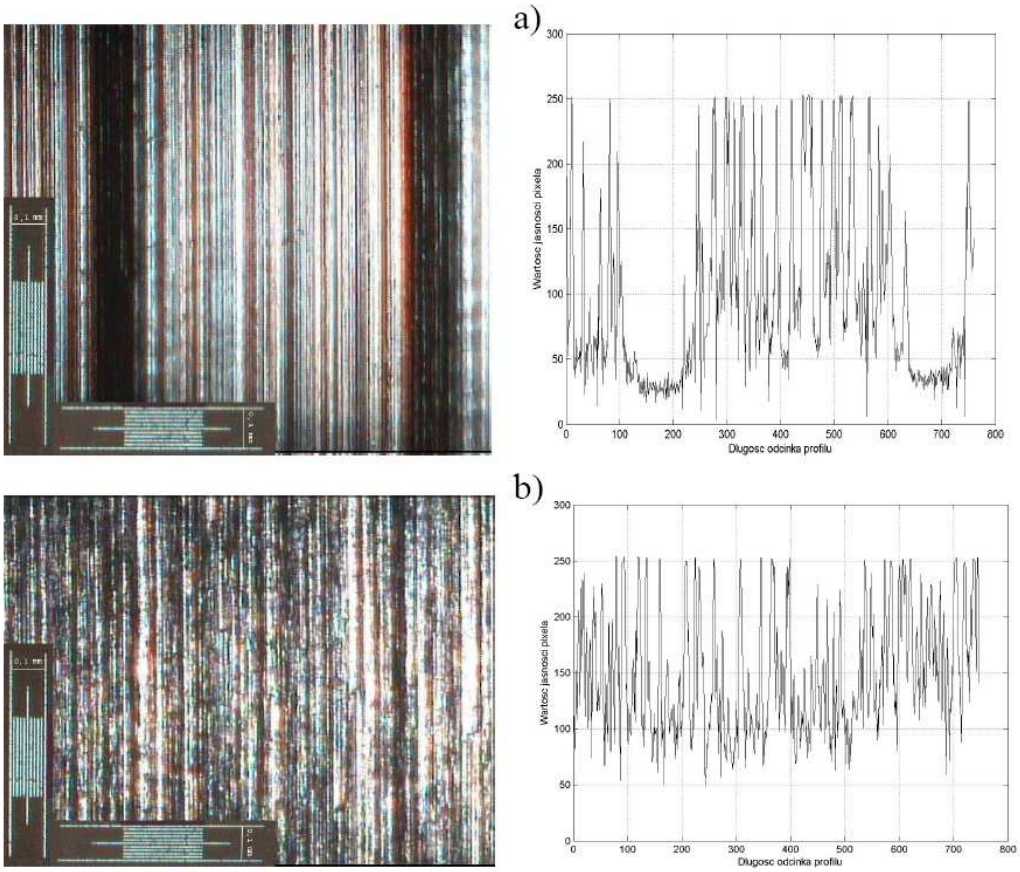
Rys. 2.61. Schemat stanowiska badawczego do rejestracji cyfrowych obrazów powierzchni frezowanych [STO 07], [KAP 08]

W jednej z prac do oceny nierówności powierzchni zaproponowano metodę, która wykorzystuje zjawisko tzw. samozacienienia powierzchni [ŁUK 01], [PAW 04], [BER 10].

Uzyskiwane obrazy obejmują zacienienia niektórych obszarów nierówności występujące przy dużym gradiencie funkcji opisującej powierzchnię czyli nierównościach o dużych zmianach. Możliwe to jest, gdy kąt padania wiązki światła na powierzchnię mieści się w zakresie α_E od 10° do 60° [KAP 08], [BER 10].

Zarejestrowane obrazy cyfrowe poddano przetwarzaniu z wykorzystaniem oprogramowania w środowisku Matlab. Przyjęta rozdzielczość i skala powiększenia obrazu umożliwiła oszacowanie rozmiaru pojedynczego piksela oraz liczby pikseli na odcinku samozacienienia. W ten sposób wyznaczano całkowitą długość z uwzględnieniem kąta padania światła, a tym samym wysokość nierówności powierzchni. Do akwizycji obrazów cyfrowych powierzchni zbudowano wizyjne stanowisko badawcze, którego schemat pokazano na rysunku 2.61. Badane powierzchnie oświetlano światłem monochromatycznym generowanym przez diodę elektroluminescencyjną LED. Przykładowe

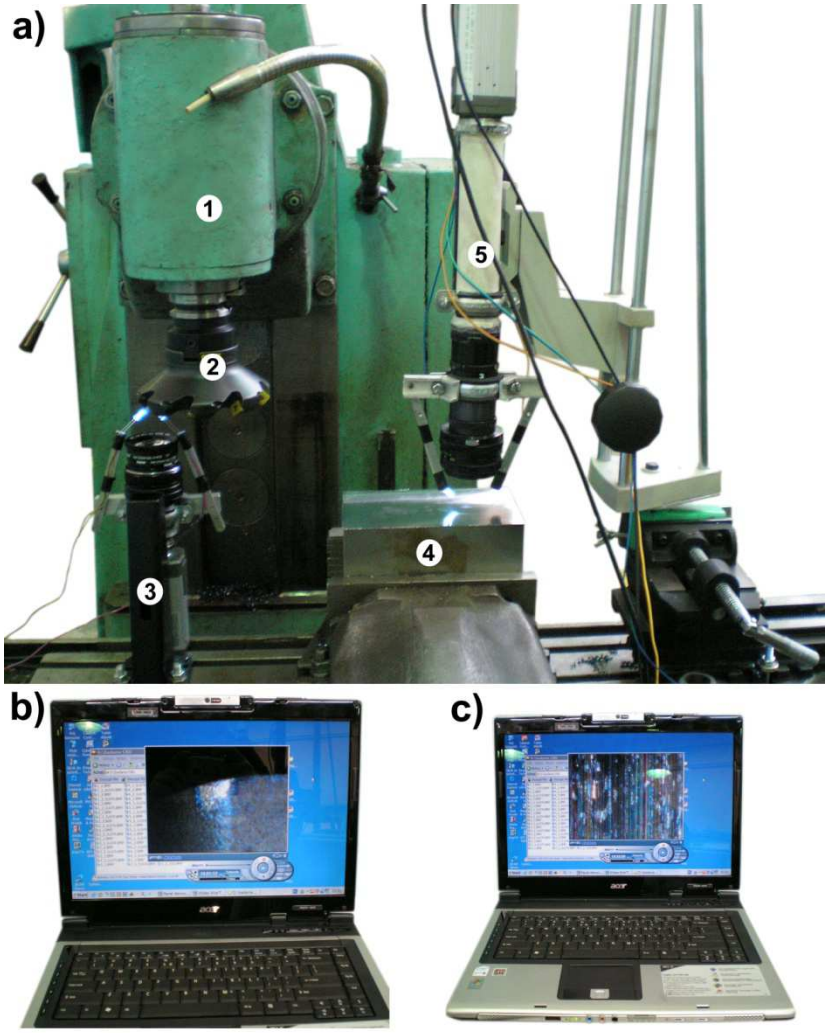
obrazy cyfrowe powierzchni z wyznaczoną reprezentacją rozkładu intensywności światła przedstawiono na rysunku 2.62. Wszystkie te metody wymagają jednak zdjęcia przedmiotu z obrabiarki i wykonanie ich obrazów powierzchni na specjalnych stanowiskach. Eliminuje to ich przydatność w warunkach przemysłowych. Są jednak poważnym przyczynkiem dla zrozumienia problemów struktury geometrycznej powierzchni po obróbce mechanicznej.



Rys. 2.62. Obrazy cyfrowe powierzchni po frezowaniu i reprezentacja rozkładu intensywności światła dla kąta oświetlenia $\alpha_E = 30°$ dla a) stali EN C45, b) mosiądzu EN CW612N [KAP 08]

Uzyskane wyniki z pomiarów laboratoryjnych wymusiły próbę do opracowania układów optycznych i systemów akwizycyjnych danych do monitorowania powierzchni obrobionej i zużycia ostrza po obróbce frezowaniem w warunkach warsztatowych [ŻUR 09].

Podstawowym elementem skonstruowanego stanowiska była frezarka pionowa (rys. 2.63a(1)) z zamontowaną głowicą frezową (rys. 2.63a(2)). Opracowano założenia i wykonano stanowisko badawcze z wykorzystaniem dwóch niezależnych układów optycznych, w skład których wchodziły dwie kamery cyfrowe. Każda z nich została wyposażona w przetwornik CCD, tubusy dystansowe, obiektywy i zestaw nakładek powiększających (rys. 2.63a(3), 2.63a(5)).



Rys. 2.63. Widok ogólny stanowiska pomiarowego [ŻUR 09]

Do oświetlenia powierzchni obrobionej lub powierzchni zużycia naroża ostrza w celu pozyskania cyfrowych ich przedstawień (rys. 2.63b, c) wykorzystywano dwustronne punktowe oświetlenie typu LED (rys. 2.63a(4)). Po zebraniu danych pomiarowych przetwarzano je za pomocą specjalnej karty do ich akwizycji i wyniki wyświetlano na monitorze komputera.

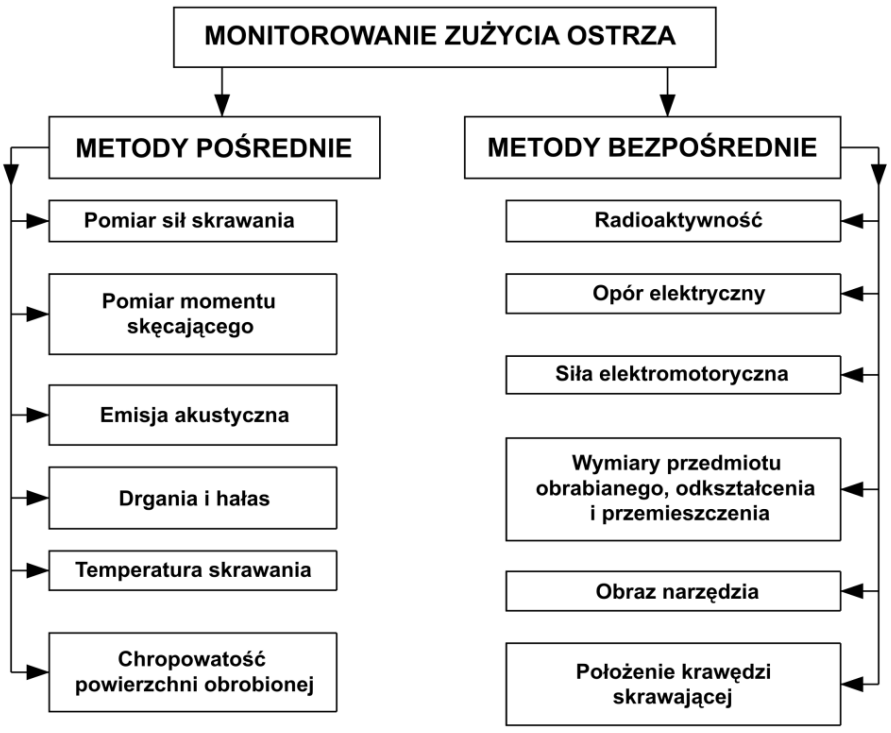
2.5. Monitorowanie ostrza skrawającego

Określona liczba ostrzy pozostawia na obrobionej powierzchni grupę śladów, po każdym obrocie narzędzia, w których zawarta jest informacja o zużyciu każdego z ostrzy oddzielnie. Wyróżnienie zużycia każdego z ostrzy ułatwia ocenę jego przydatności do pracy czyli monitorowanie przebiegu zużycia. Narzędzia, które są przedmiotem opisanych badań, to płytki wymienne o nowoczesnej, różnie ukształtowanej geometrii wierzchołka ostrza.

Rozwiązaniem może być zastosowanie nowoczesnych metod badań do wyjaśnienia zagadnień monitorowania powierzchni, a szczególnie zjawisk stykowych między roboczymi powierzchniami ostrzy oraz tworzoną powierzchnią.

2.5.1. Metody pośrednie i bezpośrednie w monitorowaniu

Charakterystyczna praca poszczególnych ostrzy, to obróbka przerywana i tylko chwilowy kontakt ostrzy z materiałem obrabianym, a tym samym zmienność wzajemnego oddziaływania z powierzchnią obrobioną. Powoduje to błędną ocenę lub jej zupełny brak, także w ocenie zużycia katastroficznego, wykruszenia lub złamania ostrza. Utrudnione jest przetwarzanie uzyskanych sygnałów, na przykład z pomiarów sił skrawania, emisji akustycznej czy drgań narzędzia w porównaniu z warunkami toczenia [KOS 96].



Rys. 2.64. Metody monitorowania ostrza [KOS 96]

W monitorowaniu i ocenie zużycia ostrza wykorzystuje się metody pośrednie i bezpośrednie (rys. 2.64). Metody bezpośrednie wykorzystują zjawiska zużycia ostrza i związane z tym zmiany struktury

geometrycznej powierzchni. Metody pośrednie bazują na skutkach spowodowanych zużyciem ostrza [KOS 96]. Metody oparte na pomiarze sił skrawania [SZA 06] i emisji akustycznej są natomiast stosowane w warunkach przemysłowych. Nie spełniają jeszcze oczekiwań i dlatego ciągle trwają prace badawcze mające na celu opracowanie systemu, który zostanie zastosowany w praktyce. Inne metody rzadko są stosowane i mają raczej ograniczony charakter [JEM 02], [JEM 04], [SZA 06].

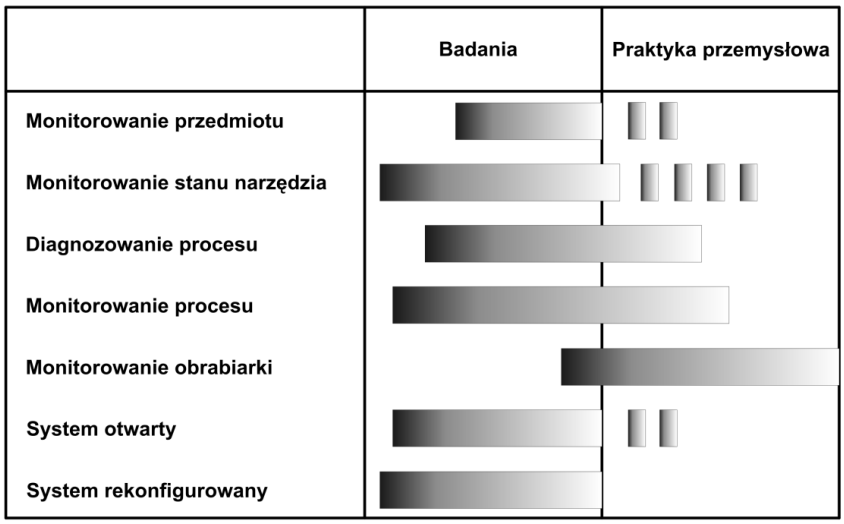
Bezpośrednie metody do oceny stanu ostrza jak radioaktywności, indukcyjności i oporu elektrycznego są metodami przestarzałymi, ich zastosowanie ograniczają zalecenia BHP lub użycie specjalnie przygotowanych narzędzi [JEM 04].

Metody dotykowe i optyczne znajdują coraz szersze zastosowanie i z powodzeniem są wykorzystywane w wersji przemysłowej. Sprawiają one inne trudności techniczne, związane z rejestracją obrazów w strefie obróbki jak i przygotowaniem ostrza do pobierania ich obrazów. Mowa jest tutaj o pozostałościach cieczy obróbkowych na powierzchniach ostrzy, a pomiar wymaga przerwy lub zakończenia obróbki [KOS 96].

2.5.2. Monitorowanie zużycia ostrza

Obniżenie kosztów wytwarzania w zautomatyzowanej obróbce wiórowej, które stanowią o konkurencyjności wyrobu na rynku, wymusza stosowanie monitorowania stanu narzędzia i prognozowania statystycznej trwałości ostrza [LAN 01].

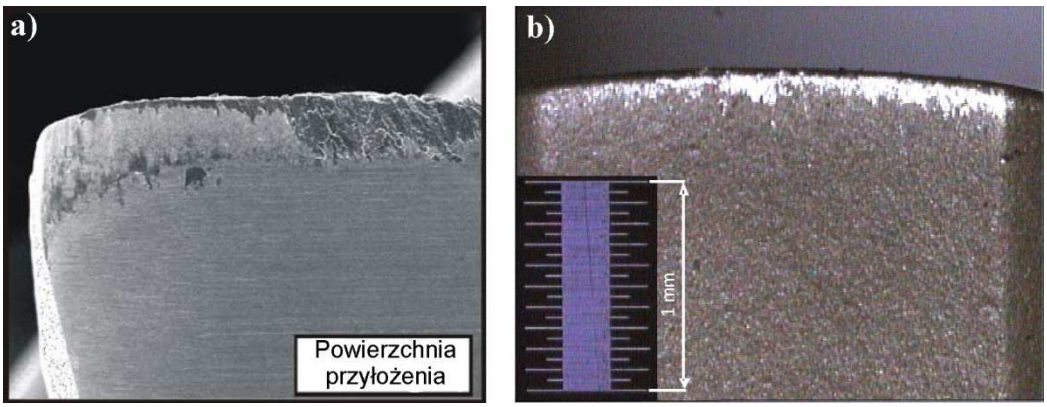
Identyfikacja wskaźników zużycia ostrza stwarza wiele problemów w monitorowaniu narzędzia skrawającego. Wynika to z utrudnienia obserwacji ostrza w strefie pracy narzędzia [SZA 06]. Dla wykonania pomiaru widocznych powierzchni zużycia konieczne są przerwy w pracy narzędzia [CIC 06]. Widoczne jest, że rozwój monitorowania i diagnostyki w badaniach stanu narzędzia, procesu czy obrabiarki (rys. 2.65) wymusza dokładniejsze poznanie zjawisk fizycznych, które występują w strefie obróbki [SZA 04].



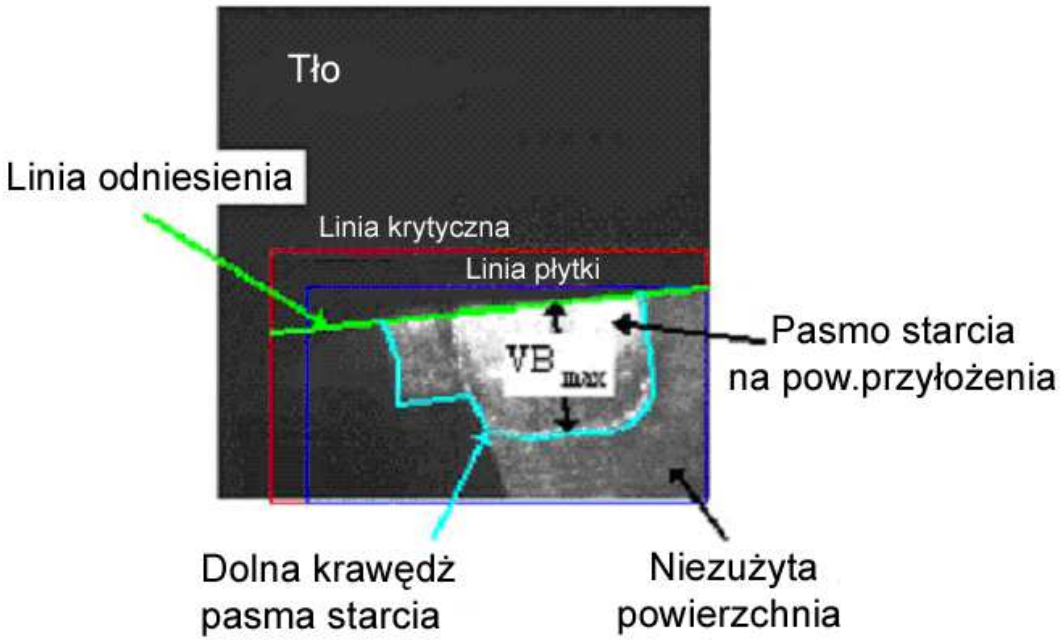
Rys. 2.65. Stosowanie monitorowania w wytwarzaniu [SZA 04]

Nieuniknione jest, że w procesach wytwarzania, oprócz monitorowania stanu ostrza i procesu skrawania konieczne jest uwzględnienie kosztów wynikających z udziału pracownika i oczekiwań stawianych jakości wyrobów [JEM 98].

W metodach bezstykowych monitorowania ostrza, wykorzystuje się zautomatyzowane systemy wizyjne pozyskujące cyfrowe reprezentacje powierzchni, przez zastosowanie układów optycznych [STO 06] sprzężonych z przetwornikiem CCD. Akwizycja cyfrowych obrazów odbywa się przy pomocy programów i kart pomiarowych [KAN 04], [WAN 05], [WAN 06]. Nowością w pomiarach cyfrowych monitorowania procesu frezowania jest wykorzystanie analizy cyfrowej obrazów, dzięki wcześniejszemu zdefiniowaniu zjawisk obserwowanych na powierzchniach zużytego naroża (rys. 2.66, rys. 2.67).



Rys. 2.66. Obrazy cyfrowe zużycia ostrza na a) powierzchni przyłożenia [KIS 05], b) powierzchni dogładzającej A_{bs} [ŻUR 06 - 1]



Rys. 2.67. Zdefiniowanie podstawowych wskaźników zużycia ostrza na obrazie cyfrowym [WAN 06]

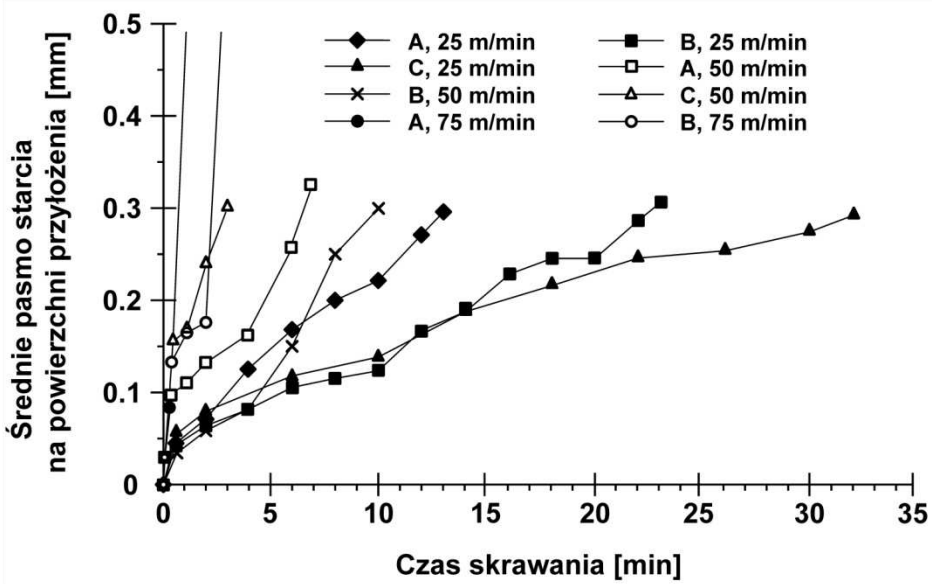
Podczas badań monitorowania zużycia ostrza do oświetlenia obszaru badawczego stosowane są, światłowody [KAN 04], [WAN 05], [WAN 06], lasery [STO 94], [JEM 98], [LAN 01], diody elektroluminescencyjne typu LED [PFE 00], [ŻUR 06 - 1], [ŻUR 06 - 2]. Dane zbierano za pomocą mikroskopów narzędziowych, elektronowych i skanujących [ALA 95-1], [D'ER 97], [DIN 99], [GUJ 99], [BEL 01], [JAW 01], [RAH 02], [LIU 03], [DRA 04], [GHA 04], [ASL 05], [CAM 05], [KIS 05], [GAN 06].

Monitorowanie stanu ostrza wymaga, aby:

- nie może nastąpić kolizja pomiędzy elementami zestawu pomiarowego, a realizacją skrawania,
- konieczne jest szybkie i proste włączanie i wyłączanie elementów pomiarowych w czasie obróbki,
- rozwiązanie powinno także stwarzać warunki elastyczności wykonania pomiaru zużycia dla wielu narzędzi,
- interface użytkownika powinien określać wybrane wskaźniki zużycia ostrza [GAW 98].

Monitorowanie zużycia ostrza zazwyczaj dotyczy pomiaru na głównej powierzchni przyłożenia i powierzchni natarcia. Pomiary te, określają pasma starcia VB_B lub VB_{max} oraz wielkości wytarcia krateru powstałego w wyniku tarcia wióra o powierzchnie natarcia [DIN 99], [PRI 99], [LOP 00], [PFE 00], [BEL 01], [RAH 02], [LIU 03], [DRA 04], [RIC 04], [ASL 05], [CAM 05], [KAN 05], [KIS 05], [WAN 05], [GAN 06], [LI 06], [WAN 06].

Przykładowe wyniki zużycia ostrzy opisywane jako wartości uśrednione *VB*, wszystkich płytek wymiennych zamocowanych w głowicy frezowej przedstawiono na rysunku 2.68.

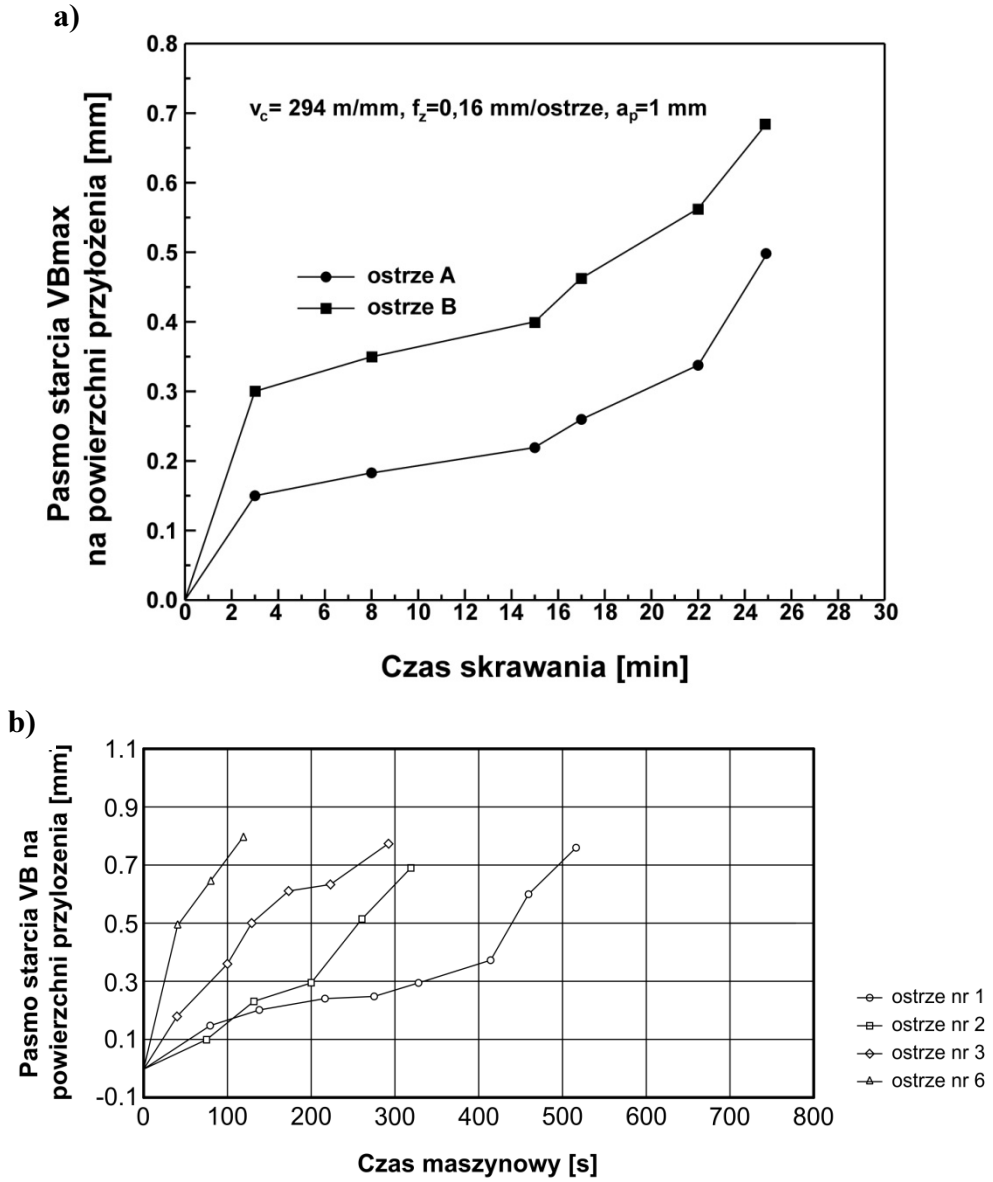


Rys. 2.68. Rozwój średniego starcia *VB* na powierzchni przyłożenia [JAW 01]

W realizowanych badaniach wykorzystano głowicę frezową o średnicy 63 mm z liczbą ostrzy 3. Płytki skrawające były wykonane ze spieków twardych. Po przeprowadzeniu badań przykładowe

przebiegi zużycia *VB* na głównej powierzchni przyłożenia dla różniących się składem pierwiastków i pokrytych warstwą *TiN*, oznaczono literami A i B, a trzecią bez pokrycia jako C [JAW 01]. Skrawano z trzema prędkościami v_c = 25,50,75 m/min.

Spotyka się, że pomiar zużycia ostrza *VB* i VB_{max} ocenia się osobno dla każdej płytki wymiennej (rys 2.69a) [LIU 05] lub wpływu liczby ostrzy (rys 2.69b) [RIC 04] w głowicy dla przyjętych warunków skrawania.



Rys. 2.69. Krzywe zużycia ostrzy na powierzchni przyłożenia dla a) dwóch [LIU 05], b) czterech ostrzy w głowicy frezowej [RIC 04]

W praktyce, do monitorowania stanu narzędzia stosuje się pośrednie metody pomiaru narzędzia. W metodach tych występuje większa swoboda wykonywania pomiarów niż w metodach bezpośrednich [PRI 99]. W warunkach przemysłowych oszacowanie zużycia ostrza odbywa się za pomocą procedur off line - nie na bieżąco. Są to pomiary objętościowe [HUA 99] i za pomocą optyki mikroskopowej.

Prowadzenie takimi metodami pomiarów zużycia ostrza jest precyzyjne i w ograniczonym stopniu kosztowne, ale co najważniejsze zakłóca proces technologiczny i pochłania dużo czasu przeznaczonego na obróbkę zmniejszając produktywność [GHO 07].

Systemy do kontroli zużycia ostrza oparte są na pomiarze wielkości fizycznych zaliczanych do metod pośrednich bazują na pomiarach temperatur i sił skrawania, emisji akustycznej i drgań, momentu skręcającego, postaci kształtu i barwy wióra [LIC 00], [PFE 00], [LAN 01-1], [SOR 03], [BOM 04], [SHA 04].

W literaturze tej doszukiwano się, że zmiany na powierzchniach przyłożenia płytek skrawający mają bezpośredni wpływ na parametry chropowatości warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej oraz dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu [CIC 06]. Gdyby wyznaczyć zależność wpływu parametrów chropowatości na wskaźniki zużycia VB lub VB_{max} to monitorowanie procesu skrawania zyskałoby na poważnym jego uproszczeniu. Poza przytaczaniem przedziałów wartości parametrów uzyskanych dla chropowatości w różnych prezentowanych publikacjach i danych z katalogów, brakuje w literaturze jednoznacznych odpowiedzi na takie związki. Postęp w rozwoju monitorowania stanu narzędzia, stosowanie coraz bardziej zaawansowanych technik pomiarowych w automatyzacji procesów wytwórczych, uzasadniał konieczność i próbę podjęcia się wyjaśnienia tego poważnego problemu.

Uogólniając monitorowanie (ang. monitoring) są to regularne, jakościowe i ilościowe pomiary lub obserwacje zjawisk. Sposób obserwacji jest zintegrowany, ciągły i długoterminowy, realizowany przez gromadzenie i przechowywanie danych dotyczących procesu wytwarzania.

2.6. Podsumowanie

Wychodząc z założenia, że zjawiska zużycia, które zachodzą w procesie skrawania pojedynczym ostrzem można przyrównać do pracy narzędziami wieloostrzowymi. Skrawanie i praca takimi narzędziami jest szeroko znana i opisana w literaturze krajowej i zagranicznej.

1. Większa część opracowań naukowych dotyczy analizy zużycia ostrza na głównej powierzchni przyłożenia zgodnie z normą PN-ISO 3685:1996 - badanie trwałości noży tokarskich punktowych. Podane w tej normie wskaźniki *VB* wykorzystuje się do określenia zużycia na ostrzach w narzędziach jedno jak i wieloostrzowych. Jednak same ślady wytarcia zmieniają się niejednoznacznie i przedstawiony dotychczas model zużycia ostrza nie podlegał ogólnym opisom.

2. Zróżnicowana trwałość każdego z ostrzy w narzędziach wieloostrzowych pozwala na ujawnienie tego, które osiągnie jako pierwsze dopuszczalne zużycie [CIC 06]. Dotyczy to głowic frezowych niezależnie od tego w ile ostrzy jest wyposażona. Prowadzi to do uniknięcia przypadku przedwczesnej wymiany nie w pełni zużytego narzędzia, co jest ekonomicznie nieuzasadnione [KOS 96].

3. Przy postępującym skracaniu wierzchołków, udział w skrawaniu biorą kolejne ostrza, a chropowatość powierzchni obrobionej statystycznie nie ulega zmianie. Wyróżnienie w ogólnym obrazie struktury geometrycznej powierzchni *SGP*, opis zachowania kolejnych ostrzy jest potwierdzającym wnioskiem w tej pracy.

4. Z badań wynika, że w przypadku narzędzi o zmodyfikowanej krawędzi powierzchni przyłożenia kilkakrotnie większej od posuwu, kolejne ostrza zagładzają ślady pochodzące ze styku poprzedzających. Widoczne jest więc, że zachowanie się płytek ze zmodyfikowanymi narożami i po uwzględnieniu bicia ostrzy, nie podlegają ogólnym opisom i należy przyjąć, że w fazie początkowej tylko jedno ostrze, najbardziej wysunięte, tworzy nierówności na powierzchni obrobionej [ŻUR 07].

5. Monitorowanie zużycia ostrza może być realizowane z wykorzystaniem optycznych stanowisk do akwizycji obrazów cyfrowych. Zazwyczaj prezentacja wyników przebiega dla głównej powierzchni przyłożenia ostrza lub natarcia, rzadziej dla pomocniczej powierzchni przyłożenia.

3. HIPOTEZA NAUKOWA PRACY

Po zrealizowaniu badań rozpoznawczych, faktach potwierdzonych w badaniach i ogólna wiedza pozwala sądzić o nierównomiernym zużyciu każdego z ostrzy w wyniku sumarycznych błędów ustalania i mocowania płytek wymiennych w głowicach frezowych i przeprowadzeniu analizy materiałów źródłowych sformułowano dwie następujące hipotezy pracy:

1. Dotyczącą monitorowania zużycia każdego z ostrzy w głowicy frezowej rozpatrywanej jako narzędzie wieloostrzowe – skrawanie przebiega równolegle i jednocześnie w identycznych warunkach dla wszystkich skrawających.

Możliwe jest monitorowanie zużycia każdego ostrza w głowicy frezowej za pomocą techniki cyfrowego przetwarzania obrazu zmian w otoczeniu jego naroża.

2. Związaną z mechaniką tworzenia struktury geometryczne powierzchni obrobionej – skrawanej w sposób sekwencyjny przez kolejne ostrza znajdujące się w różnych fazach zużycia.

Powierzchnie wytarcia na narożach powiększają się ale ich struktura geometryczna charakteryzuje się niewielką zmiennością podczas całego procesu skrawania i tego samego należy oczekiwać na powierzchni obrobionej.

4. ZAKRES I METODYKA BADAŃ

W badaniach powierzchni po frezowaniu do identyfikacji zmiennych użyto metod polegających na przetwarzaniu sygnałów niosących o niej informacje. Pozyskane sygnały elektryczne podawane były dalszej obróbce za pomocą techniki komputerowej.

Wprowadzenie do pomiaru przetwornika analogowo – cyfrowego wynika z potrzeby zapewnienia odpowiedniej dokładności oraz z potrzeby dostosowania postaci wyniku do warunków cyfrowego przetwarzania. Otrzymane wyniki pomiaru przedstawione były w formie wizualnej i w formie cyfrowej przydatnej do dalszej analizy.

Dla ustalonego przetwornika, istnieje możliwość zmian rozdzielczości urządzeń przez odpowiedni dobór powiększenia układu optycznego. Przy zbyt dużej zdolności rozdzielczej, ograniczone pole powierzchni obrazu optycznego w kamerze CCD, powoduje zmniejszenie wybranego pola widzenia na powierzchni przedmiotu.

4.1. Zakres i metodyka w badaniach wstępnych

Wstępne badania wpływu parametrów technologicznych na zużycie ostrza i zmianę wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej przeprowadzono na frezarce uniwersalnej FU 251 z wrzecionem pionowym. Narzędziem była głowica frezowa o średnicy 125 mm z liczbą ostrzy z = 8.

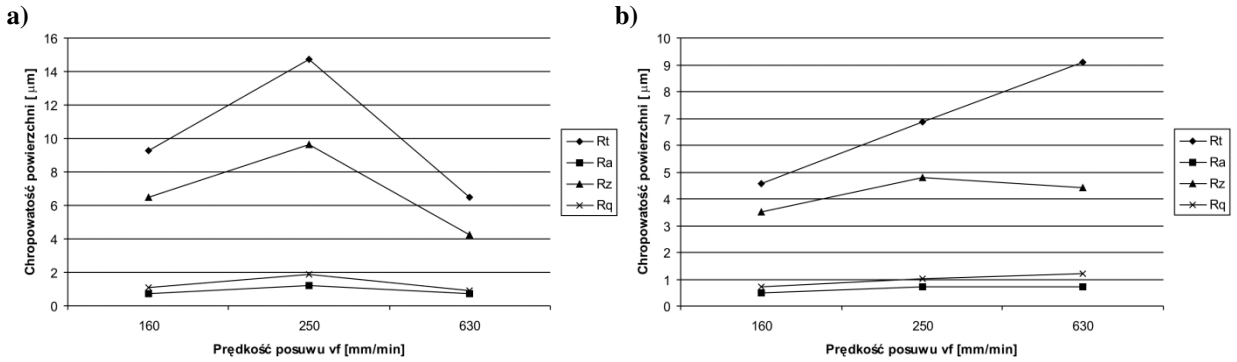
Zastosowano płytki wymienne R245-12 T3 M-PM 4030 (węgliki spiekane) do frezowania stali C45, natomiast do mosiądz VW612N, płytki wymienne R245-12 T3 E-AL H10 (cermetal). Frezowanie odbywało się "na sucho", bez użycia cieczy chłodząco-smarujących, a obrabiane płaskie powierzchnie miały wymiary 100x50 mm.

Po zapoznaniu z odpowiednią literaturą i danych zawartych w katalogach i poradnikach uznano, że optymalna trałowość ostrza z zachowaniem dobrej jakości powierzchni to prędkości skrawania około 200 m/min. Przyjęto następujące parametry obróbki (tab. 1).

Tabela 1. Parametry obróbki w badaniach wstępnych

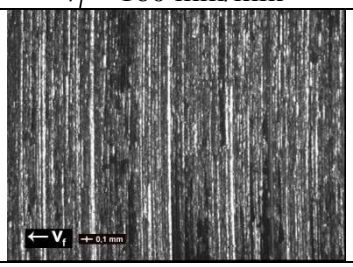
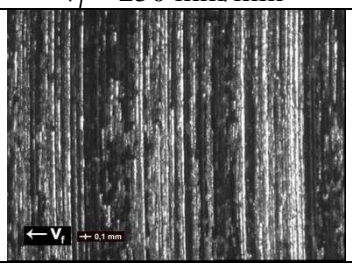
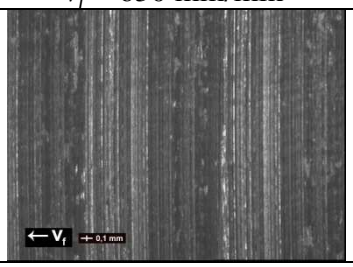
prędkość skrawania v_c, m/min	**głębokość skrawania a_p, mm**	**prędkość posuwu v_f, mm/min**
196	1,5	160 250 630

Badano parametry chropowatości *Rt*, *Ra*, *Rz* i *Rq* (rys. 4.1). Przy każdym pomiarze kompletowano dodatkowo obrazy cyfrowe powierzchni obrobionej (tabl. 1 i 3) i obrazy cyfrowe zużycia ostrza (tabl.2 i 4). Przykładowy zestaw dokumentów przedstawiono poniżej.

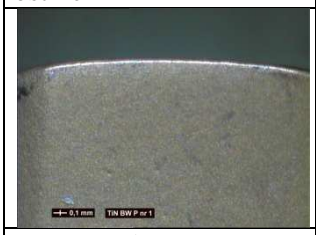
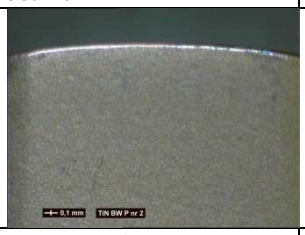
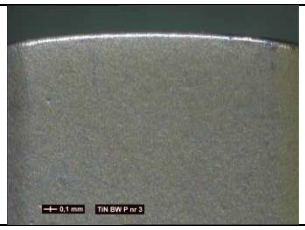


Rys. 4.1. Zależności parametrów chropowatości do prędkości posuwu v_f dla frezowania a) stali C45 i b) mosiądzu VW612N

Tablica 1. Obrazy cyfrowe powierzchni obrobionych po frezowaniu płytkami wymiennymi R245-12 T3 M-PM 4030

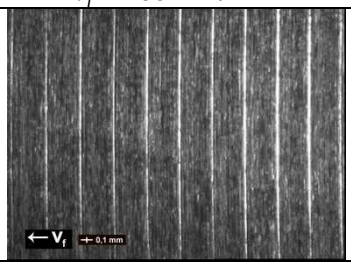
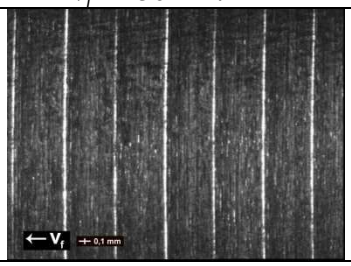
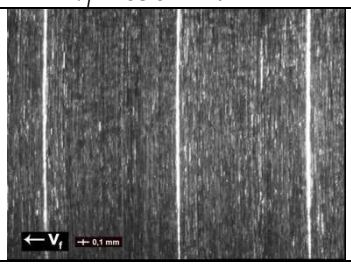
v_f = 160 mm/min	v_f = 250 mm/min	v_f = 630 mm/min
		

Tablica 2. Obrazy cyfrowe zużycia ostrza dla płytek wymiennych R245-12 T3 M-PM 4030

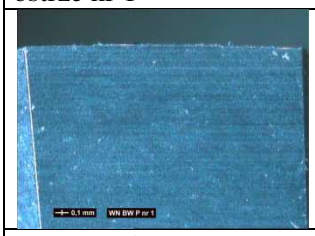
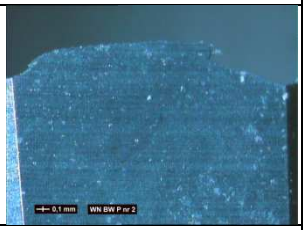
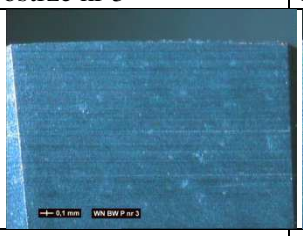
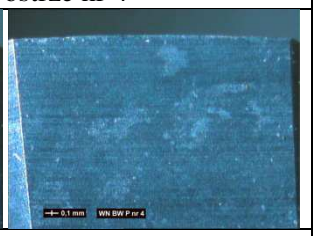
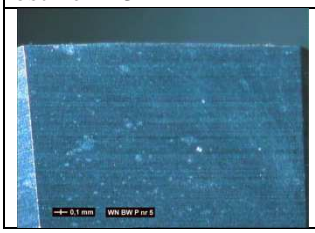
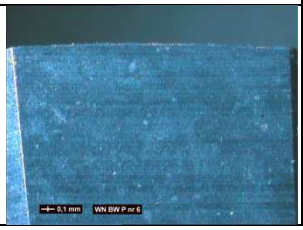
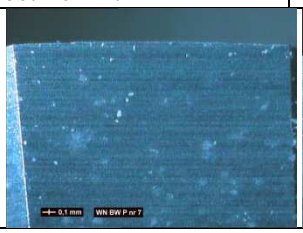
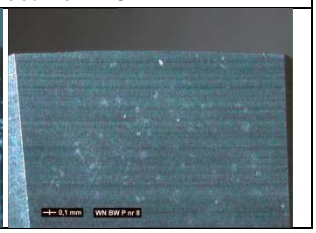
ostrze nr 1	ostrze nr 2	ostrze nr 3	ostrze nr 4
			
ostrze nr 5	ostrze nr 6	ostrze nr 7	ostrze nr 8

Po zarejestrowaniu obrazów cyfrowych 8 krawędzi przeprowadzonych na specjalnym stanowisku do monitorowania, obserwowano stopień zużycia na ostrzu nr 5 (tabl.2). W tym momencie, niewielkie ślady zużycia zaczęły pojawiać się na ostrzu nr 6. Na pozostałych ostrzach zużycie nie wystąpiło. Przyczyną tego jest fakt, że płytka nr 5, jako pierwsza rozpoczęła pracę skrawania i to ona frezowała materiał przez najdłuższą drogę.

Tablica 3. Obrazy cyfrowe powierzchni obrobionych po frezowaniu płytkami wymiennymi R245-12 T3 E-AL H10

v_f = 160 mm/min	v_f = 250 mm/min	v_f = 630 mm/min
		

Tablica 4. Obrazy cyfrowe zużycia ostrzy płytkami wymiennymi R245-12 T3 E-AL H10

ostrze nr 1	ostrze nr 2	ostrze nr 3	ostrze nr 4
			
ostrze nr 5	ostrze nr 6	ostrze nr 7	ostrze nr 8
			

W badaniach, wykonanych przez ostrza z cermetalu R245-12 T3 E-AL H10, możliwe było zestawienie obrazów ośmiu ostrzy po frezowaniu. Dało się zauważyć, że na ostrzu nr 2 widoczne jest wyraźne wyłamanie krawędzi skrawającej, które nastąpiło przy pierwszym styku ostrza z przedmiotem obrabianym. Na pozostałych ostrzach nie zaobserwowano widocznego zużycia.

4.2. Zakres i metodyka w badaniach zasadniczych

1) Metodyka badań

W badaniach właściwych przyjęto opisaną poniżej metodykę badań.

1. Określenie wartości bicia czołowego i promieniowego na powierzchniach poszczególnych gniazd w głowicy frezowej.
   - powierzchni czołowej,
   - głównej powierzchni przyłożenia
   - pomocniczej powierzchni przyłożenia,
   - powierzchni czołowej z płytką podporową zamontowanej w gnieździe.
2. Przygotowanie płytek wymiennych i głowicy frezowej.
   - wyselekcjonowanie płytek wymiennych na stanowisku optycznym w celu wykrycia uszkodzeń, wyszczerbień, wyłamań,
   - montaż płytek wymiennych w głowicy frezowej,
   - uzbrojenie głowicy frezowej w uchwyt frezarski.
3. Wykonanie obrazów cyfrowych pomocniczej powierzchni przyłożenia ostrzy przed frezowaniem.
4. Montaż głowicy frezowej i uchwytu do wrzeciona frezarki pionowej.
5. Pomiary bicia czołowego płytek wymiennych za pomocą czujnika cyfrowego.
6. Próby frezowania dla przyjętych zgodnie z planem badań parametrów skrawania przedstawionymi w tabeli 2 i 3.

Tabela 2. Plan badań eksperymentalnych dla głowicy R245

SYMBOL GŁOWICY FREZOWEJ	R245		
PRĘDKOŚĆ POSUWU v_f [mm/min]	355	710	1120
DROGA SKRAWANIA L_s [m]	307 682 1189 1568 1813	1155 2311 3446 4044 4682 5320 5958 6596 7434 7553	286 503 660 787

Tabela 3. Plan badań eksperymentalnych dla głowicy R390

SYMBOL GŁOWICY FREZOWEJ	R390		
PRĘDKOŚĆ POSUWU v_f [mm/min]	355	710	1120
DROGA SKRAWANIA L_s [m]	180 345	123 181	285 736 1129 1837

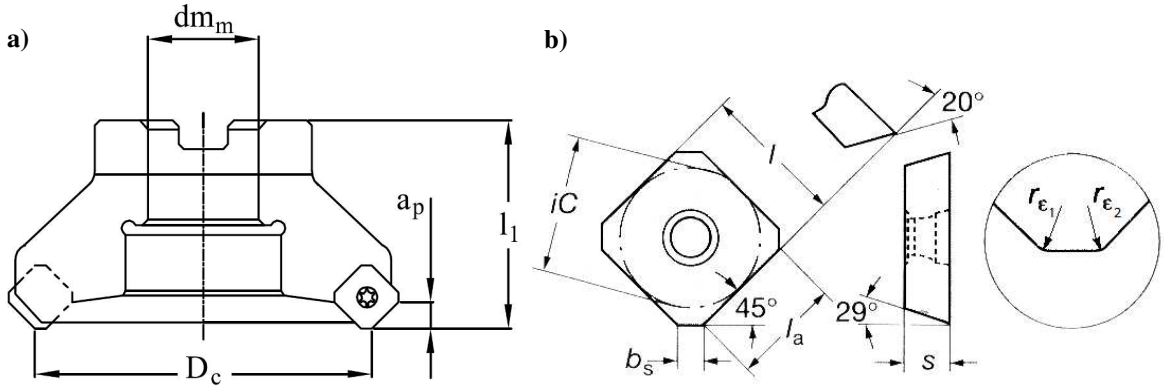
7. Demontaż głowicy frezowej i uchwytu do pomiaru zużycia ostrzy na cyfrowym stanowisku optycznym.
8. Demontaż materiału obrobionego i pomiar nierówności powierzchni dla wybranych parametrów chropowatości.

2) Oprzyrządowanie stanowiska badawczego

Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem następujących narzędzi i urządzeń:

1. Głowica frezowa R245-125Q40-12M (rys. 4.2a) o średnica D_c = 125 mm z liczbą ostrzy z = 8, gdzie; dm_m - średnica mocowania, a_p – maksymalna głębokość frezowania, l_1 – wysokość narzędzia z uwzględnieniem wysunięcia płytki wymiennej z korpusu, D_c – średnica skrawania. Geometrię ostrza zaprezentowano na rysunku 5.3.3b, gdzie b_s – długość powierzchni dogładzającej, l_a – czynna krawędź skrawająca, $l = iC$ – całkowita długość płytki, s – grubość płytki, r_ε - promień zaokrąglenia naroża ostrza.

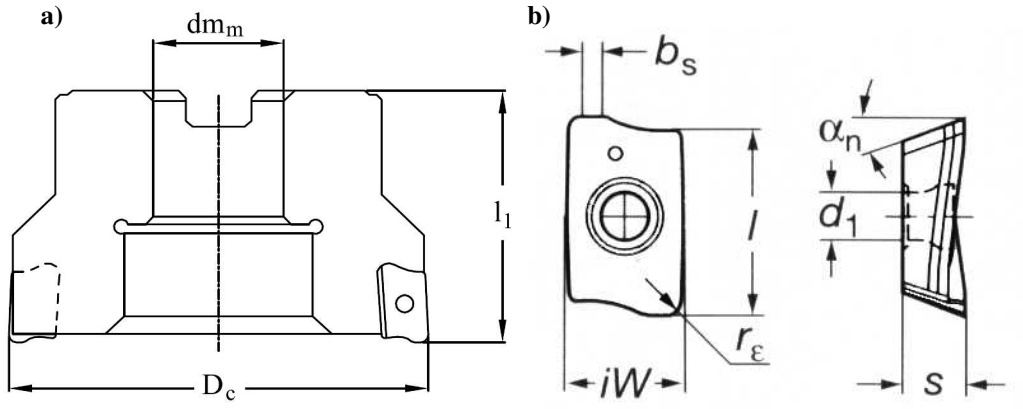
   Kąt natarcia powierzchni dna gniazda w głowicy frezowej $\gamma_n = 21°$.



Rys. 4.2. Wymiary głowicy frezowej R245 a) i geometria płytki wymiennej z powierzchnią dogładzającą b_s b) [NAR 09]

2. Głowica frezowa R390-125Q40-17M (rys. 4.3a) o średnica D_c = 125 mm z liczbą ostrzy z = 8, gdzie; dm_m - średnica mocowania, l_1 – wysokość narzędzia z uwzględnieniem wysunięcia płytki wymiennej z korpusu, D_c – średnica skrawania z wykonaną przez producenta geometrią ostrza b_s – długość powierzchni dogładzającej, l – czynna krawędź skrawająca, iW – całkowita długość płytki, s – grubość płytki, r_ε - promień zaokrąglenia naroża ostrza, d_1 – średnica otworu płytki, α_n – kąt przyłożenia.

   Kąt natarcia powierzchni dna gniazda w głowicy frezowej $\gamma_n = 13°$.



Rys. 4.3. Wymiary głowicy frezowej R390 a) i geometria płytki wymiennej z zaokrąglonym narożem r_ε b) [NAR 09]

3. Płytki wymienne R245-12 T3 M-PM 4030 (rys. 4.2b) z powierzchnią dogładzającą b_s z węglików spiekanych pokrywanych warstwą ochronną TiN.
   Główny oraz pomocniczy kąt przyłożenia κ_r; $\kappa_r' = 45^\circ$.
   Kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej $\lambda_s = 0°$.
   Promień zaokrąglenia naroża $r_\varepsilon = 0{,}8$ mm.
   Długość powierzchni dogładzającej $b_s = 2{,}1$ mm.
4. Płytki wymienne R390-17 04 20 E-PM 4240 (rys. 4.3b) z węglików spiekanych pokrywane warstwą TiN.
   Główny kąt przyłożenia $\kappa_r = 90^\circ$ oraz pomocniczy kąt przyłożenia $\kappa_r' = 0^\circ$.
   Kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej $\lambda_s = 12\text{-}20°$.
   Promień zaokrąglenia naroża $r_\varepsilon = 2$ mm.
   Długość powierzchni dogładzającej $b_s = 0{,}3$ mm.
5. Podporowe płytki wymienne z węglików spiekanych niepokrywane 5322 472-01.
   Klucz dynamometryczny 5680 086-06 z Moment dokręcający 3 Nm.
6. Trzpień krótki do głowic frezowych ISO40 392.5505-40 40 060A
   Cyfrowy czujnik zegarowy SYLVAC µS229 o dokładności pomiarowej 0,005 mm pracującym w zakres pomiarowy 12,5 mm.
7. Frezarka pionowa o mocy silnika 7,1 kW.
8. Profilometr TAYLOR HOBSON SURTRONIC 3P.
9. Kamera cyfrowa model CAM – 620C wyposażona w wyposażona w przetwornik 1/3" SONY SUPER HAD CCD z liczbą pikseli PAL: 752(H)×582(V), NTSC: 768(H)x494(V).
10. Kamera cyfrowa CCD Color model MTC-20261.
11. Karta pomiarowa IMAQ PCI – 1409.
12. Karta akwizycji obrazu AVer Media E501R.
13. Komputer klasy PC.

14. Tubusy redukcyjne do obiektywu.
15. Obiektyw fotograficzny o ogniskowej 52 mm.
16. Podstawy magnetyczne.
17. Diody elektroluminescencyjne typu LED.
18. Zasilacz prądy stałego.
19. Kątomierz z zamkniętą skalą z dokładnością ±30 minut i odczytem co 1°.
20. Stolik mikrometryczny o dokładności 0,01 mm.
21. Silnik krokowy o dokładności przesuwu 1,25 μm z śrubą drobnozwojna MF 10 o skoku gwintu P = 0,5 mm.
22. Silnik liniowy z maksymalnymi obrotami 5400 obr/min.
23. Sterowniki obrotów silnika i stolika z silnikiem krokowym.
24. Cyfrowy sterownik stolika krokowego z transferem sygnału 19200b/s i złączem RS232.
25. Luźne ścierniwo - pasta diamentowa DS 3/2 NO

3) Metodę przygotowana do badań narzędzi o modyfikowanej geometrii ostrzy opisano poniżej.

1. Montaż głowicy frezowej i uchwytu do wrzeciona frezarki pionowej.
2. Pomiar bicia czołowego płytek wymiennych z wykorzystaniem czujnika cyfrowego.
3. Wykonanie modyfikacji geometrii ostrza dla najbardziej wysuniętej i-tej płytki wymiennej w głowicy frezowej.
   a) montaż stanowiska do modyfikacji ostrza na stole frezarki pionowej,
   b) pomiar bicia promieniowego tarczy żeliwnej w stanowisku do modyfikacji ostrza,
   c) podłączenie sterowników obrotów silnika z tarczą żeliwną, stolika z silnikiem krokowym i kamery cyfrowej CCD do karty akwizycji obrazu
   d) nałożenie luźnego ścierniwa na tarczę żeliwną,
   e) osiowe ustawienie ostrza względem tarczy żeliwnej,
   f) szybki przesuw układu na odległość 1 mm od ostrza modyfikowanego,
   g) precyzyjny przesuw układu do ostrza modyfikowanego,
   h) monitorowanie kamerą cyfrową pierwszego kontaktu ostrza z luźnym ścierniwem,
   i) wykonanie modyfikacji ostrza,
   j) szybki przesuw i wycofanie układu do punktu początkowego,
   k) demontaż uzbrojonej głowicy i pomiar śladów modyfikacji na ostrzu.
4. Dokonanie frezowania dla określonych parametrów skrawania zgodnych z planem badań
   Plan badań eksperymentalnych dla głowicy R245mod (tab.4) i R390mod (tab.5);

Tabela 4. Plan badań eksperymentalnych dla głowicy R245mod

SYMBOL GŁOWICY FREZOWEJ	R245mod		
PRĘDKOŚĆ POSUWU v_f [mm/min]	355	710	1120
DROGA SKRAWANIA L_s [m]	189 315 630 946	189 315	100 200 260

Tabela 5. Plan badań eksperymentalnych dla głowicy R390mod

SYMBOL GŁOWICY FREZOWEJ	R390mod		
PRĘDKOŚĆ POSUWU v_f [mm/min]	355	710	1120
DROGA SKRAWANIA L_s [m]	126 189 315	95 189 315	100 200 300

5. Demontaż głowicy frezowej i uchwytu w celu pomiaru zmodyfikowanej powierzchni ostrza na cyfrowym stanowisku pomiarowym.
6. Demontaż materiału obrobionego i pomiar nierówności powierzchni po frezowaniu ostrzem modyfikowanym.

Do opracowania wyników badań wykorzystywano metody statystyczne. Wyznaczano minimalną liczbę prób dla estymacji średniej w populacji o rozkładzie normalnym dla przyjętego σ. Odchylenie standardowe σ nie przekraczało wartości 0,02. Dopuszczano ustalony wcześniej błąd na poziomie 0,01 przy poziomie ufności 99%. Wartość parametru standardowego Zα , błędu średniej odczytanej z tablic dla 1-α przy przyjętych parametrach wynosiła 2,58.

$$n = \frac{z_\alpha^2 \sigma^2}{e^2} \tag{3.1}$$

z_α – wielkość parametru standardowego błędu średniej odczytanej z tablic dla 1- α
e – ustalony wcześniej błąd
σ – odchylenie standardowe

Po podstawieniu do wzoru wyżej wymienionych parametrów otrzymujemy:

$$n = \frac{z_\alpha^2 \sigma^2}{e^2} = \frac{2{,}58^2 \cdot 0{,}02^2}{0{,}01^2} = 26{,}63 \tag{3.2}$$

Zatem do przeprowadzenia badań przyjęto liczbę pomiarów równa 27.

Dla każdej serii pomiarów zostały obliczone:

- wartość średnia,

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{3.3}$$

- odchylenie standardowe jednego pomiaru,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \tag{3.4}$$

- niepewność standardowa średniej arytmetycznej,

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{3.5}$$

- rozrzutu wyników pomiarowych,

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 \tag{3.6}$$

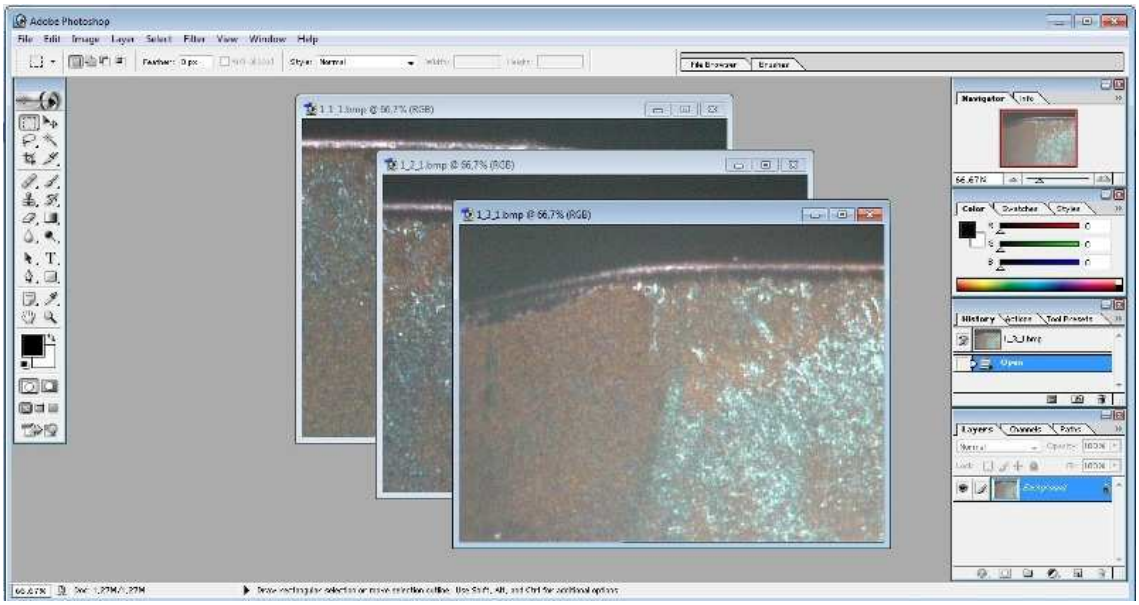
$$\Delta_2 = t\frac{s}{\sqrt{n-1}} \tag{3.7}$$

$$\Delta_1 = 0{,}01 \tag{3.8}$$

Δ - rozrzut wyników

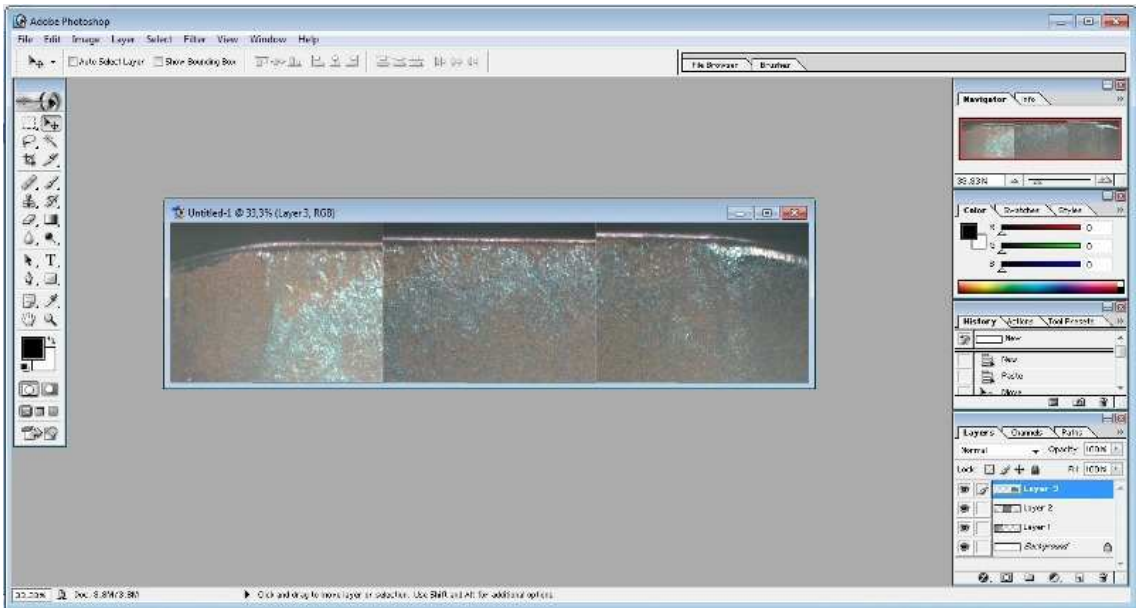
Δ_1- niepewność pomiarowa urządzenia

Akwizycję obrazów cyfrowych przeprowadzano dla kilku nakładających się części, obserwowanej powierzchni. W przypadku obrazu zużycia ostrza na przejściowej pomocniczej powierzchni przyłożenia b_s wykonywano dla niej trzy obrazy cyfrowe w okolicy wierzchołka naroża $r_{\varepsilon 1}$ i $r_{\varepsilon 2}$ oraz dla powierzchni dogładzającej b_s (rys. 4.4).



Rys. 4.4. Zilustrowanie trzech nakładających się fragmentów obrazów cyfrowych i-tego ostrza

Po wczytaniu nakładających się fragmentów z obrazów ostrza, przeprowadzano na komputerze takie ich złożenie aby widoczny był jego pełny obraz. W tym celu do specjalnie utworzonej ramki o wymiarach 820x210 mm wczytywano kolejne części obrazu cyfrowego ostrza. Wykorzystując dostępną funkcję przeźroczystości (opacity) poszukiwano takich samych punktów na dwóch kolejnych obrazach i dopasowywano cyfrowo (rys. 4.5).



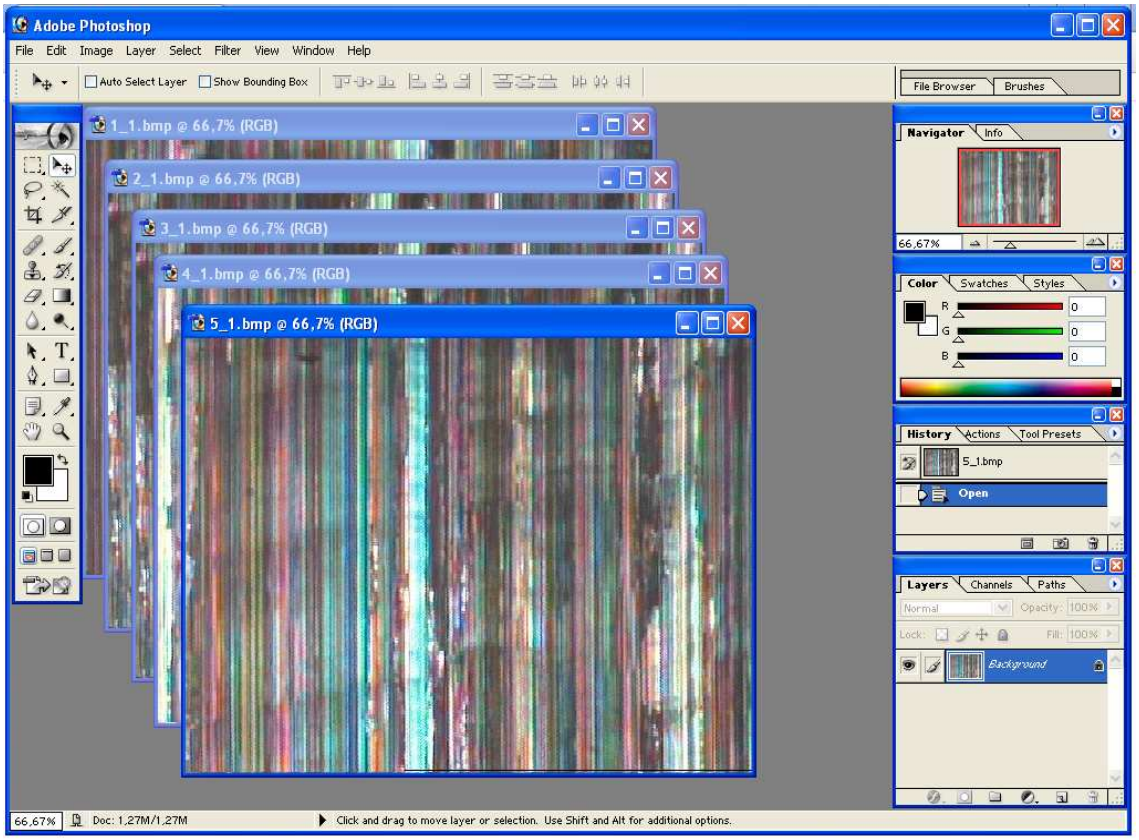
Rys. 4.5. Połączenie trzech fragmentów obrazów cyfrowych i-tego ostrza

Po scaleniu (rys. 4.6) wykadrowano obraz usuwając białe pola (rys. 4.7) i obrócono horyzontalnie, aby główna krawędź skrawająca znajdowała się po lewej stronie obrazu, dostosowując go do pozycji jakie zajmuje podczas frezowania.

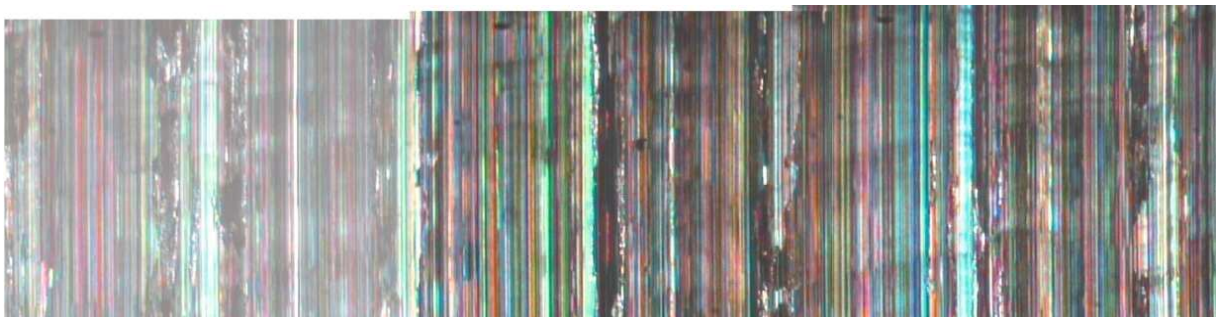
Rys. 4.6. Kadrowanie połączonego obrazu cyfrowego i-tego ostrza

Rys. 4.7. Horyzontalne odwrócenie obrazu cyfrowego i-tego ostrza

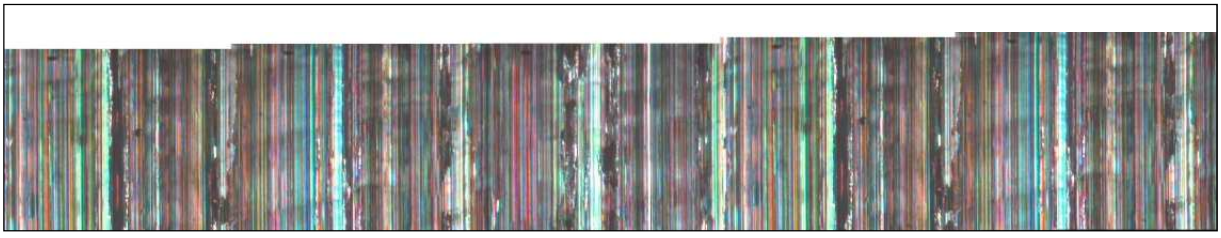
Dla cyfrowych obrazów powierzchni obrobionej do akwizycja pobierano pięć nakładających się części. Pierwsze trzy czynności wykonano tak jak przy składaniu dla obrazów zużycia ostrza (rys. 4.8-4.10).



Rys. 4.8. Wizualizacja pięciu fragmentów obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej dla i-tej drogi skrawania L_s

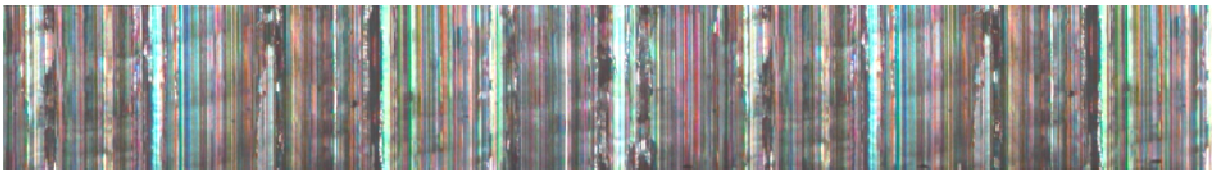


Rys. 4.9. Połączenie pięciu fragmentów obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej



Rys. 4.10. Kadrowanie połączonych pięciu fragmentów obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej

Po wykadrowaniu, złożony obraz cyfrowy powierzchni obrobionej obrócono o 180°, aby zachować kierunek uzyskanych śladów, zgodny z obserwowanym podczas frezowania (rys. 4.11).



Rys. 4.11. Horyzontalne odwrócenie obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej

Tak połączone obrazy cyfrowe (rys. 4.7 i 4.11) przedstawione są w pozostałej części pracy. Na tak uzyskanych reprezentacjach cyfrowych widoczne są różne obrazy krawędzi, a spowodowane to było zmiennym oświetleniem, ale pozostaje bez wpływu na obserwowane wyniki. Dla pojedynczego obrazu cyfrowego układ wizyjny charakteryzował się następującymi parametrami: pole widzenia kamery cyfrowej CCD było zbliżone do $1mm^2$, głębia ostrości wynosiła 0,1mm, rozdzielczość 768x576.

5. BADANIA WŁASNE

5.1. Stanowisko badawcze

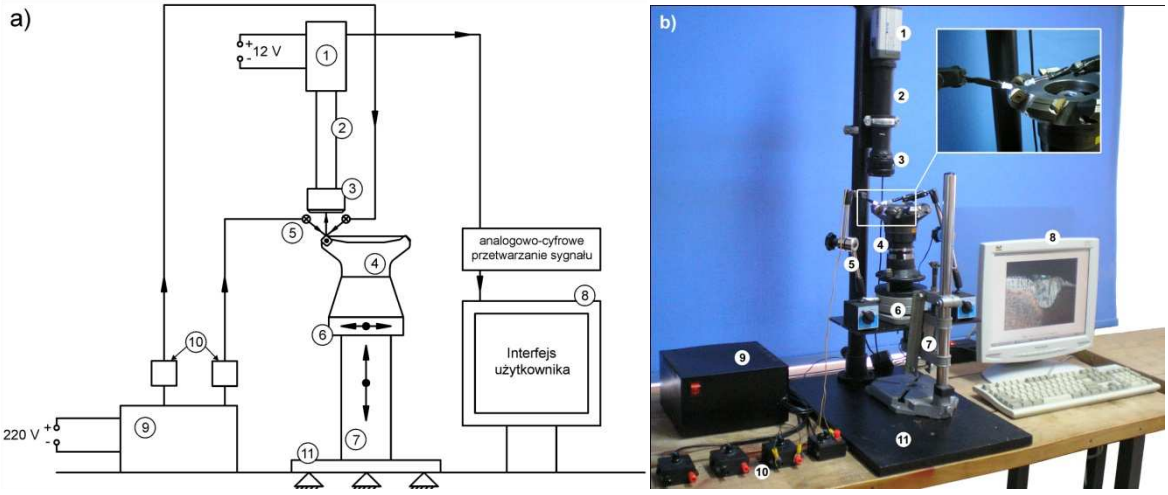
Geometria nowoczesnych płytek wymiennych stosowanych do frezowania jest odmienna od tych dla toczenia. Pojawiła się nowa konstrukcja geometryczna z tak zwaną krawędzią dogładzającą b_s. Zbadanie jak powierzchnia przyłożenia przynależna do tej krawędzi ostrza wpływa na tworzenie powierzchni obrobionej i jej poświęcono główną uwagę.

Analiza literaturowa i własne badania wstępne skłoniły do opracowania i zbudowania stanowiska badawczego przeznaczonego do monitorowania zużycia ostrza i powierzchni obrobionej.

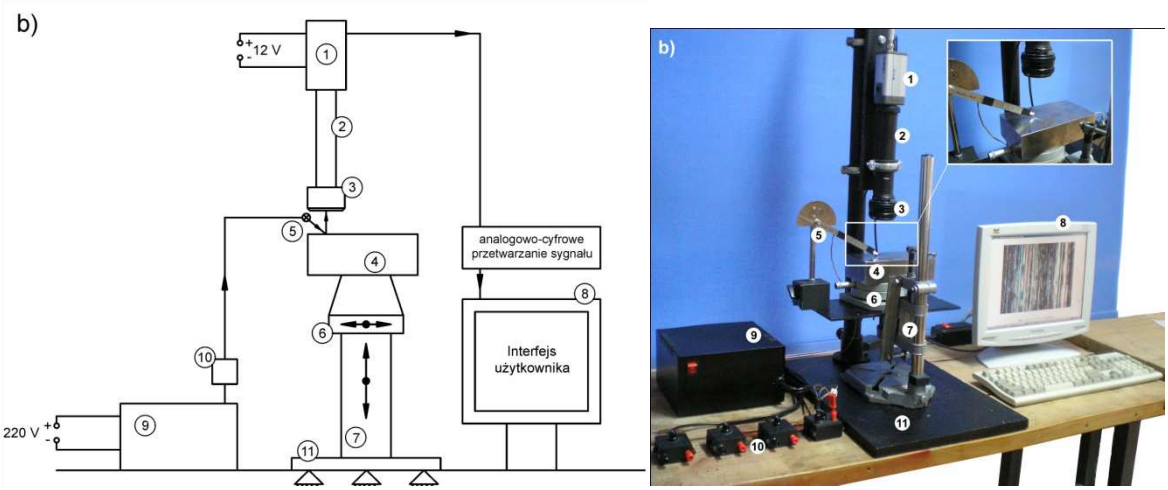
Dla skonstruowania takiego układu wykorzystano kamerę CCD (1), umożliwiającą otrzymanie odpowiedniego powiększenia powierzchni zużycia na ostrzu, za pomocą tulei i tubusów dystansowych (2) oraz obiektywów (3). Powierzchnię zużycia ostrza oświetlano z użyciem dwóch diod typu LED (5), które miały zbliżone charakterystyki, umożliwiające uzyskanie kierunkowej fali świetlnej. Diody te ustawione były tak, aby wiązka światła padała pod znanym kątem elewacji wzdłuż powierzchni dogładzającej b_s zużycia ostrza.

Do precyzyjnego pozycjonowania wysokością w kierunku Z zastosowano stojak wiertarski (7) do którego zamontowano stolik krzyżowy ze śrubą mikrometryczną, umożliwiający przesuw w kierunku X-Y (6). Aby diody LED miały stałe zasilanie napięciem U i posiadały zbliżoną jasność świecenia podłączono je oddzielnie do stabilizatorów regulowanych potencjometrem obrotowym (10). Zasilanie prądowe zapewniał transformator toroidalny (9). Rejestracja i zapis danych pomiarowych odbywał się za pomocą komputera PC (8) z zainstalowaną kartą akwizycji oraz interfejsu opracowanego w środowisku LabView. Układ optyczny i sterowniczy zamontowano na stalowej płycie (11). Na rysunkach 5.1a,b przedstawiono stanowisko pomiarowe do monitorowania ostrza skrawającego.

Podobnie zbudowano stanowisko do monitorowania powierzchni obrobionej (rys. 5.2a,b). Do oświetlenia badanej powierzchni wykorzystano pojedynczą diodę LED zamontowaną na obrotowym ramieniu względem osi kątomierza warsztatowego (5). Umożliwiło to powtarzalne zmiany kątów elewacji wiązki świetlnej na badaną powierzchnię i skierowaną przeciwnie do śladów posuwu.



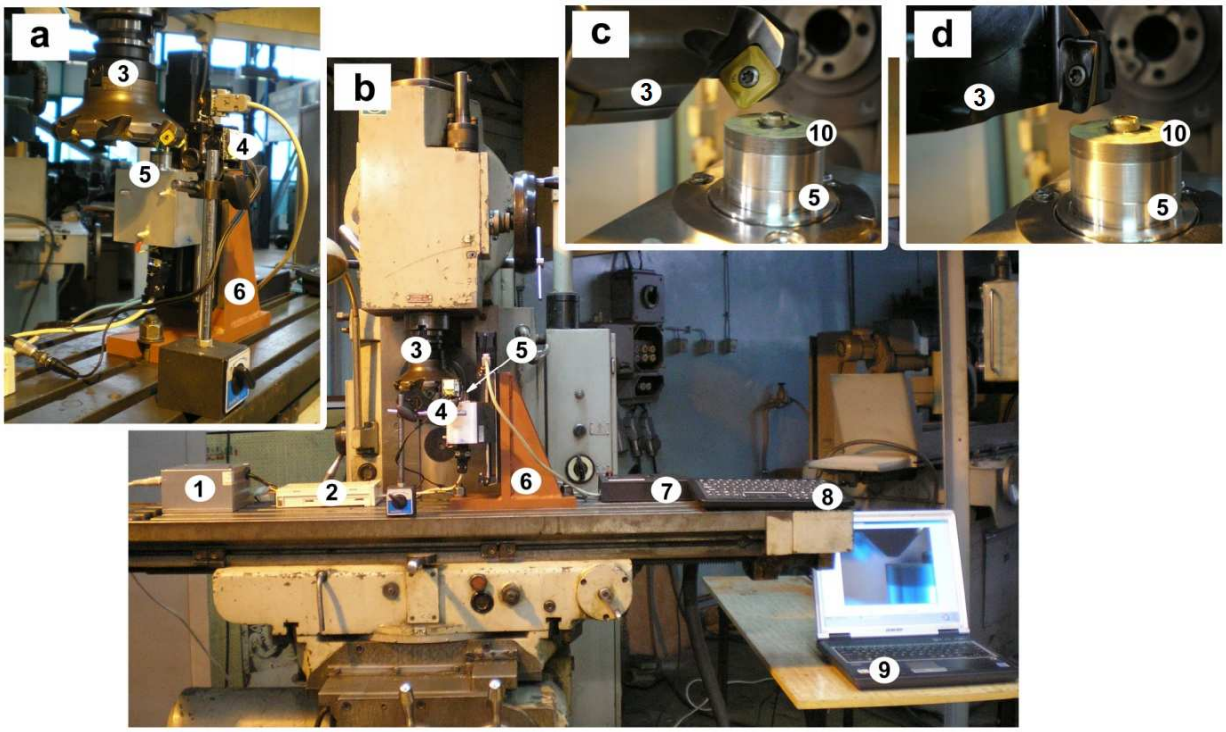
Rys. 5.1 Schemat ideowy a) i widok ogólny stanowiska pomiarowego do zużycia ostrza b)



Rys. 5.2. Schemat ideowy a) i widok ogólny stanowiska pomiarowego do powierzchni obrobionej b)

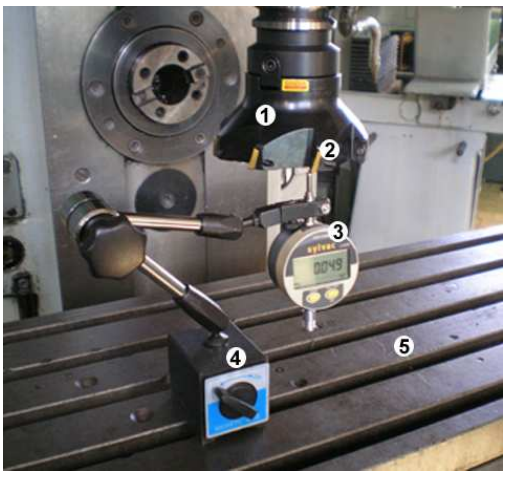
Badania obejmowały przebadanie dwóch różnie ukształtowanych, handlowych ostrzy, a także ostrzy własnej konstrukcji na których wykonano modyfikację ich geometrii [ŻUR 10-2]. Wymagało to, opracowanie i wykonanie specjalnego stanowiska, które zaprezentowano na rysunku 5.3. Do zbudowania układu wykorzystano sztywną stalową konstrukcję z zamocowanym na niej stolikiem mikrometrycznym sterowanym silnikiem krokowym realizujący precyzyjne ruchy ustawcze. Zamontowano na nim także aluminiowy uchwyt (6) z silnikiem liniowym cztero fazowym (5) o maksymalnych obrotach do 5400 obr/min. Do sterowania obrotami zbudowano specjalny sterownik i zasilacz do dysku twardego HDD (1) (2). W części czołowej silnika liniowego zamocowano szlifowaną tarczę żeliwną (10) na którą nanoszono warstwę luźnego ścierniwa diamentowego (rys. 5.3c,d). Stolik mikrometryczny sterowany był za pomocą sterownika cyfrowego (7), a komendy były przesyłane z klawiatury przemysłowej (8) (rys. 5.3b). Przebieg procesu modyfikacji ostrza, monitorowano z wykorzystaniem kamery CCD (4) (rys. 5.3a,b), podłączonej do karty akwizycji w przenośnym komputerze (9).

Poważnym utrudnieniem przy modyfikacji ostrza był moment zaistnienia styku ściernicy z powierzchnią płytki. O ile kontrola dosuwu narzędzia nie stanowi problemu, o tyle największą trudnością jest taka kalibracja układu, aby dokładnie wyznaczyć punkt rozpoczęcia szlifowania [STO 10].



Rys. 5.3. Stanowisko do modyfikacji geometrii ostrza a), b) i widok strefy procesu modyfikacji ostrza c), d)

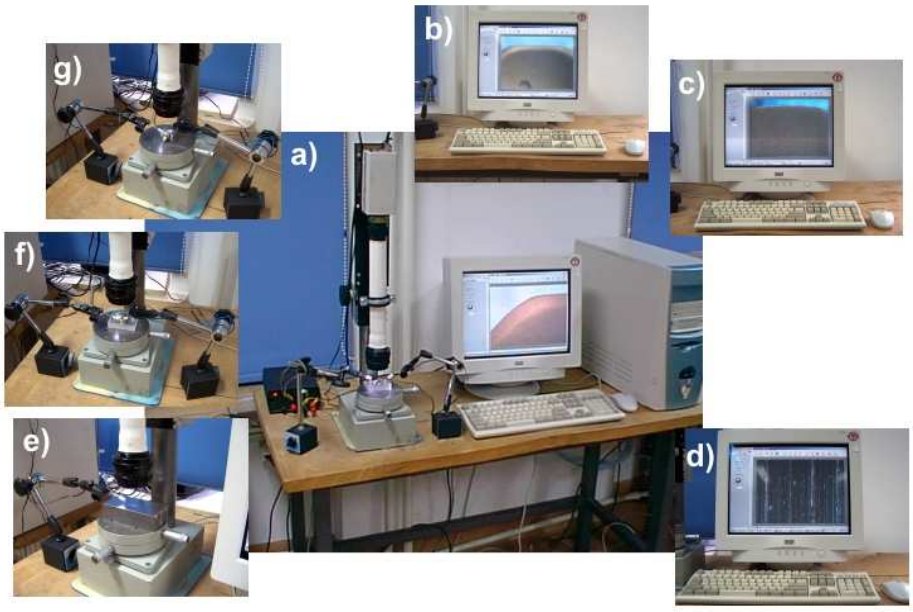
W badaniach wykonano pomiary bicia czołowego płytek wymiennych w głowicy frezowej. Pomiary wykonywano bezpośrednio na frezarce pionowej (rys. 5.4) w laboratorium Politechniki Koszalińskiej. Na rysunku 5.4 przedstawiono głowice frezową (1), płytki wymienne (2), czujnik cyfrowy (3) z podstawą magnetyczną (4) mocowanym na stole obrabiarki (5).



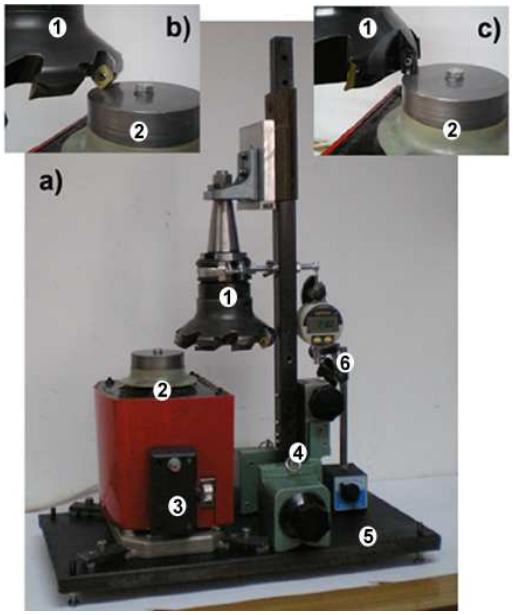
Rys. 5.4. Przykład pomiaru bicia czołowego płytek wymiennych w głowicy frezowej

5.1.1. Ocena dokładności zbudowanego stanowiska badawczego

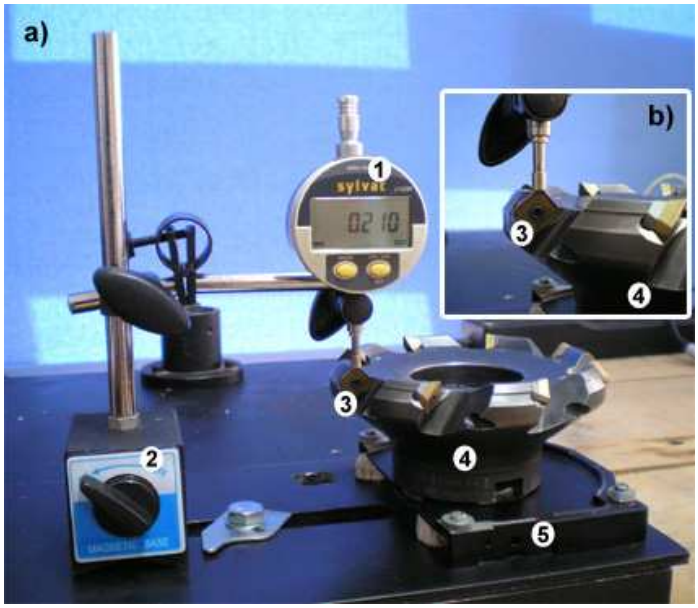
Podczas budowy stanowiska pomiarowego służącego do monitorowania zużycia ostrza i powierzchni obrobionej po frezowaniu wykorzystano wiedzę i praktykę z badań wstępnych. Pozwoliło to na najkorzystniejszy dobór skali powiększenia dla obrazów cyfrowych, optymalizację strumienia źródła światła, zarówno do obserwacji i akwizycji, odpowiednich powierzchni ostrza i powierzchni obrobionej (rys. 5.5).



Rys. 5.5. Widok ogólny stanowiska pomiarowego a) płytek wymiennych b),c),g),f) oraz powierzchni obrobionej e),d)



Rys. 5.6. Widok ogólny stanowiska do modyfikacji geometrii ostrza



Rys. 5.7. Widok ogólny stanowiska do pomiaru bicia czołowego ostrzy w głowicy frezowej

Do modyfikowania geometrii ostrzy użyto głowicę frezową i oprawkę (1), zamontowaną na stalowym profilu z podstawą magnetyczną (4). Narzędzie, które wykorzystano do modyfikacji, to wstępnie szlifowana tarcza z żeliwa na którą nakładano luźne ścierniwo w postaci pasty diamentowej (2). Ruch rotacyjny zapewnił silnik elektryczny o maksymalnej prędkości obrotowej 12000 obr/min ze sterowaniem (3). Do precyzyjnego ustawienia w kontakcie ostrze – tarcza żeliwna, zastosowano czujnik cyfrowy. Cały układ wsparto na sztywnej stalowej podstawie (5) (rys. 5.6).

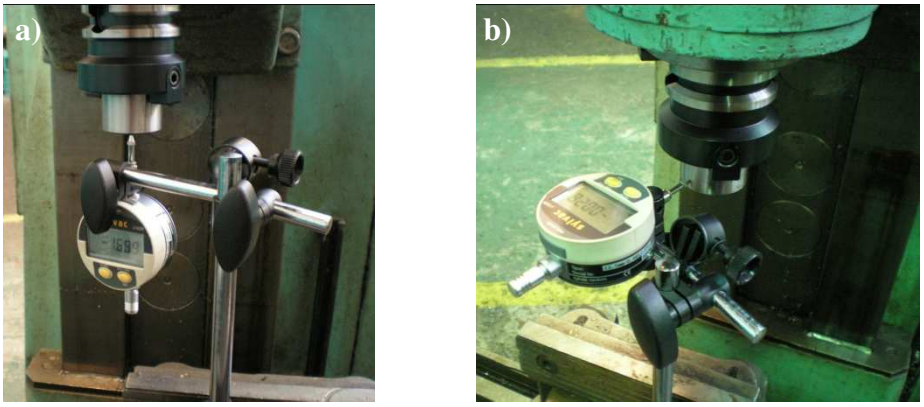
W badaniach wstępnych ustalono także właściwy i prawidłowy pomiar bicia ostrzy (rys. 5.7). Głowicę frezową (4) z płytkami wymiennymi (3) montowano na precyzyjnym łożysku obrotowym (5). Wyniki pomiaru odczytywano z czujnika cyfrowego (1) wspartego na podstawce magnetycznej (2). Ponadto sprawdzano bicie czołowe łożyska obrotowego, które średnio wyniosło 0,01 mm. Zmierzono także bicie czołowe końcówki wrzeciona, które dał średni wynik około 0,013 mm. Widać że wartości bicia łożyska obrotowego i końcówki wrzeciona różnią jedynie o około 0,003 mm.

5.2. Badanie dokładności geometrycznej

W tej części opisu badań postanowiono przedstawić wyniki z prób dokładności geometrycznych frezarki [PN M – 55667-2:1994], [PN-ISO 230-1:1998], płytki wymiennej [norma …….], wykonania gniazd płytek w korpusie narzędzia oraz ustawienie płytek do powierzchni obrabianej.

5.2.1. Dokładność frezarki pionowej

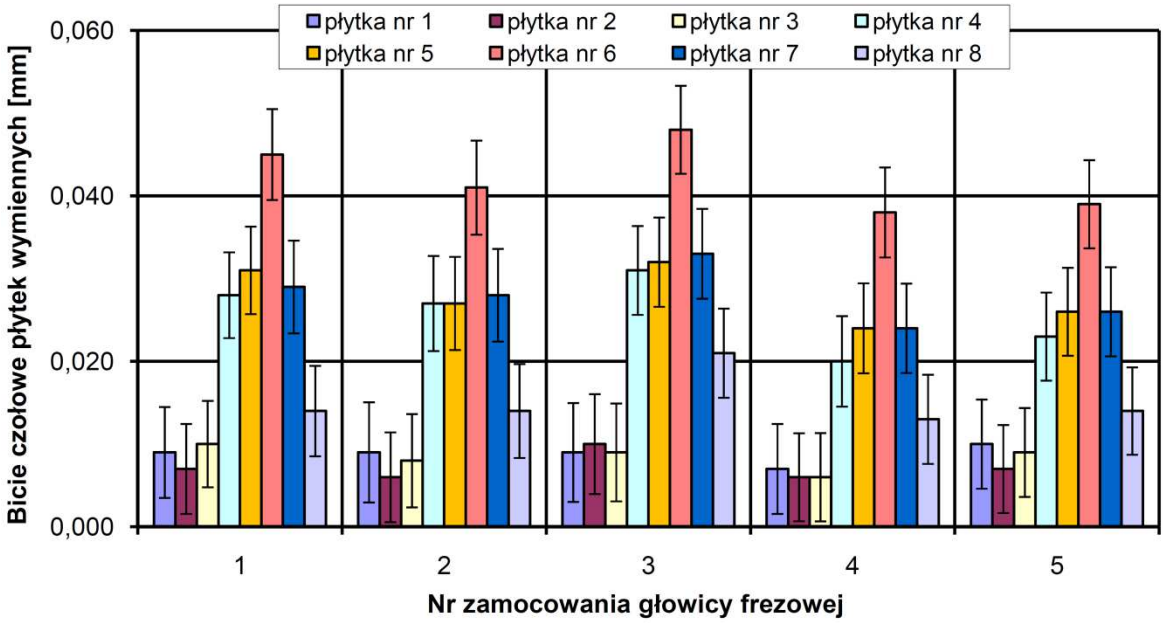
W badaniach została wykorzystana konwencjonalna frezarka pionowa o mocy silnika 7,1 kW. Przed przystąpieniem do badań właściwych, wykonano pomiary geometrycznej dokładności frezarki.



Rys. 5.8. Pomiar bicia okresowego przesunięcia a) osiowego, b) promieniowego

Zdecydowano się tylko na dwa przedmioty badań, bicia czołowego i promieniowego (rys. 5.8) okresowego przesunięcia. W tym celu użyto krótki trzpień głowicy frezowej. Pomiary wykonano w czterech punktach powierzchni walcowej i czołowej. Uzyskano wychylenia średnie końcówki czujnika dla bicia czołowego około 0,013 mm, a promieniowego około 0,043 mm.

Sprawdzono współosiowość gniazda stożkowego wrzeciona frezarki z powierzchnią stożkową trzpienia do mocowania głowicy frezowej i ich wpływu na powtarzalność bicia czołowego płytek wymiennych. Przebieg pomiarów był następujący. Uchwyt z głowicą montowano we wrzecionie frezarki i mierzono bicie czołowe ostrzy przyjmując zasadę, że do wyznaczenia minimalnej liczby próby dla estymacji średniej w populacji użyto zależność (3.1) z rozdziału czwartego. Wyniki notowano, wykonując wielokrotnie demontaż głowicy wraz z uchwytem, po sprawdzeniu bicia czołowego ostrzy. Czynność tą powtórzono pięciokrotnie, a uśrednione wyniki badań przedstawiono na wykresie (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Wyniki powtarzalność mocowania uchwytu i głowicy frezowej na bicie czołowe płytek wymiennych

Różnice pomiędzy ustawieniami dla płytek wymiennych nr 1, 2, 3 mieściły się w zakresie od 0,003 do 0,004 mm. Dla płytek nr 5, 6, 7, 8 od 0,008 do 0,01 mm. Jedynie płytka nr 4 wykazała różnice 0,011.

5.2.2. Dokładność wymiarowa płytki wymiennej

W narzędziach składanych wbudowywane są pojedyncze lub wiele płytek skrawających mocowanych różnymi sposobami mechanicznymi. Konstrukcja takich narzędzi powinna być prosta i posiadać najmniejszą liczbę elementów mocujących o dużej sztywności i wytrzymałości. Musi także gwarantować jednoznaczne, powtarzalne zamocowanie płytki w gnieździe oprawki lub korpusie narzędzia oraz umożliwiać łatwą i szybką jej wymianę [MEL91].

Płytki wymienne posiadają następujące cechy:

- postać, jako powierzchnie jej baz głównych oraz pomocniczych - kierunkowych i oporowych,
- kształt obrysu, a głównie kąt wierzchołkowy ε_r,
- wymiary,
- strefa wierzchołkowa krawędzi skrawającej, wyjaśniająca położenie promieni zaokrąglenia naroża r_ε

głównych i pomocniczych kątów przyłożenia oraz innych powierzchni występujących w okolicy naroża ostrza,

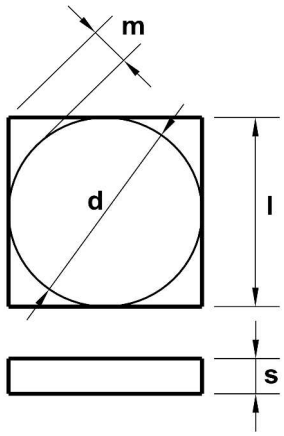
- tolerancja, opisująca wymagania kształtu, położenia i błędy krawędzi, które mogą decydować o wymiarze powierzchni obrobionej,
- kształt powierzchni natarcia, szczególnie łamacza wiórów,
- kąt przyłożenia i pochylenia krawędzi skrawającej,

Dwa ostatnie założenia mają wpływ raczej na siły i opory w skrawaniu oraz odprowadzanie wiórów ze strefy skrawania. Pozostałe, na kontakt ostrza z materiałem obrabianym i powtarzalne pozycjonowanie płytki względem gniazda w korpusie [MEL91] lub oprawce narzędzia.

Dla zwiększenia dokładności obróbki istnieje możliwości regulacji ustawienia płytek wymiennych, szczególnie dotyczy to narzędzi wieloostrzowych w których liczba ostrzy zmienia się od dwóch do kilkudziesięciu. Zaletą regulacji jest znaczne zmniejszenie chropowatości, falistości, a nawet korektę błędów kształtu na powierzchni obrobionej. Istnieje możliwość kompensacji błędów wynikających z wykonania płytek wymiennych oraz gniazd w korpusie narzędzi.

Wiąże się z tym kilka wad związanych z komplikacją wykonania takich gniazd, czasochłonne ustawienia płytek oraz zmniejszenie sztywność baz ustawczych.

Dla klasyfikacji tolerancji wykonania płytek wymiennych i ich powtarzalności mocowania przyjmuje się średnicę *d*, okręgu wpisanego w obrys płytki, wymiar *m* odległości naroża lub krawędzi skrawającej od okręgu *d* oraz grubość płytki *s* (rys. 5.10) [MEL91], [CIC 06].



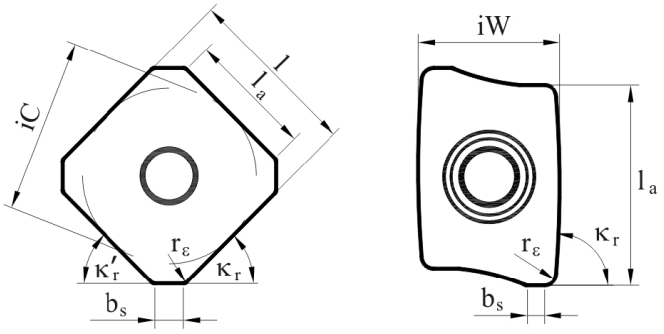
Rys. 5.10. Wymiary parametrów granicznych w definiowaniu dokładności płytek wymiennych

Tymczasem, na określenie powtarzalności mogą mieć wpływ wymiary płytki, dokładność i symetryczność wykonania, położenia otworu względem osi płytki [CIC 06] lub kąt wierzchołkowy ε_r zależny od długości czynnych krawędzi skrawających.

Do badań dokładności geometrycznej, przeznaczono dwa wybrane zestawy płytek wymiennych, z powierzchnią dogładzającą b_s 8 płytek i płytki z zaokrąglonym narożem r_ε w liczbie 6 sztuk. Ich podstawowe wielkości geometryczne przedstawiono w tabeli 6 oraz pokazano na rysunku 5.11.

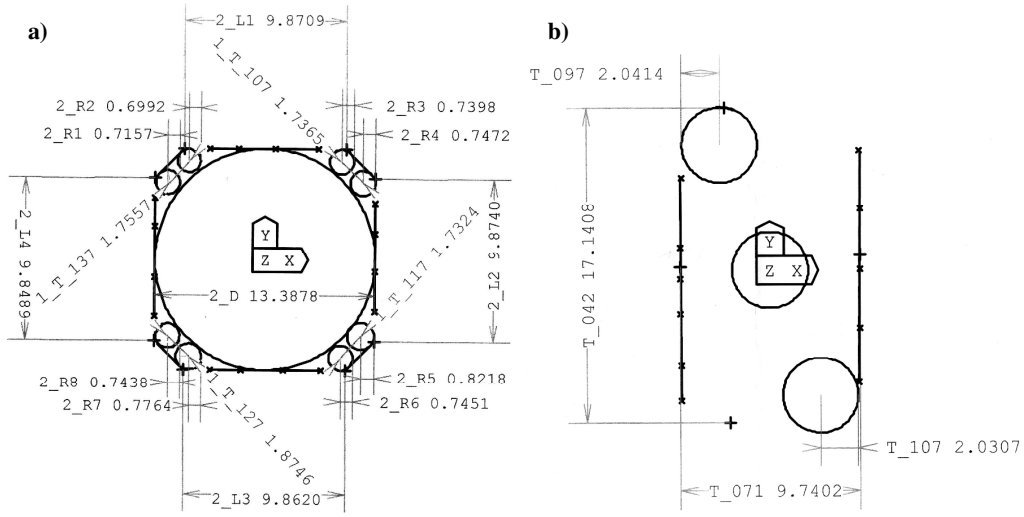
Tabela. 6. Podstawowe wielkości geometryczne płytki z powierzchnią dogładzającą b_s (P1) i z zaokrąglonym narożem r_ε (P2)

Symbol	Nazwa	P1	P2
iW	Szerokość płytki	–	9,6
l=iC	Całkowita długość płytki	13,4	–
b_s	Powierzchnia dogładzająca	2	0,3
l_a	Czynna krawędź skrawająca	10	17
r_ε	Promień zaokrąglenia naroża	1,5	2
κ_r	Główny kąt przystawienia	45°	90°
κ'_r	Pomocniczy kąt przystawienia	45°	–



Rys. 5.11. Wielkości geometryczne charakteryzujące wykorzystywane w badaniach płytki wymienne: a) z powierzchnią dogładzającą b_s, b) z zaokrąglonym narożem r_ε

Płytki wymienne wykorzystane do badań poddano weryfikacji geometrycznej względem powierzchni baz pomocniczych (rys. 5.12) [KAP 11]. Pomiary wykonano na współrzędnościowej maszynie optycznej Werth VideoCheck IP250/400. Zmierzono: czynne krawędzie skrawające l_a, promienie zaokrąglenia naroża r_ε, długości powierzchni dogładzających b_s, całkowite długości płytek $l = iC$, szerokości płytek *iW*.



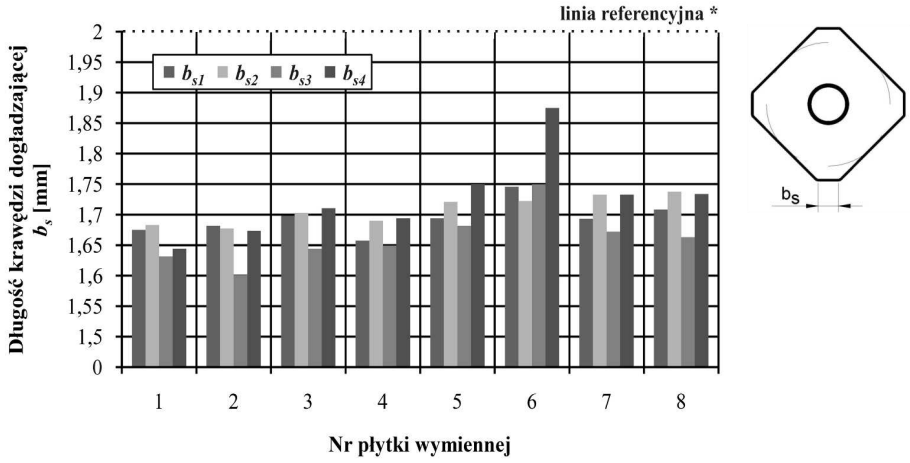
Rys. 5.12. Rzeczywiste podstawowe wymiary geometryczne płytki wymiennej a) z powierzchnią dogładzającą b_s, b) z zaokrąglonym narożem r_ε

Przeprowadzone pomiary pozwoliły na porównanie wymiarów geometrycznych uzyskanych z maszyny współrzędnościowej z tymi, które podaje producent w swoich katalogach narzędziowych.

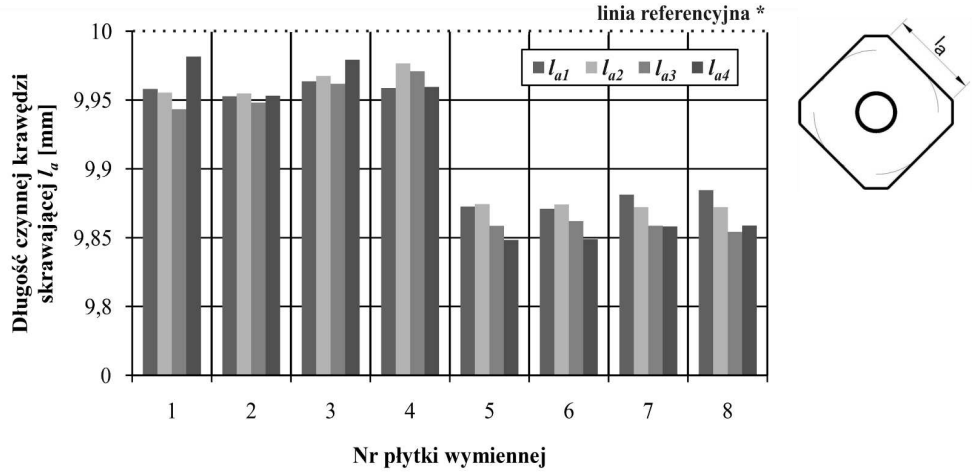
Na wykresach określono linię referencyjną (*), która oznacza wymiar handlowy podany przez producenta płytek wymiennych.

Wyniki uzyskanych pomiarów przedstawiono na rysunkach 5.13 – 5.16 dla płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s oraz dla płytek z zaokrąglonym narożem r_ε na rysunkach 5.17 – 5.19. W odniesieniu do pomiarów przyjęto następującą metodykę. Pomiar długości krawędzi dogładzającej b_s mierzony był pomiędzy środkami promieni zaokrąglenia naroży r_ε. Wartość promienia r_ε wyznaczano wpisując okrąg w zarys jego krawędzi. Pomiar czynnej krawędzi skrawającej l_a, wykonywany został pomiędzy skrajnymi, przecinającymi się krawędziami dogładzającymi b_s. Całkowita długości płytki $l = iC$ wyznaczana była poprzez wpisanie okręgu w płytkę i wykorzystanie jego środka, jako punkt bazowy, natomiast szerokość iW wyznaczono pomiędzy czynnymi krawędziami skrawającymi l_a.

Płytki wymienne z powierzchnią dogładzającą b_s, posiadały 4 krawędzie dogładzające b_s oraz 4 czynne krawędzie skrawające l_a. Dla każdej z 8 płytek wykonano pomiary ich długości krawędzi (rys. 5.13 i 5.14)

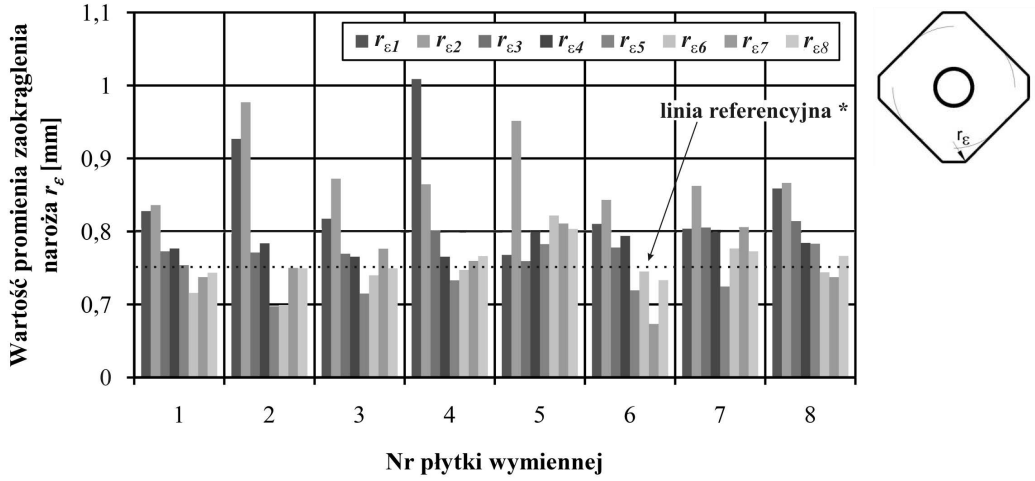


Rys. 5.13. Wyniki pomiarów długości krawędzi dogładzającej b_s dla 8 płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s



Rys. 5.14. Wyniki pomiarów czynnej krawędzi skrawającej l_a dla 8 płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s

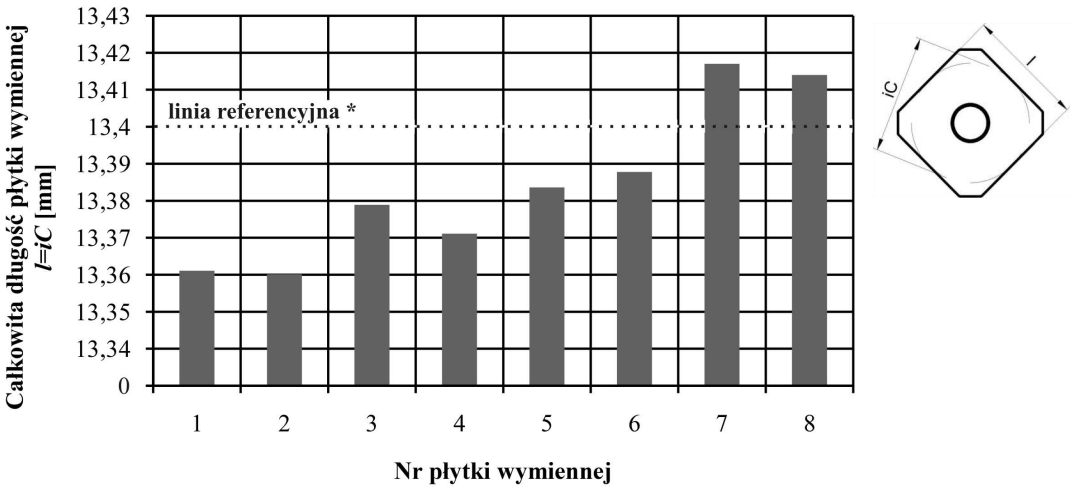
Dla krawędzi dogładzającej b_s, otrzymane wyniki pomiarów wykazują wyraźne różnice w długości płytek wymiennych w zakresie od 1,6 do 1,87 mm. Dla pojedynczej płytki różnica pomiędzy najkrótszą, a najdłuższą krawędzią była w zakresie od 0,04 do 0,15 mm, przy czym wartość podawana przez producenta jest to 2 mm (linia referencyjna). Natomiast długości czynnej krawędzi skrawającej l_a dla 4 pierwszych płytek wymiennych zawierały się od 9,94 do 9,98 mm, dla pozostałych od 9,84 do 9,88 mm. W tym przypadku wartość podawana w katalogu producenta wynosiła 10 mm.



Rys. 5.15. Wyniki pomiarów promienia zaokrąglenia naroża r_ε dla 8 płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s

Wyniki pomiarów promienia zaokrąglenia naroża r_ε, dla 8 płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s przedstawiono na rysunku 5.15. Producent podaje, że wartość tego promienia powinna być 1,5 mm. Wyniki wykazały duże zróżnicowanie jego wartości w zakresie od 0,67 do ponad 1 mm, ze średnią wartością około 0,78 mm.

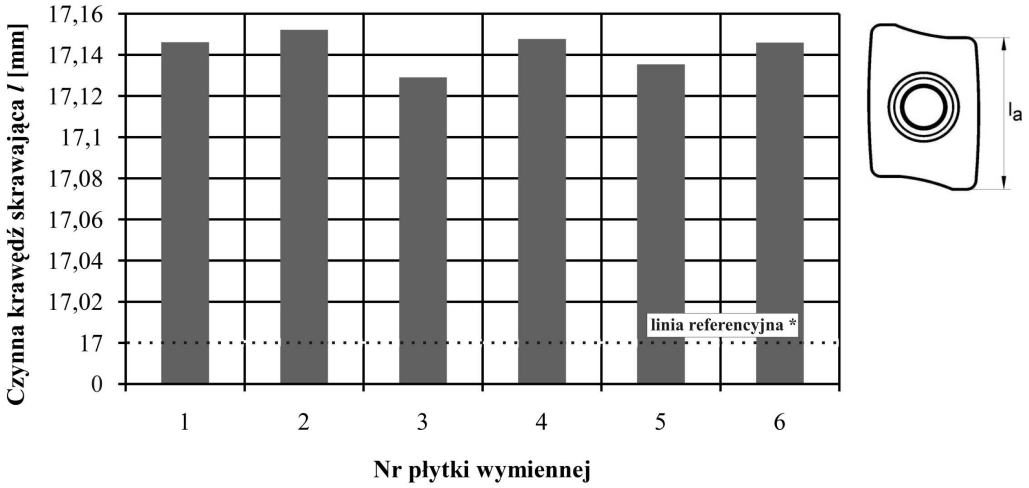
Rezultaty pomiarów dla całkowitej długości płytki wymiennej $l = iC$ przedstawiono na rysunku 5.16.



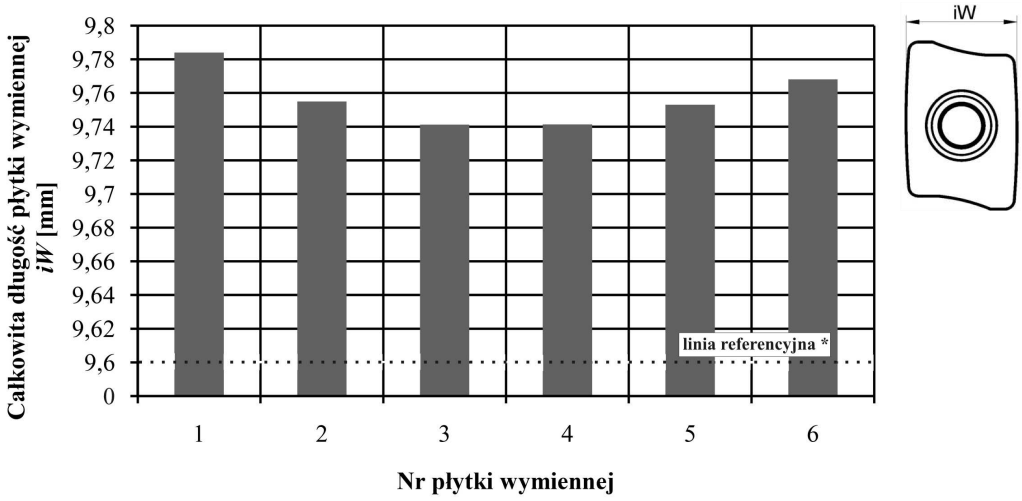
Rys. 5.16. Wyniki pomiarów całkowitej długości płytki wymiennej $l = iC$ dla 8 płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s

Uzyskane wyniki, mieściły się w przedziale od 13,36 do 13,41 mm, przy czym wartości dla sześciu pierwszych płytek były zbliżone do nominalnego wymiaru podanego przez producenta (linia referencyjna). Dla pozostałych płytek 7 i 8, uzyskane wartości były większe.

Na kolejnych rysunkach 5.17 - 5.19 przedstawiono rezultaty pomiarów podstawowych wielkości geometrycznych płytki wymienne z zaokrąglonym narożem r_ε.



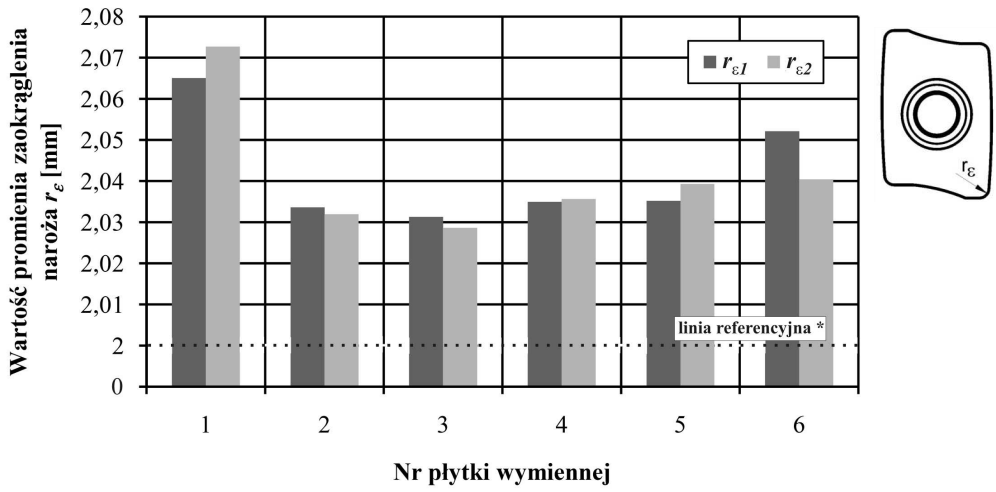
Rys. 5.17. Wyniki pomiarów czynnej krawędzi skrawającej l_a dla 6 płytek wymiennych z zaokrąglonym narożem r_ε



Rys. 5.18. Wyniki pomiarów całkowitej długości płytki wymiennej $l=iC$ dla 6 płytek wymiennych z zaokrąglonym narożem r_ε

Wartości uzyskane dla czynnej krawędzi skrawającej l i całkowitej długości płytki wymiennej iW (rys. 5.18) były większe odpowiednio o 0,15 mm i 0,18 mm od wymiaru nominalnego (linia referencyjna) podawanego przez producenta.

Badane płytki wymienne z zaokrąglonym narożem miały dwa promienie r_ε i również w tym przypadku wyniki pomiarów ujawniły, że wartości ocenianych promieni były wyższe. Znajdowały się w przedziale od 0,028 do ponad 0,07 od wartości nominalnej wynoszącej 2 mm (rys. 5.19).



Rys. 5.19. Wyniki pomiarów promienia zaokrąglenia naroża r_ε, dla 6 płytek wymiennych z zaokrąglonym narożem r_ε

Z przeprowadzonych badań stwierdzono, że różnice w wartościach wielkości geometrycznych ocenianych płytek wymiennych w porównaniu danymi podawanymi przez producenta wahały się w przedziale od kilku dziesiątych do kilku setnych części milimetra.

Dla płytek z powierzchnią dogładzającą b_s zmierzone jej wartości dla krawędzi skrawającej znajdowały się poniżej linii referencyjnej $2^{-0,13}_{-0,4}$ mm. Podobne odchylenia wartości zmierzono dla czynnej krawędzi skrawającej l_a $10^{-0,02}_{-0,15}$ mm. Dla promienia zaokrąglenia naroża r_ε i całkowitej długości płytki $l=iC$, wartości te zawierały się pomiędzy wymiarem nominalnym i wynosiły kolejno dla $r_\varepsilon = 0,75^{+1}_{-0,02}$ mm, $l = iC = 13,4^{+0,01}_{-0,04}$ mm.

Dla płytek z zaokrąglonym narożem r_ε wartości pomiarów były wyższe i uzyskano dla czynnej krawędzi skrawającej $l_a = 17^{+0,15}_{+0,12}$ mm, całkowitej długości płytki $iW = 9,6^{+0,18}_{+0,14}$ mm i promienia zaokrąglenia naroża $r_\varepsilon = 2^{+0,07}_{+0,03}$ mm.

Pozycjonowanie w takim przypadku płytki powoduje błędy jej poprawnego ustawienia w gnieździe korpusu narzędzia, a tym samym brakiem równoległości do powierzchni obrobionej.

Podsumowując przeprowadzone badania można stwierdzić, że zmienność wymiarów wartości promieni zaokrąglenia r_ε i długości krawędzi dogładzającej w płytkach wymiennych podawane w firmowych katalogach różnią się na tyle, że mogą istotnie oddziaływać na powierzchnię obrobioną, zmieniając jej strukturę geometryczną.

5.2.3. Dokładność wymiarowa gniazd w głowicy frezowej

Gniazdo w korpusie głowicy służy do ustalania i mocowania w tylu pozycjach płytek wymiennych, ile ma ona krawędzi skrawających. Rozróżnia się dwa rodzaje gniazd. Zamknięte, w których bazy pomocnicze są sztywnymi częściami korpusu i odbierające trzy stopnie swobody oraz otwarte i wówczas elementy mocujące spełniają rolę baz pomocniczych w odbierając jeden lub dwa stopnie swobody [MEL 91].

Każde gniazdo wykonane jest w określonej tolerancji i nie podlega żadnemu dopasowaniu [MEL 91] Mierzalne są odchyłki dokładności wykonania powierzchni bazowych, płaskości i bicia promieniowego na płytki wymienne [KOZ 08].

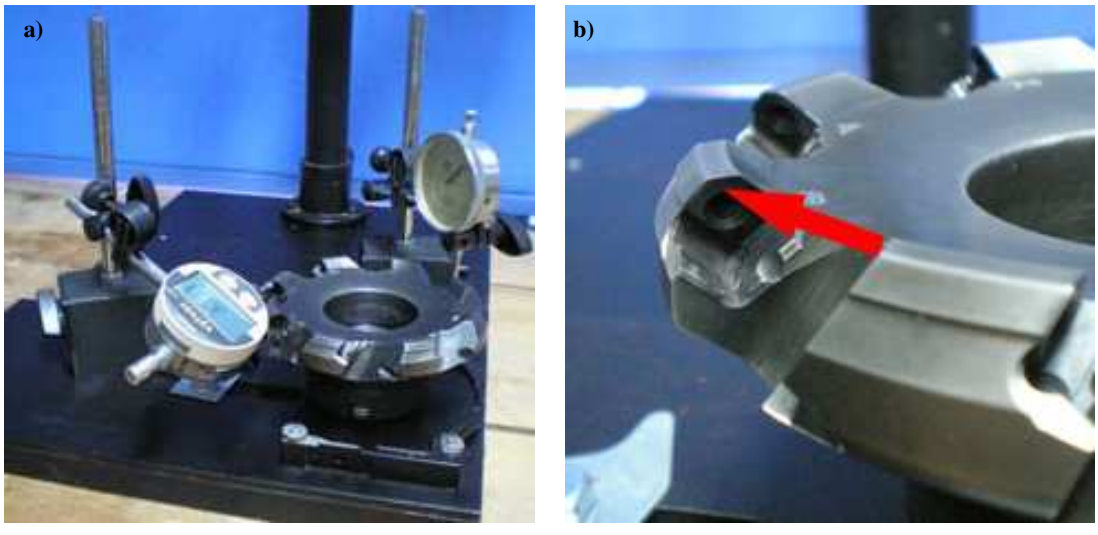
Gniazdo powinno spełniać następujące funkcje:

- powtarzalnie ustalić i odebrać liczbę stopni swobody - zazwyczaj 6 stopni swobody,
- zapewnić pewne podparcie dla przenoszonych sił skrawania,
- zapewnić pewne mocowanie płytki,
- możliwie najskuteczniej odprowadzić ciepło z płytki,
- zabezpieczyć płytkę przed przypadkowym zniszczeniem,
- zapewnić łatwą wymianę płytki na stanowisku: roboczym i przygotowania narzędzia,
- zapewnić ustalenie i zamocowanie płytek o specjalnym przeznaczeniu (kształtowych, gładzących, jeżeli się mieszczą w obrysie płytki zasadniczej) [MEL 91].

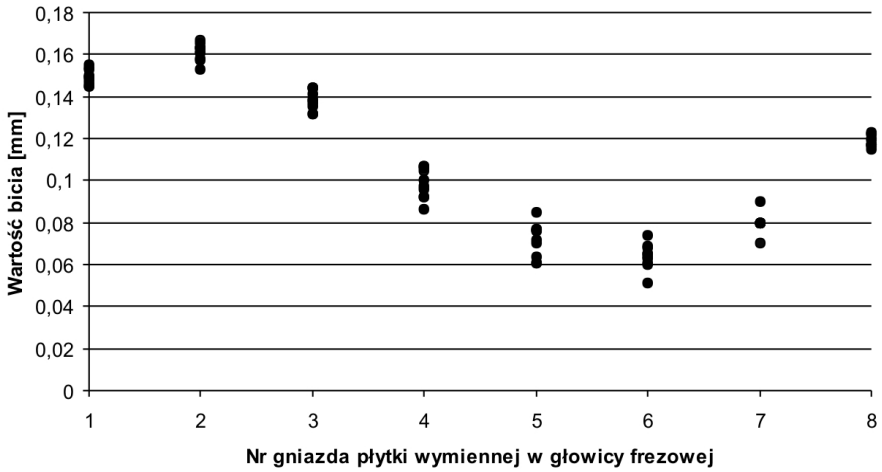
Pomiary dokładności wymiarowej powierzchni bazowych gniazd przeprowadzono dla głowic frezowych R245-125Q40-12M i R390-125Q40-17M wykorzystanych w badaniach.

Dla każdej głowicy ponumerowano jej gniazda. Zapewniło to porządek w montażu kolejnych płytek wymiennych, powtarzalność pomiarową i ograniczyło wystąpienie pomyłki.

Sposób pomiaru (rys. 5.20a, 5.22a i 5.24a) i odchyłki bicia mierzono na powierzchni dna gniazda (rys. 5.20b) oraz jego bocznych powierzchniach ustawczych (rys. 5.22b i 5.24b). Mierzone powierzchnie zaznaczono czerwoną strzałką, a uzyskane średnie wartości pomiarowe wyznaczono z dziesięciu powtórzeń.

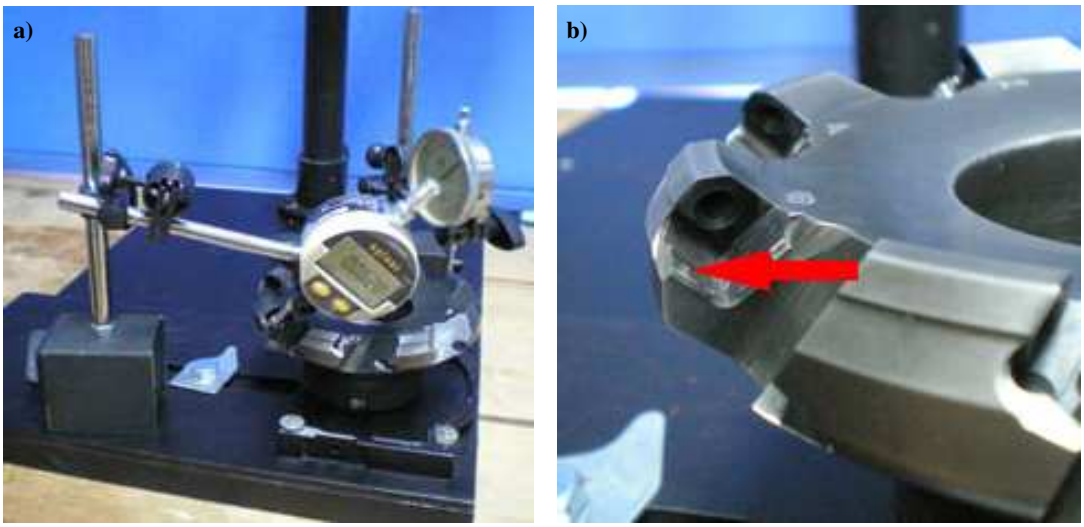


Rys. 5.20. Pomiar bicia a) powierzchni dna b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R245

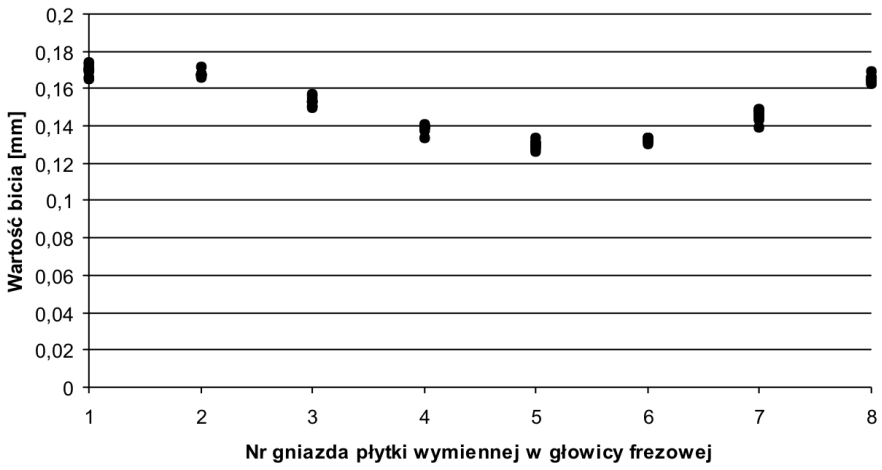


Rys. 5.21. Wyniki bicia powierzchni dna gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R245

Wyniki bicia ośmiu powierzchni dna gniazd zaprezentowano w postaci graficznej na rysunku 5.21. Wartości zawierały się w zakresie od 0,16 mm do 0,07 mm. Świadczy to o tym, że gniazda wykonano ze średnią tolerancją 0,1 mm i poszczególne gniazda nie są wykonane w równych podziałkach względem siebie.

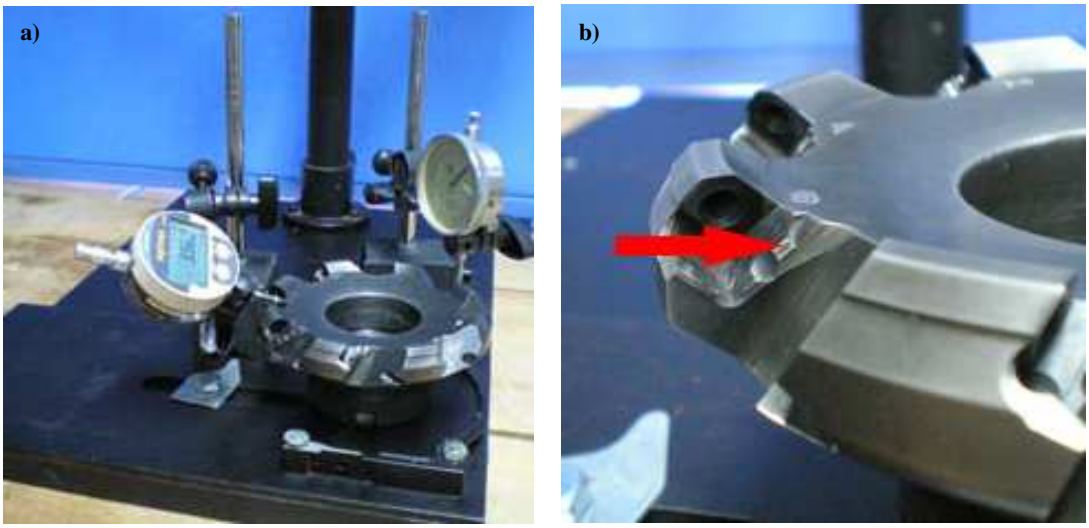


Rys. 5.22. Pomiar bicia a) zewnętrznej powierzchni ustawczej b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R245



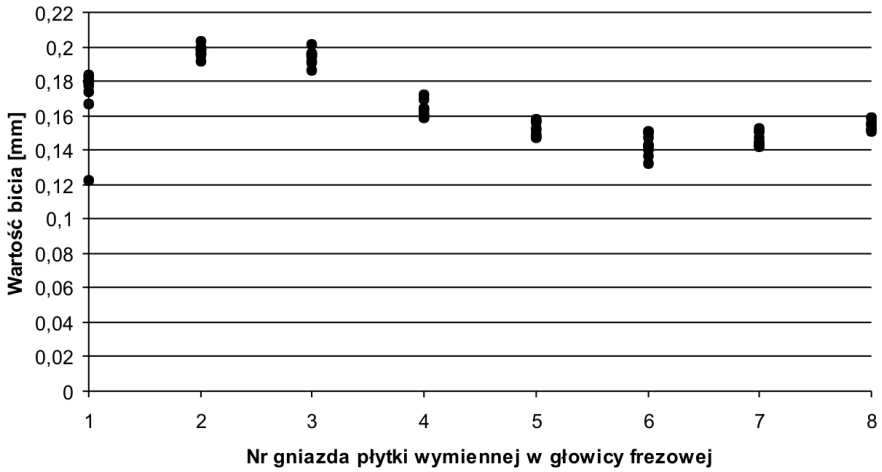
Rys. 5.23. Wyniki bicia zewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R245

Wartości bicia, na zewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd, zawierały się średnio w zakresie od 0,17 mm do 0,13 mm (rys. 5.23). Gniazda od nr 3 do 7 były wsunięte do wewnątrz korpusu głowicy względem tych na obwodzie. Pozostałe gniazda mieściły się w symetrii obwodowej.



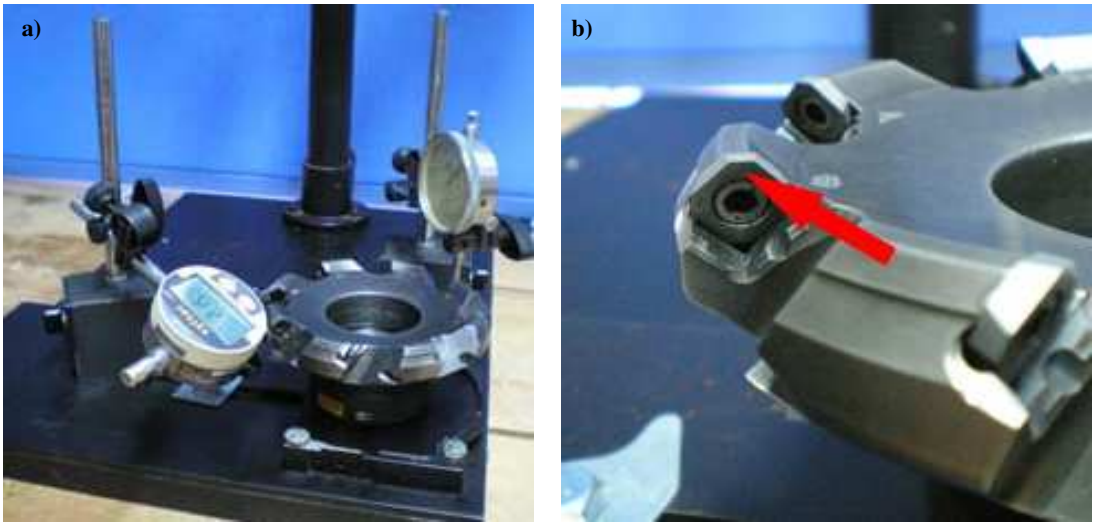
Rys. 5.24. Pomiar bicia a) wewnętrznej powierzchni ustawczej b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R245

Dla wewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd wyniki bicia mieściły się w zakresie od 0,2 mm do 0,14 mm (rys. 5.24) i tylko gniazda nr 2 i 3 zachowały symetrię obwodową. Pozostałe powierzchnie w gnieździe były na mniejszej średnicy narzędzia.

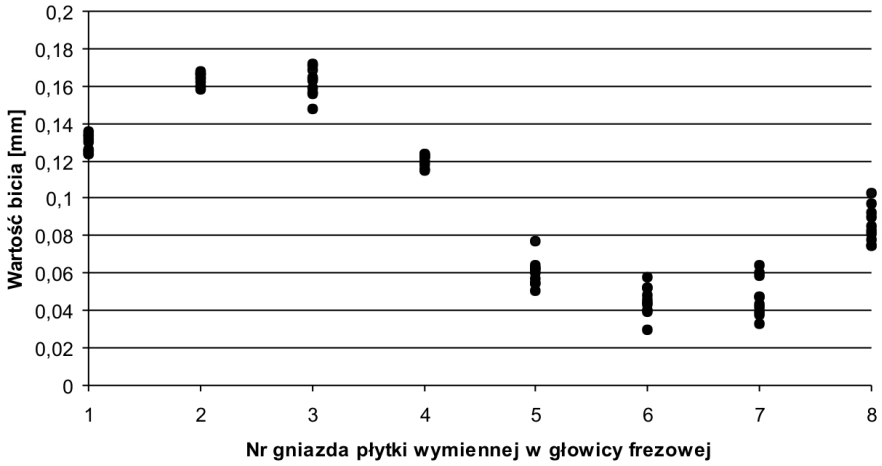


Rys. 5.25. Wyniki bicia wewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R245

Wartości bicia trzech powierzchni ustawczych gniazd w głowicy frezowej przebiegały w charakterystycznym układzie sinusoidy (rys. 5.25). Kolejną częścią badań było wykonanie pomiarów bicia powierzchni natarcia z zamontowanymi płytkami podporowymi (rys. 5.26). Przed montażem płytek podporowych w głowicy, dokonano pomiaru ich płaskości. Na płytce podporowej pomiary wykonano w czterech punktach i zakres uzyskanych wyników był od 2,979 do 2,981 mm. Średnia odchyłka płaskości płytek podporowych zawierała się w 0,003 mm.



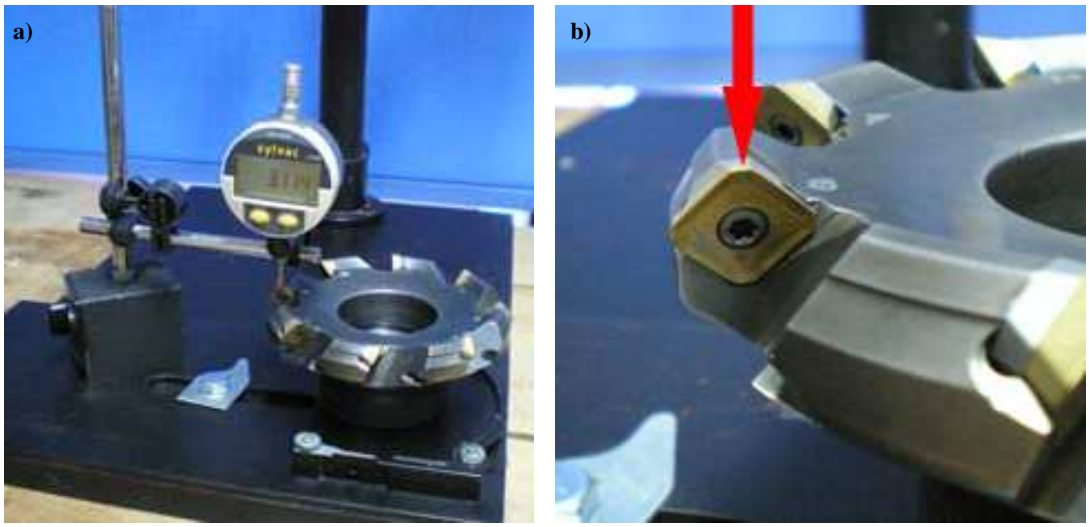
Rys. 5.26. Pomiar bicia a) powierzchni natarcia płytki podporowej b) w głowicy frezowej R245



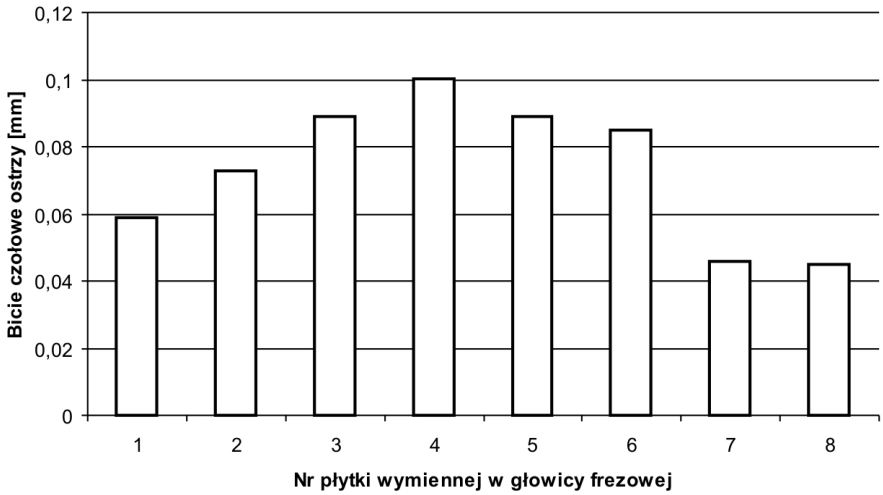
Rys. 5.27. Wyniki bicia powierzchni natarcia płytki podporowej w głowicy frezowej R245

Wartości bicia dla powierzchni natarcia płytki podporowej mieściły się w zakresie od 0,17 do 0,04 mm (rys. 5.27). W porównaniu z wynikami jakie uzyskano z pomiarów powierzchni dna gniazd, stwierdzono ze tylko jedno gniazdo nr 2 było zbliżone z dokładnością ustawienia względem płytki podporowej. Pozostałe wyniki były różne o kilka setnych milimetra.

Na rysunku 5.28 przedstawiono pomiar bicia czołowego płytek wymiennych wykonanych na powierzchni dogładzającej b_s ostrza.



Rys. 5.28. Pomiar bicia czołowego a) na powierzchni dogładzającej b_s płytki wymiennej b) w głowicy frezowej R245

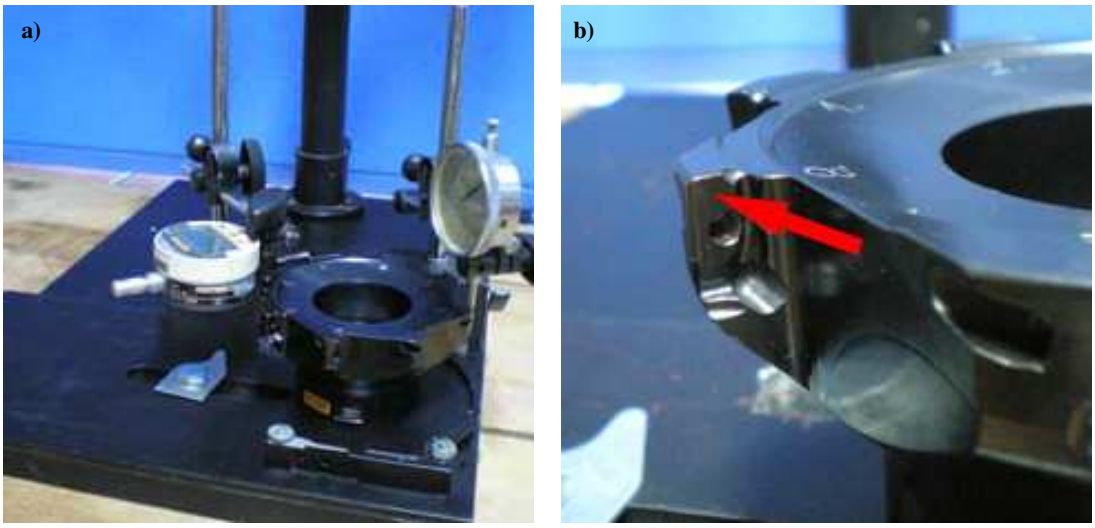


Rys. 5.29. Bicie czołowe ostrzy w głowicy frezowej R245

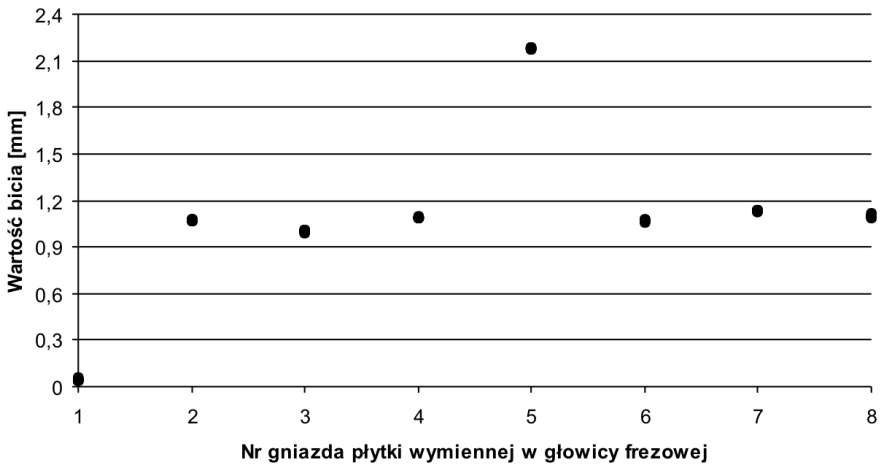
Pomiar bicia ostrzy wykonano w dziesięciokrotnych powtórzonych próbach, a wartości średnie wykorzystano do stworzenia wykresu (rys. 5.29).

Uzyskane wyniki bicia czołowego płytek wymiennych obrazują duże zróżnicowanie. Należy zauważyć, że ustawienia wierzchołków ostrzy przebiegały według sinusoidy, co wskazuje na wpływ błędu zamocowania ostrzy w głowicy.

Oceniono także odchyłki bicia na powierzchni dna gniazda (rys. 5.30b) i jego bocznych powierzchniach ustawczych (rys. 5.32b, 5.34b) w głowicy R390 oraz oszacowano bicie czołowe płytek wymiennych (rys. 5.36b). Pomiary przeprowadzono dla dziesięciu powtórzeń, a wartości średnie wykorzystano do przedstawienia wyników.

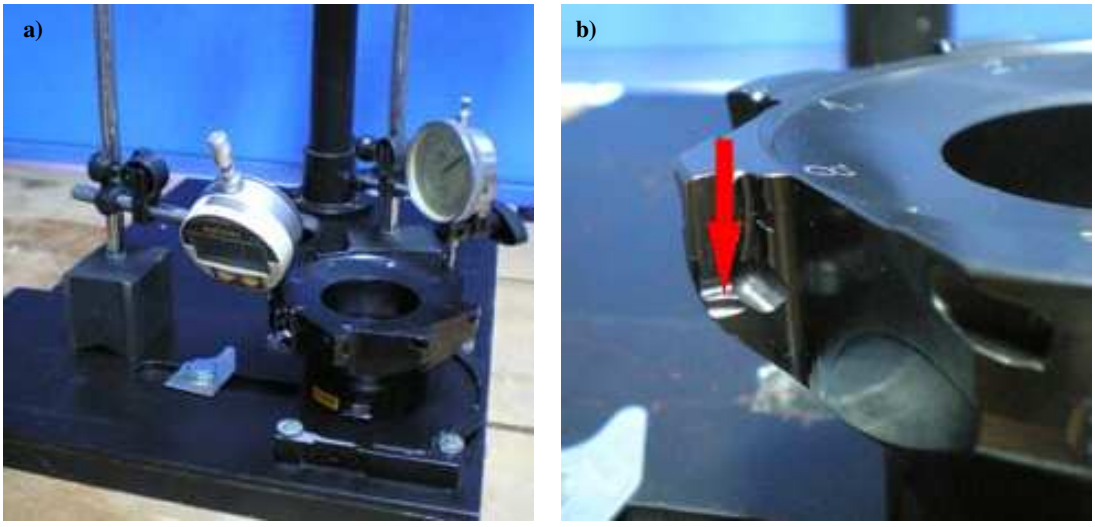


Rys. 5.30. Pomiar bicia a) powierzchni dna gniazda b) płytki wymiennej w głowicy frezowej R390

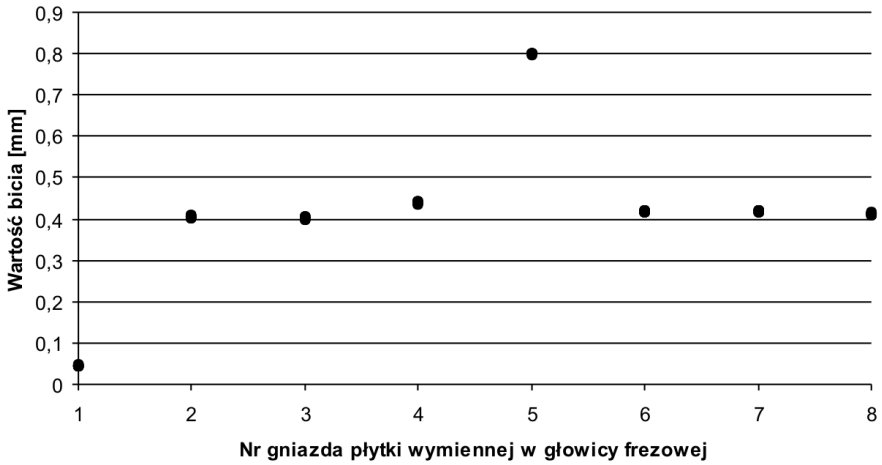


Rys. 5.31. Wyniki bicia powierzchni dna gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R390

Wyniki pomiarów bicia powierzchni dna dla ośmiu gniazd, zawierały się w zakresie od 0,04 do 2,1 mm (rys. 5.31). Wykres obrazuje, że dwie powierzchnie posiadały różne wartość od pozostałych. Uzyskany wynik dla gniazda nr 1 świadczy, że powierzchnia była cofnięta na obwodzie narzędzia, natomiast powierzchnia gniazda nr 5 była przesunięta do przodu, względem pozostałych powierzchni.



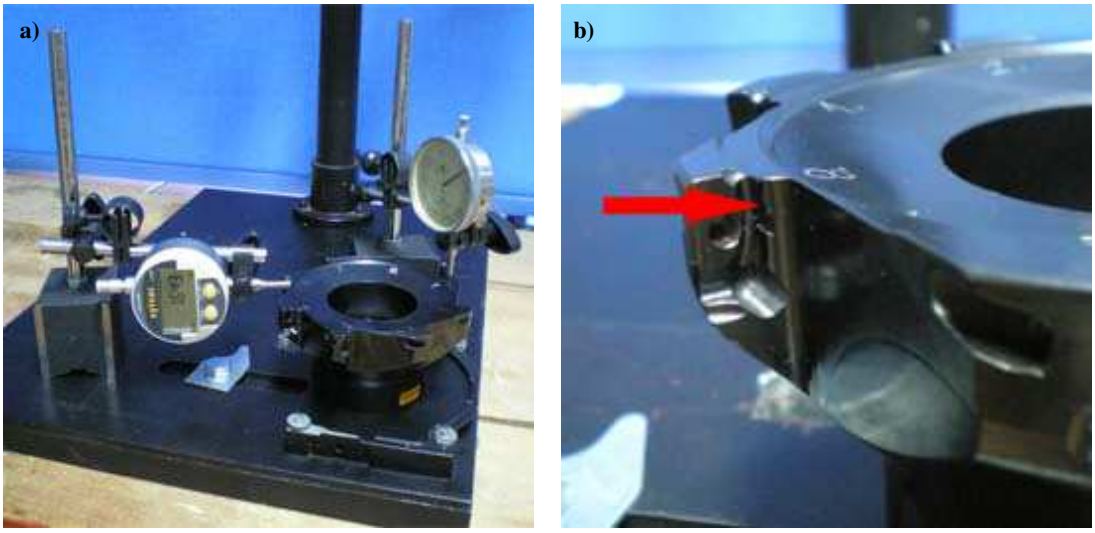
Rys. 5.32. Pomiar bicia a) zewnętrznej powierzchni ustawczej b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R390



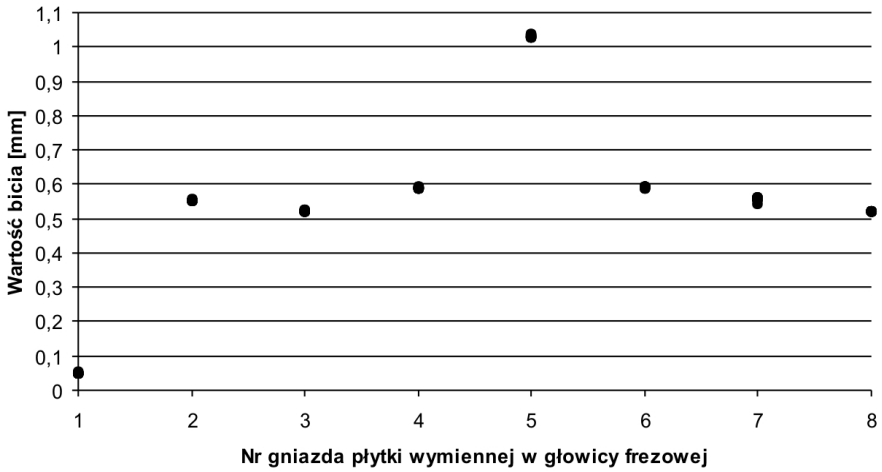
Rys. 5.33. Wyniki bicia zewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R390

Wyniki pomiarów na zewnętrznej powierzchni ustawczej (rys. 5.32) zawierały się w zakresie od 0,04 do 0,8 mm (rys. 5.33). Wykres obrazuje, że dwie powierzchnie posiadały różne wartości w stosunku od pozostałych. W przypadku gniazda nr 1, uzyskane wartości świadczą, że powierzchnia położona jest niżej, natomiast dla gniazda nr 5 wyżej, względem pozostałych powierzchni.

Na rysunku 5.34b pokazano przebieg pomiaru wewnętrznej powierzchni ustawczej gniazda w głowicy frezowej.



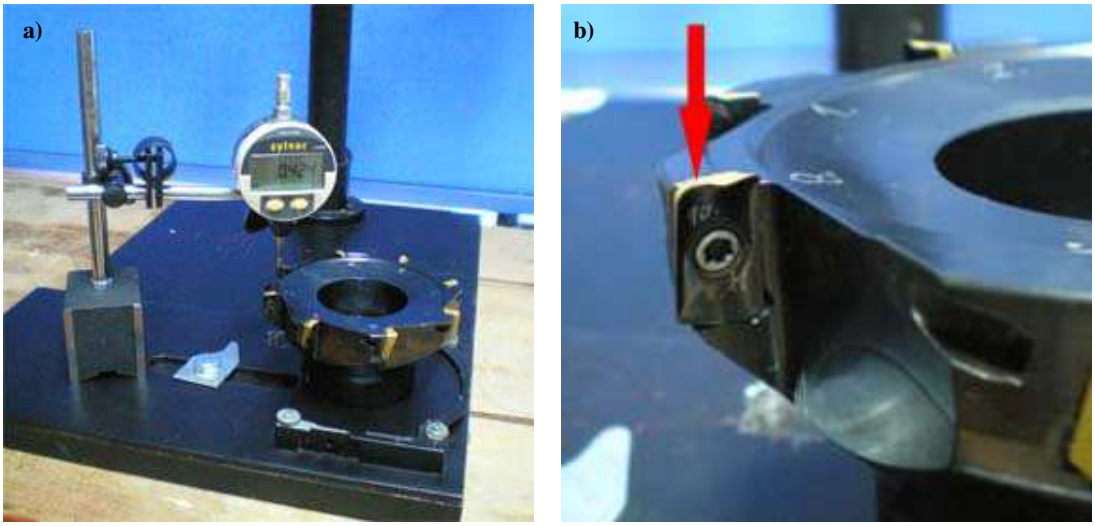
Rys. 5.34. Pomiar bicia a) wewnętrznej powierzchni ustawczej b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R390



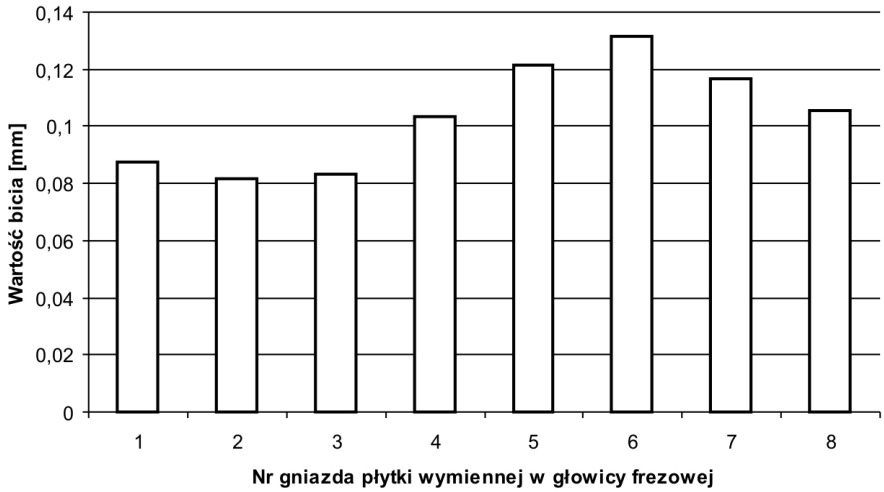
Rys. 5.35. Wyniki bicia wewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R390

Uzyskane wyniki pomiarów zawierały się w zakresie od 0,05 do 1,03 mm (rys. 5.35). W dwóch gniazdach, powierzchnie mały różne wartość od pozostałych. W przypadku gniazda nr 1, uzyskany wynik świadczy, że powierzchnia jest na mniejszej średnicy głowicy, natomiast powierzchnia gniazda nr 5 na większe względem pozostałych powierzchni w innych gniazdach.

Dla głowicy frezowej R390 zmierzono bicie czołowe płytek wymiennych. Pomiary wykonano na narożach ostrzy dla ośmiu płytek (rys. 5.36).



Rys. 5.36. Pomiar bicia czołowego a) na narożu płytki wymiennej b) w głowicy frezowej R390



Rys. 5.37. Bicie czołowe ostrzy w głowicy frezowej R390

Pomiary bicia czołowego płytek wykonano w dziesięciokrotnych powtórzonych próbach, a wartości średnie wykorzystano do stworzenia wykresu (rys. 5.37). Uzyskane wyniki obrazują zróżnicowanie bicia czołowego płytek wymiennych w zakresie do 0,08 do 0,13 mm.

5.3. Wyniki badań dla głowicy frezowej R245

Zaprezentowano rezultaty uzyskanych wyników z:

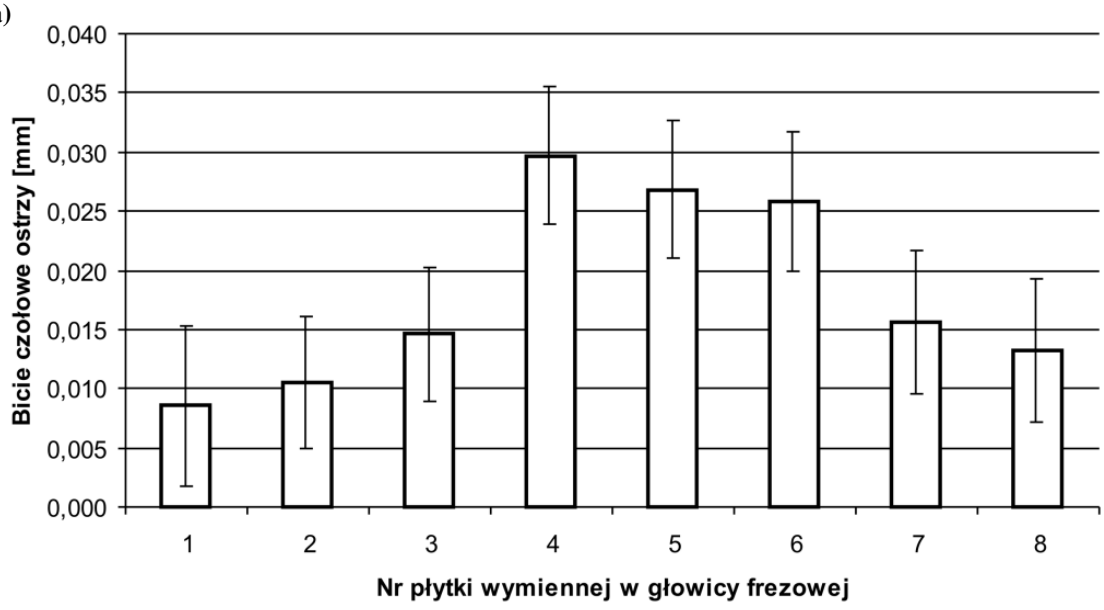
- pomiarów bicia czołowego ostrzy,
- opisu zużycia ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia i jego przyrostów wartości do drogi skrawania L_s.
- opisu powierzchni obrobionych parametrami *Ra*, *Rz*, *Rmax* i ich reprezentacji cyfrowych.

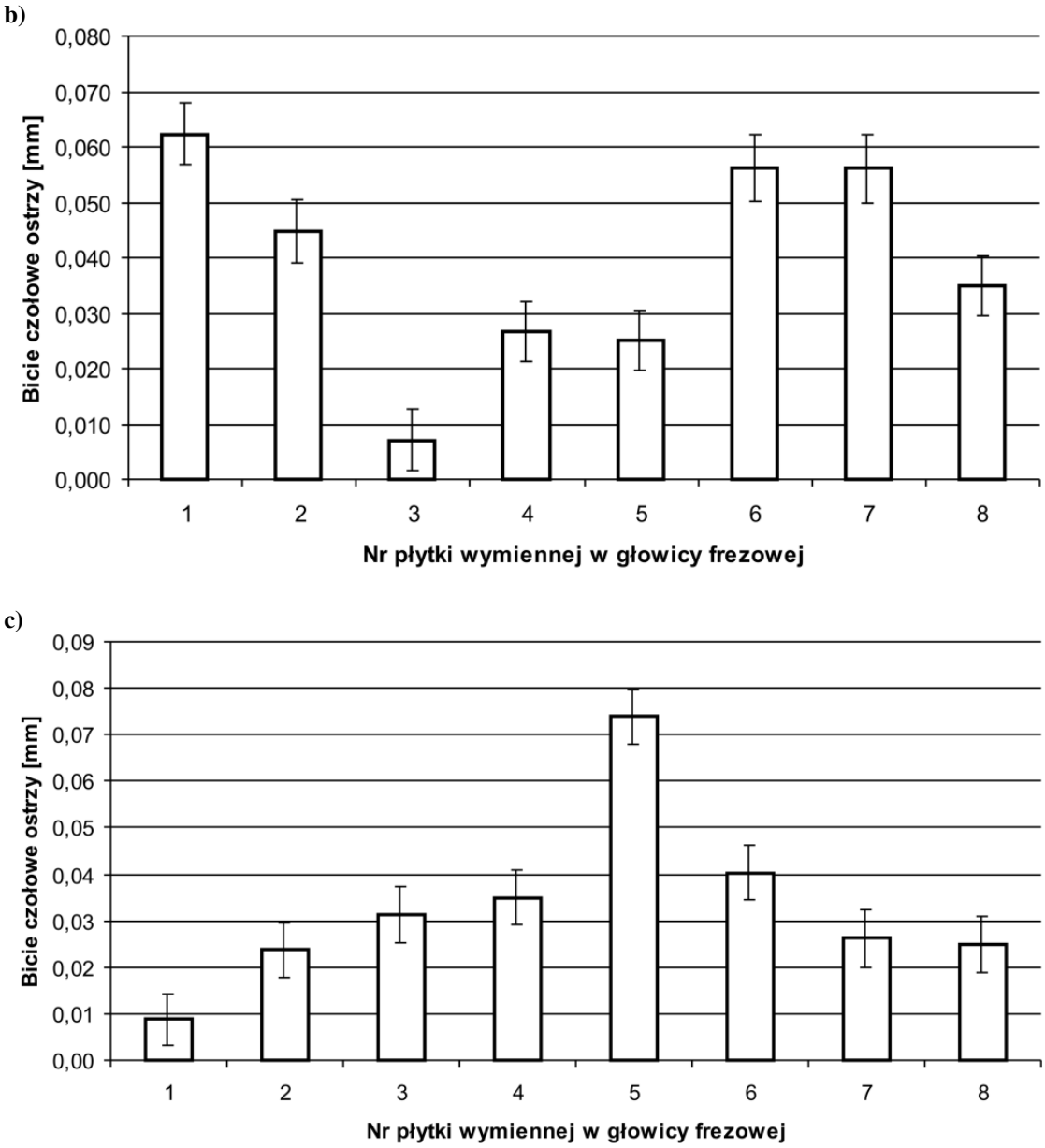
5.3.1. Badania bicia czołowego ostrzy w głowicy R245

Doświadczenie i praktyka zdobyta po przeprowadzeniu badań wstępnych, umożliwiły wybór odpowiedniej metodyki przeprowadzenia badań właściwych.

Po wykonaniu badań opisanych w podrozdziale 5.2, ujawniono błędy dokładności wykonania płytek wymiennych i powierzchni gniazd w korpusie głowicy frezowej oraz pozycjonowanie narzędzia w stosunku do powierzchni obrabianej. Podczas montażu płytek wymiennych, błędy te będą sumować się i istotnie wpływać na bicie czołowe i promieniowe ostrzy, które te z kolei będą miały wpływ na przebieg zużycia ostrzy.

a)





Rys. 5.38. Bicie czołowe płytek wymiennych w głowicy frezowej R245 dla prędkości posuwu a) v_f=355 mm/min., b) v_f=710 mm/min., c) v_f=1120 mm/min.

Przed przystąpieniem do monitorowania zużycia ostrza wykonano pomiar bicia czołowego ośmiu płytek wymiennych dla głowicy frezowej R245. Pomiary przeprowadzono tak, że przed frezowaniem, mocowano narzędzie we wrzecionie frezarki pionowej, mierzono bicie czołowe poszczególnych ostrzy na powierzchni dogładzającej b_s, po czym frezowano z ustaloną prędkością posuwu v_f.

Wyniki obrazują duże zróżnicowanie bicia czołowego płytek wymiennych. Ich charakterystyki można porównać do przebiegu sinusoidalnego (rys. 5.38a, b, c). Można odczytać, że zbliżoną tolerancję powtarzalności mocowania w głowicy miała płytka nr 4. Dla pozostałych płytek wyniki były istotnie różne.

5.3.2. Badania zużycia na roboczych powierzchniach wierzchołka ostrza w głowicy R245

Kolejnym etapem w badaniach była akwizycja obrazów cyfrowych zużycia ostrza, które zestawiono w tablicach w załączniku nr 1. Oszacowano zużycia na powierzchni dogładzającej ostrza b_s.

Zgodnie z przyjętą w rozdziale czwartym metodyką, zbierano z trzech kolejnych części obrazy cyfrowe zużytych powierzchni przyłożenia ostrza, które następnie z wykorzystaniem komputerowego programu graficznego łączono w całość, przestrzegając warunki odpowiedniego powiększenia z zachowaniem dobrej rozdzielczości i jakości obrazu cyfrowego. Wyniki tych połączeń, widoczne są na obrazach z wyraźnym przenikaniem poziomów jasności.

Przedstawiono także obraz ostrza nowego, przed frezowaniem z oznaczeniem w sygnaturze …000…, dla uwidocznienia zmian w otoczeniu naroża ostrza. Na każdy połączony obraz ostrza naniesiono skalę jednostki elementarnej 0,1 mm. Pozwoliło to na wyznaczanie wielkości przy określonym powiększeniu obrazu.

Opracowano indywidualną sygnaturę dla identyfikacji ostrza, w której kolejno oznaczono: symbol głowicy, posuw na ostrze, drogę skrawania dla jednego ostrza i nr płytki wymiennej - np. R245/0,04/307/1.

Badania obejmowały typ głowicy frezowej R245-125Q40-12M oraz trzy rodzaje płytek wymiennych dla których monitorowano jednocześnie zużycia ostrzy i odwzorowanie ich oddziaływania na powierzchni obrobionej.

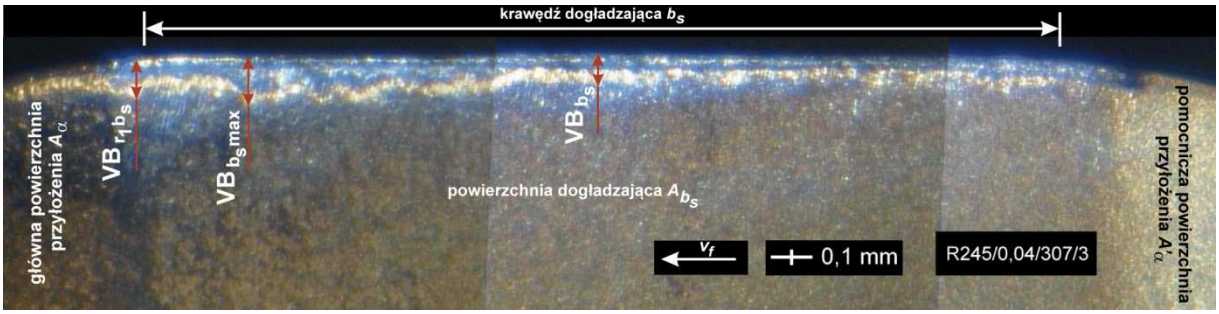
Opracowano pomocnicze tabele (tab. 7) opisujące, położenie tablicy, jej numer i stronę w której zestawiono obrazy zużycia po założonej drodze skrawania L_s i prędkości posuwu v_f.

Tabela 7. .....

SYMBOL GŁOWICY FREZOWEJ	**PRĘDKOŚĆ POSUWU v_f [mm/min]**	**DROGA SKRAWANIA L_s [m]**	**NR OSTRZA**	**NR TABLICY**
R245	355	307 682 1189 1568 1813	1	5
			2	6
			3	7
			4	8
			5	9
			6	10
			7	11
			8	12
	710	1155 2311 3446 4044 4682 5320 5958 6596 7434 7553	1	13
			2	14
			3	15
			4	16
			5	17
			6	18
			7	19
			8	20
	1120	286	1	21

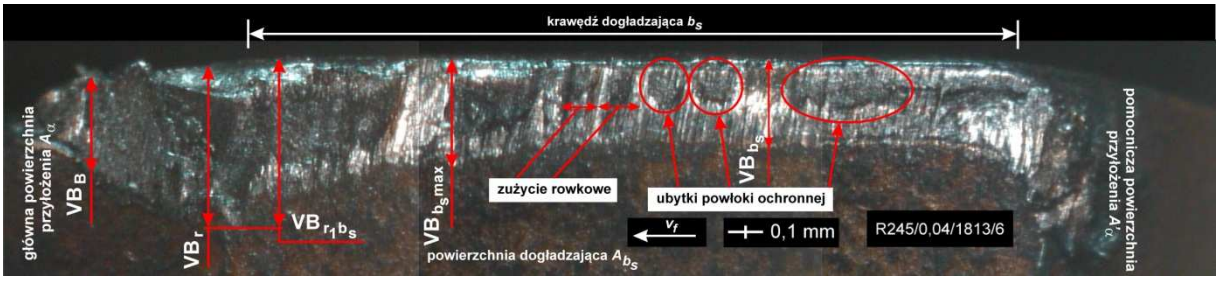
		503 660 787	2	22
			3	23
			4	24
			5	25
			6	26
			7	27
			8	28

Poniżej opisano wyniki zużycia ostrzy dla frezowania z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min dla głowicy frezowej R245. Akwizycję danych zaplanowano po: 307, 682, 1189, 1568, 1813 metrach drogi skrawania L_s przypisanej dla każdego z ostrzy (tab. 7). Po 307 metrach frezowania dla ostrza nr 1, 4, 5, 6 (tabl. 5, 8 - 10) zużycie widoczne było na całej powierzchni dogładzającej, a dla ostrzy nr 2, 7, 8 tylko na narożu ostrza (tabl. 6,11,12). Wyjątek stanowi ostrze nr 3 dla którego zauważalne było zużycie na narożu i w 1/3 części powierzchni dogładzającej (rys. 5.3.4.) (tabl. 7), podobnie po 1189 metrach na ostrzu nr 2.



Rys. 5.39. Zużycie ostrza nr 3 po 307 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z= 0,04 mm/ostrze

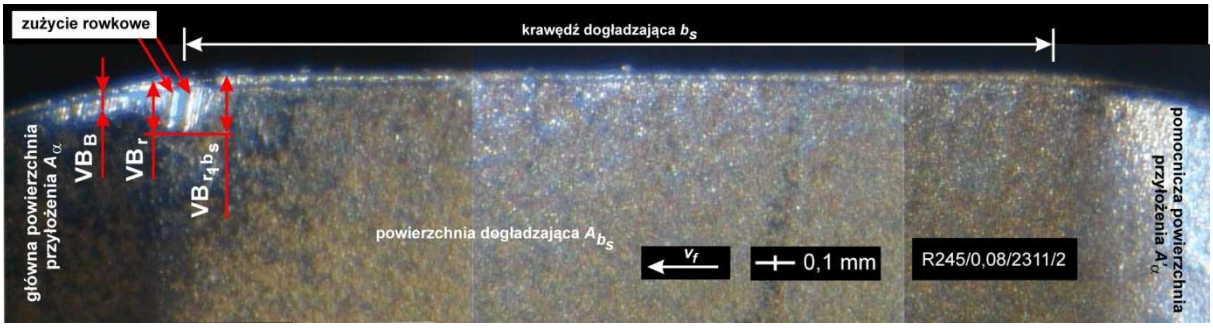
Rejestrując kolejne fazy zużycia, widoczne na obrazach cyfrowych, stopniowo się rozwijało na szerokość krawędzi b_s i powiększało w kierunku do niej prostopadłym. Dotyczyło to wszystkich ostrzy. Dla ostrza nr 2, 3, 7 po 682 metrach drogi skrawania, zużycie rozwinęło się na narożu i na powierzchni dogładzającej, ponadto zaobserwowano wykruszenie na krawędzi skrawającej. Dla ostrza nr 4, 8 widoczne były zużycia rowkowe na powierzchni dogładzającej i na narożu ostrza. Po 1568 metrach na ostrzach nr 7, 8, nastąpiło oderwanie powłoki ochronnej w otoczeniu naroża $r_{\varepsilon 1}$. Zdarzenie takie zaobserwowano na ostrzach nr 4, 6 po 1813 metrach drogi skrawania (rys. 5.40) (tabl.10). Po dłuższej drodze skrawania na ostrzu nr 8 stwierdzono obecność narostu na powierzchni dogładzającej.



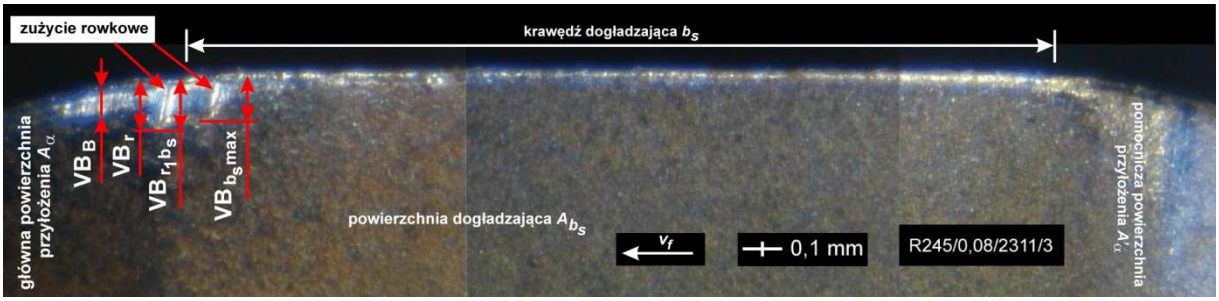
Rys. 5.40. Zużycie ostrza nr 6 po 1813 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,04 mm/ostrze

Wpływ temperatury skrawania i utleniania ujawniły się na ostrzach w postaci czarnych plam. Wyraźnie widoczne było to dla dłuższej drogi skrawania.

Dla frezowania prędkością posuwu v_f = 710 mm/min, wyniki zużycia ostrzy zestawiono w tablicach 13 - 20. Akwizycję obrazów cyfrowych zaplanowano po: 1155, 2311, 3446, 4044, 4682, 5320, 5958, 6596, 7434, 7553 metrach drogi skrawania L_s. Na ostrzach nr 1, 2, 3, 5, 8 (tabl. 13 - 15, 17, 20) zużycie skoncentrowało się głównie w otoczeniu ich naroży, widoczne jako pojedyncze (rys. 5.41) lub podwójne (rys. 5.42) zużycie rowkowe, które powiększało się z rosnącą drogą frezowania. Zużycie wystąpiło także na powierzchni dogładzającej i dotyczyło to ostrzy nr 4, 6 i 7, gdzie ślad wytarcia był nierównomierny (tabl. 16, 18, 19).

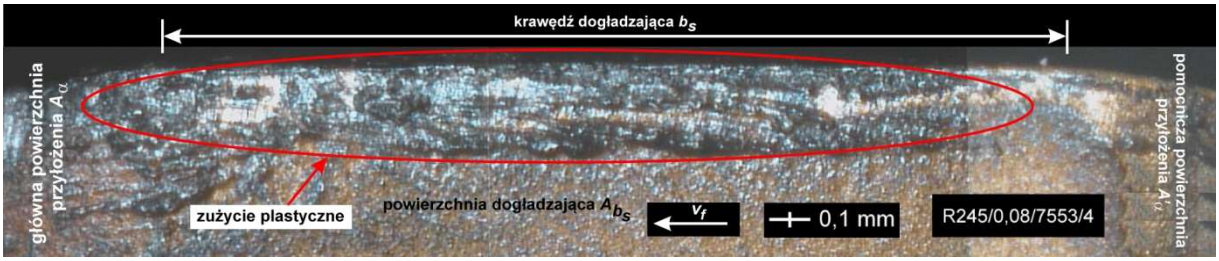


Rys. 5.41. Zużycie ostrza nr 2 po 2311 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze



Rys. 5.42. Zużycie ostrza nr 3 po 2311 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze

Na początku drogi skrawania na ostrzu nr 1 zużycie widoczne było na 1/3 powierzchni dogładzającej mierzonej od naroża $r_{\varepsilon 1}$ a jego wartość była niewielka. Po 2311 metrów skrawania na ostrzu nr 1, zarejestrowano wyraźne zużycie rowkowe w okolicy naroża. Podczas dalszego frezowania, wielkość zużycia narastała i kolejno zauważalne były zjawiska oderwania się powłoki ochronnej, narostu i pęknięć termicznych (łuszczenie). Po 4044 metrach frezowania na ostrzu nr 2 zużycie rozwinęło się na całej powierzchni dogładzającej. W środkowej jej części i na narożu nastąpiło oderwanie się warstwy ochronnej ostrza. Przy dalszym skrawaniu powiększyło swój ubytek. Dla ostrza nr 4 po 5958 metrach frezowania zużycie pojawiło się na narożu ostrza, które powiększało się podczas dalszego frezowania. Po 7553 metrach frezowania nastąpiło zużycie plastyczne na tym ostrzu (rys. 5.43)

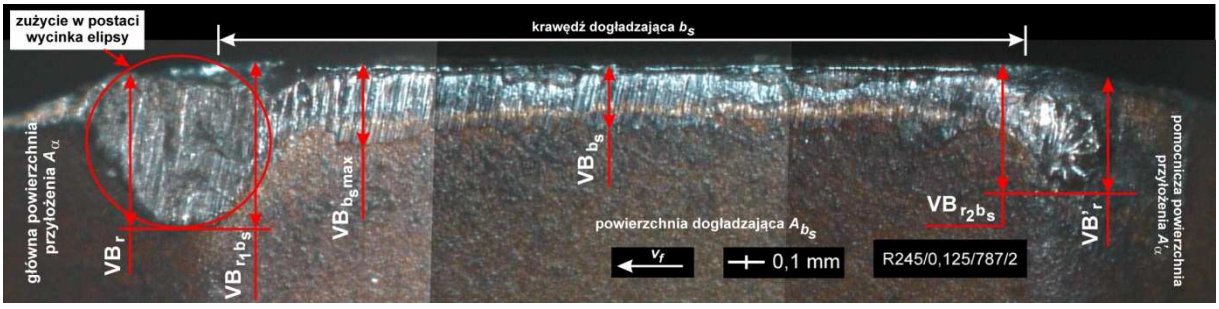


Rys. 5.43. Zużycie ostrza nr 4 po 7553 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze

Zużycie na ostrzu nr 5 pojawiło się na powierzchni dogładzającej od strony naroża i miało to miejsce po 2311 metrach frezowania. Po 4044 metrach zwiększyło się wytarcie na powierzchni dogładzającej w 2/3 jej długości. Podczas dalszego frezowania, wystąpił narost na ostrzu oraz ubytek warstwy ochronnej. Jeśli prześledzić zachowanie się ostrza nr 6, 7, to po 2311 metrach skrawania na narożu widoczny jest ślad zużycia rowkowego, który po 4682 metrach frezowania ujawnił się na całej długości powierzchni dogładzającej ostrza. Podczas dalszego frezowania, zużycie rowkowe zanikło, a następnie pojawił się ślad wytarcia na powierzchni dogładzającej, który powoli się powiększył z rosnącą drogą frezowania. Pod koniec skrawania dla ostrzy nr 6, 7, 8 zaobserwowano nieznaczne zużycie plastyczne oraz drobne ubytki powłoki ochronnej w okolicach krawędzi skrawającej i naroża ostrza. Na obrazach powierzchni obrobionej słabo ale zauważalne były skutki tych zjawisk

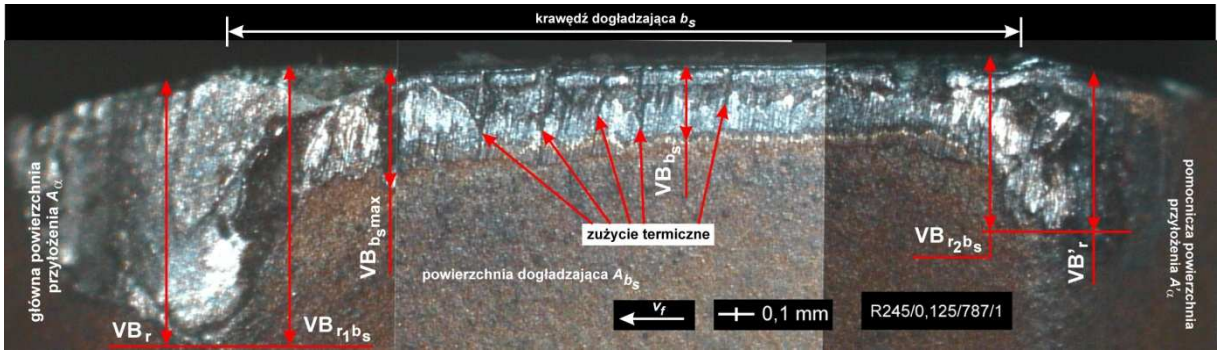
Analizą objęto także rozwinięcie zużycia ostrza dla frezowania z prędkością posuwu v_f = 1120 mm/min. Wyniki zużycia zestawiono w tablicach 21-28. Akwizycję obrazów cyfrowych zaplanowano po: 286, 503, 660, 787 metrach drogi skrawania L_s.

Ostrza od nr 1 do 8 zużywały się w otoczeniu naroża ostrza w postaci elipsy (rys. 5.44) oraz jako wytarcia na powierzchni dogładzającej b_s.



Rys. 5.44. Zużycie ostrza nr 2 po 787 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze

Dla wszystkich ostrzy zużycie rozwijało się narastająco w stosunku do drogi skrawania. Zarejestrowano wykruszenie na krawędzi skrawającej w okolicy naroża $r_{\varepsilon 1}$ i na powierzchni dogładzającej dla ostrzy nr 2, 4, 8 (tabl. 22, 24, 28). Po 503 metrach drogi frezowania dla ostrzy nr 1, 4, 7 widoczny był ubytek materiału płytki wymiennej w okolicy naroża $r_{\varepsilon 1}$. Dla ostrzy nr 3, 5 - 8 pojawiły się ślady zużycia rowkowego, które powiększały się z narastającą drogą frezowania.



Rys. 5.45. Zużycie ostrza nr 1 po 787 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze

Po 787 metrach skrawania na ostrzu nr 1 wystąpiło zużycie termiczne (łuszczenie) na powierzchni dogładzającej (rys. 5.45) oraz wyraźny ubytek materiału płytki wymiennej na ostrzu nr 5 (tabl. 25).

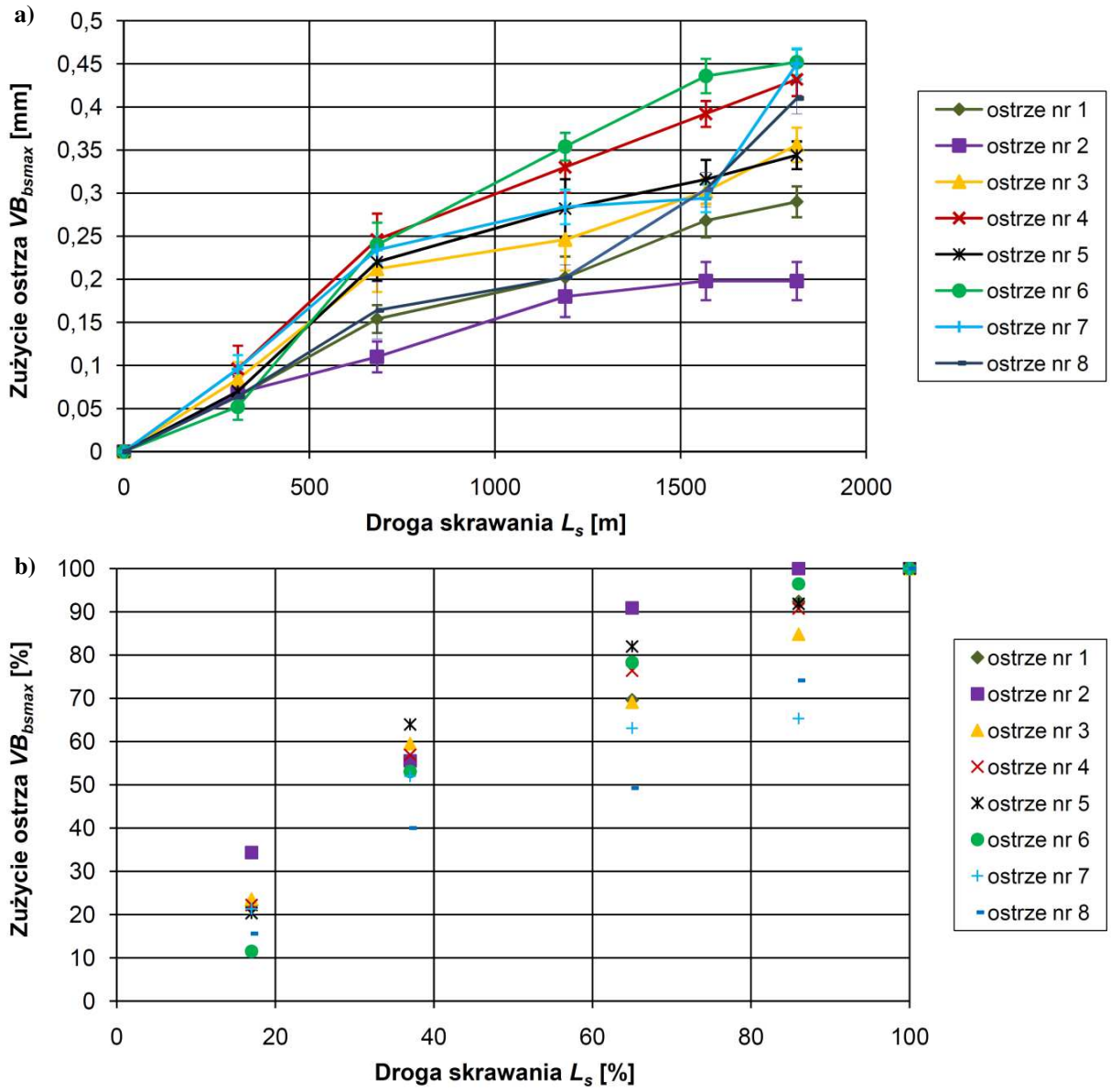
5.3.3. Identyfikacja trwałości poszczególnych ostrzy w głowicy R245

Po złożeniu obrazów zużycia, według przyjętej metodyki i porównaniu z widoczną skalą wzorca, wyznaczono wartości wytarcia VB_{bsmax} dla ostrzy na powierzchnią dogładzającą b_s. Pomiary powtarzano wielokrotnie dla uzyskania dokładnych wyników, a wartości średnie wykorzystano do opracowania wykresów zależności zużycia ostrzy i drogi skrawania L_s.

Droga skrawania była zmienna dla głowicy frezowej R245 przy zachowaniu trzech różnych prędkości posuwu v_f. Dążono do tego, aby ostrza doprowadzać do granic dopuszczalnego zużycia, co miało znaczenie dla otrzymania oczekiwanej dokładności wyników.

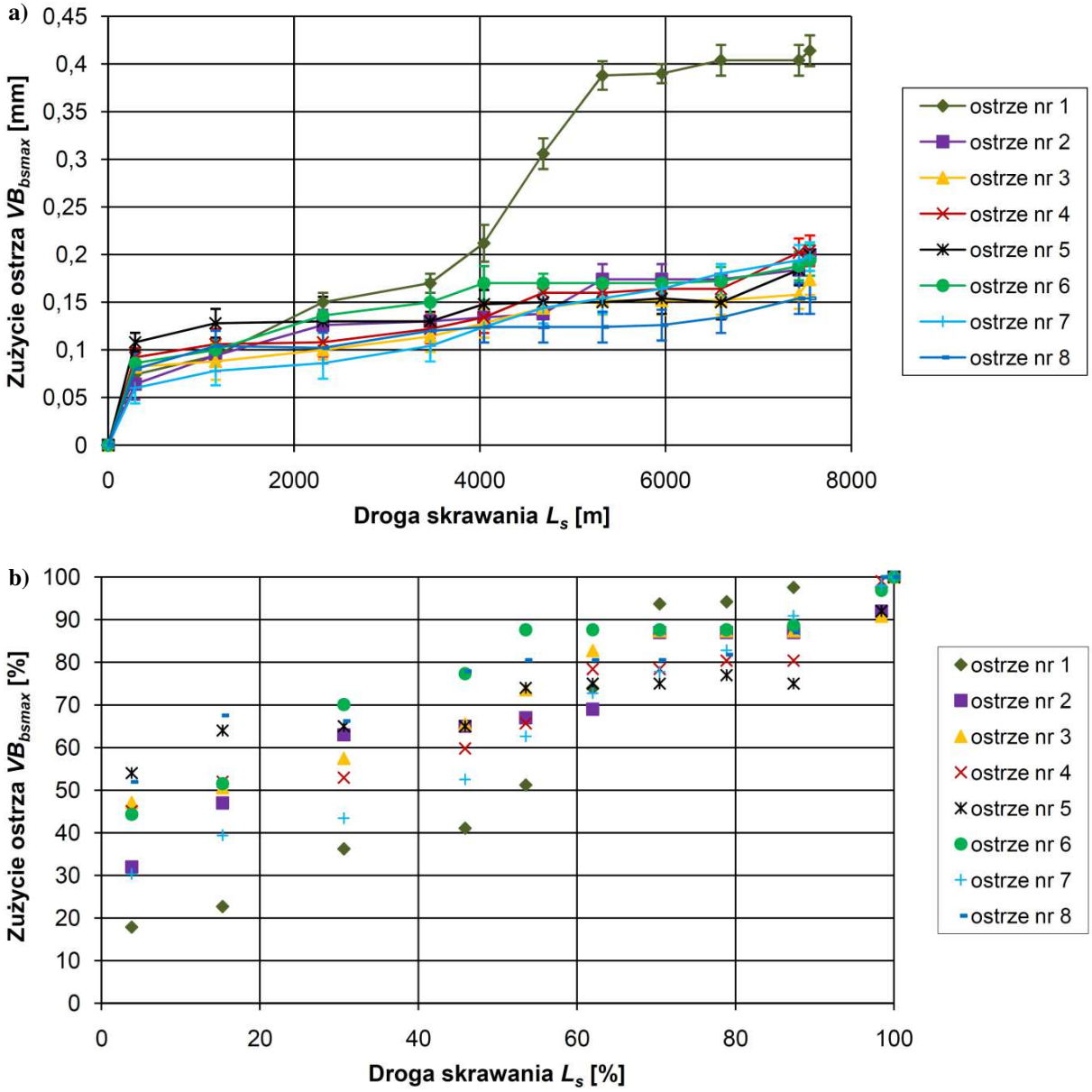
W tym rozdziale prócz wyników przebiegów zużycia dla każdego z ośmiu ostrzy, przedstawiono wyniki stosując normowanie wyznaczonych wartości. Istota normowania polega na tym, że najdłuższej drodze skrawania przypisywano wartość 100%. Także, największemu zużyciu VB_{bsmax} przyporządkowano 100% wartości. Otrzymane w ten sposób wykresy ilustrują przebiegi zużycia w funkcji drogi w zakresie ich zmian 100% na 100%.

Porównywano, przy dopuszczalnym przykładowym kryterium zużycia 0,4 mm, wartości bieżące zużycia dla każdego z ośmiu naroży. Wyznaczane w ten sposób procentowe przyrosty zużycia nanoszono na oś rzędnych na wykresy. Przebiegi unormowanych udziałów procentowych zilustrowano na rysunkach. 5.46b - 5.4b, 5.69b - 5.71b dla ostrzy handlowych, natomiast dla ostrzy zmodyfikowanych przedstawiono na rysunkach 5.85b - 5.87b i 5.99b - 5.101. Oczekiwano, że unormowanie wyników pozwoliłyby na uproszczenie monitorowania procesu dając także poważne oszczędności procesu. Od dziesiątków lat dążono do takiego przedstawienia przebiegów zużycia naroży, które potwierdzałyby założenie o podobieństwie ich w układzie procentowym. Rozumowanie polega na podobieństwie ośmiu procesów skrawania zachodzących jednocześnie, przy niezmiennych warunkach obróbki. Oczekiwano, że tak unormowane wyniki pozwolą na ważne interpretacje dotyczące zjawisk przykrawędziowych.



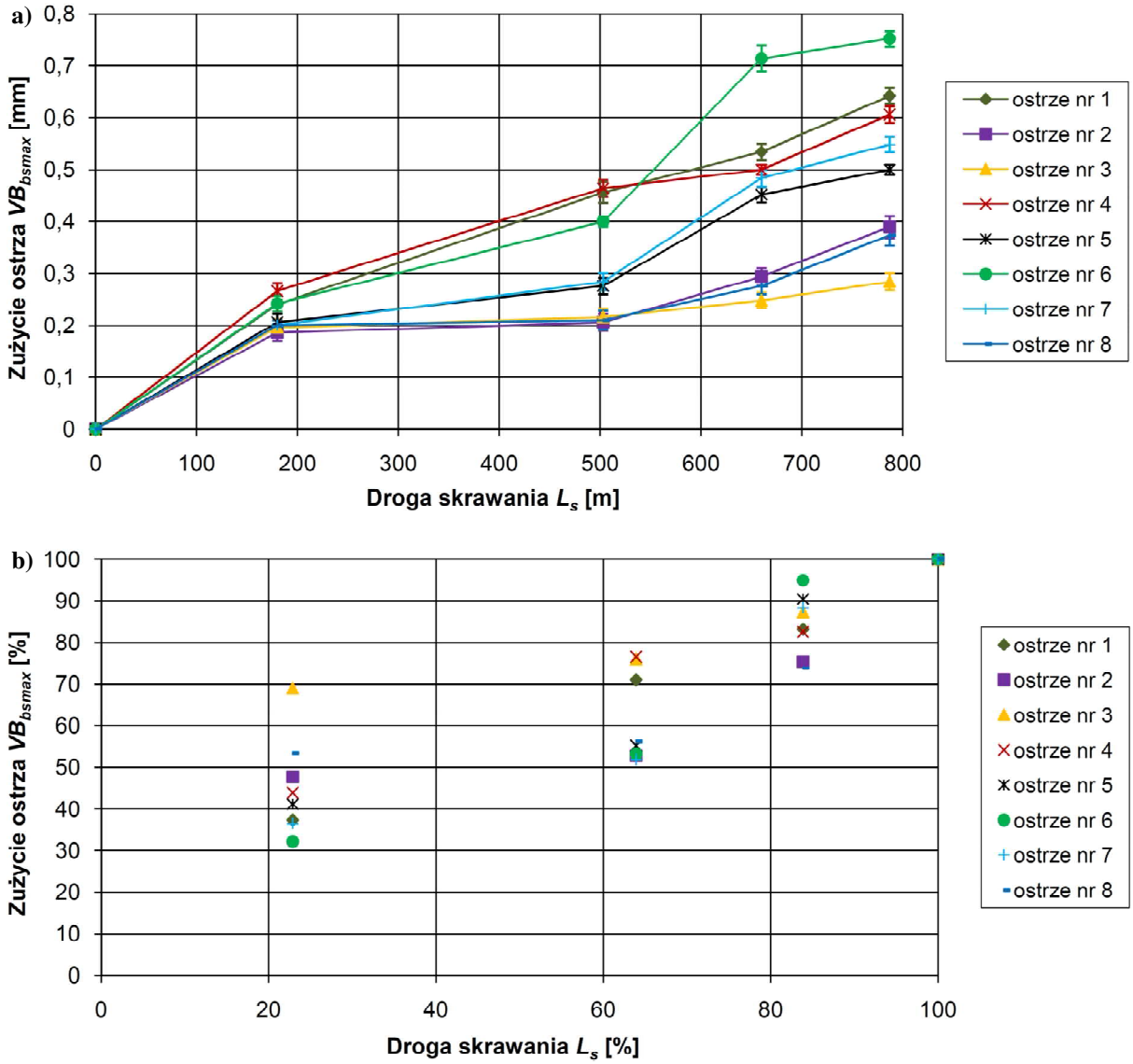
Rys. 5.46. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min.

Podczas frezowania z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min pomiary zużycia ostrza przeprowadzono po przebyciu pięciu kolejnych odcinków drogi skrawania przez ostrze, które przebyło 1813 metrów. Widoczne jest, że początkowe wartości zużycia były skupione w zakresie od 0,05 do 0,1 mm. Po około 600 metrach frezowania wyniki zaczęły być rozbieżne i do końca drogi frezowania zachowywały się tak charakterystycznie. Ostrza w widoczny sposób zużywały się różnie. Największe zużycie było dla ostrzy nr 4,5,6, mniejsze dla nr 3,7,8. Najmniejsze zużycie zarejestrowano dla ostrzy nr 1,2 (rys. 5.46a). Taki przebieg wyjaśnia słuszność związków zużycia ostrza z jego biciem czołowym opisanym w podrozdziale 5.3 (rys. 5.38a). Po zakończeniu pomiarów najmniejsze zużycie zaobserwowano dla ostrza nr 2, które osiągnęło wartość VB_{bsmax} ~0,2 mm, a największe ~0,45 mm dla ostrza nr 6.



Rys. 5.47. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min.

Wyniki zużycia ostrza dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min przedstawiono na rysunku 5.47a. Pomiary wykonywano dla jedenastu punktów na drodze skrawania równej 7553 metrów. Na początku drogi zużycie ostrzy mieściło się w zakresie VB_{bsmax} od ~0,06 do ~0,11 mm. Dla ostrza nr 1, po 2300 metrach frezowania, wartość zużycia zaczęła rosnąć. Taki wyraźny przyrost potwierdził wpływ bicia czołowego ostrzy na zużycie, ponieważ ostrze to było najbardziej wysunięte (rys. 5.38b). Podczas dalszego frezowania, zużycie rosło i po 5300 metrach drogi skrawania osiągnęło wartość VB_{bsmax} ~0,39 mm. Wartość zużycia dla tego ostrza przyrastało liniowo do zakończenia frezowania. Dla pozostałych ostrzy wartości zużycia nieznacznie się zmieniały, aby ostatecznie przyjąć wartości zużycia VB_{bsmax} od ~0,15 do ~0,2 mm.



Rys. 5.48. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min.

Zmierzone zużycia ostrza dla kolejnej prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min, wykonano w po czterech narastających odcinkach drogi skrawania, która wynosiła 787 metrów (5.48a). Po 180 metrach frezowania wartości zużycia ostrzy mieściły się w zakresie VB_{bsmax} od ~0,19 do ~0,26 mm. Dalsze skrawanie powodowało, że obserwowane zmiany zużycia rosły i były rozbieżne. Wyraźny przyrost wartości zużycia nastąpił po 500 metrach frezowania dla ostrza nr 6. Po zakończaniu badań zakres zużycia VB_{bsmax} dla wszystkich ostrzy wynosił od ~0,4 do ~0,75 mm. Dla tej prędkości posuwu zależności pomiędzy biciem czołowym, a zużyciem nie były wyraźnie skorelowane (rys. 5.38c). Najbardziej wysuniętym ostrzem było nr 5 i ono powinno się zużywać szybciej. Tymczasem wartość jego zużycia była średnią wartością do pozostałych ostrzy. Najbardziej zużywały się ostrza nr 1 i 4, które z kolei były jednymi z najmniej wysuniętych z korpusu narzędzia.

5.3.4. Badanie chropowatości powierzchni obrobionej po frezowaniu głowicą R245

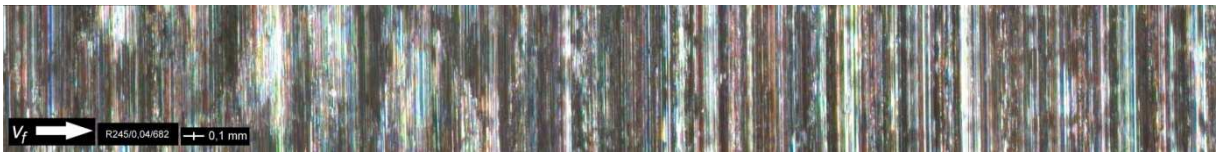
Między ostrzem, a dokładniej jego pomocniczą powierzchnią przyłożenia i powierzchnią obrabianą zachodzą związki wzajemnego oddziaływania. Ślady zużycia ostrza odwzorowują się na powierzchni obrobionej tworząc nierówności [STO 89]

W narzędziach wieloostrzowych, z ostrzami z powierzchnią dogładzającą b_s, wpływ jej śladów zużycia na ostateczną strukturę powierzchni, zależeć będzie od struktury powierzchni jednej z płytek wymiennych. Po pewnym czasie na wynikową nierówność składa się oddziaływanie kilku ostrzy o wartościach bicia czołowego identycznych lub zbliżonych do siebie. Wykorzystując płytki wymienne z powierzchnią dogładzającą otrzymamy, że nierówności powierzchni zależą od tej części ostrza, która znajduje się w okolicy drugiego promienia zaokrąglenia naroża $r_{\varepsilon 2}$ i przesuniętej o wartość posuwu w kierunku naroża $r_{\varepsilon 1}$.

Do oceny wyników z badań nierówności powierzchni, wykorzystano metody statystyczne, które opisują chropowatości następującymi parametrami: *Ra* – średnich arytmetycznych rzędnych profilu, *Rz* – wysokości nierówności według 10 punktów, *Rmax* – całkowitej wysokość profilu (miedzy szczytem najwyższego wierzchołka, a najniższym zagłębieniem)

Pomiary dokonywano po przyjętych odstępach drogi skrawania L_s z jednoczesnym zapisem obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej. Uzyskane wyniki wykorzystano do opracowania wykresów zmienności dla trzech prędkości posuwu stołu frezarki v_f.

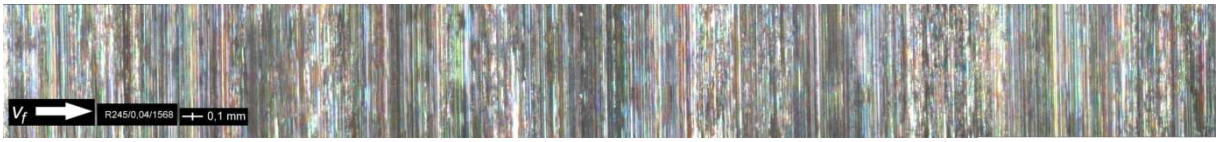
Dla głowicy R245 z pomiarów chropowatości przeprowadzonych po frezowaniu z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min (rys. 5.53a) wynika, że po 700 metrach drogi skrawania parametry chropowatości rosły: *Ra* od 1 do 1,3 µm, *Rz* od 3,5 do 5,5 µm, *Rmax* od 7,5 do 7,8 µm.



Rys. 5.49. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 682 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

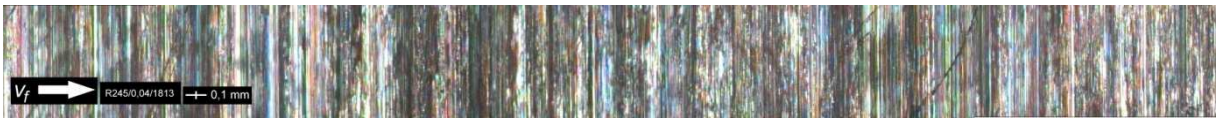
Rys. 5.50. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 1189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

Po osiągnięciu 1568 metrów wartości parametrów nadal rosły; *Ra* do 1,6 µm, *Rz* do 8 µm, *Rmax* do 11,3 µm.



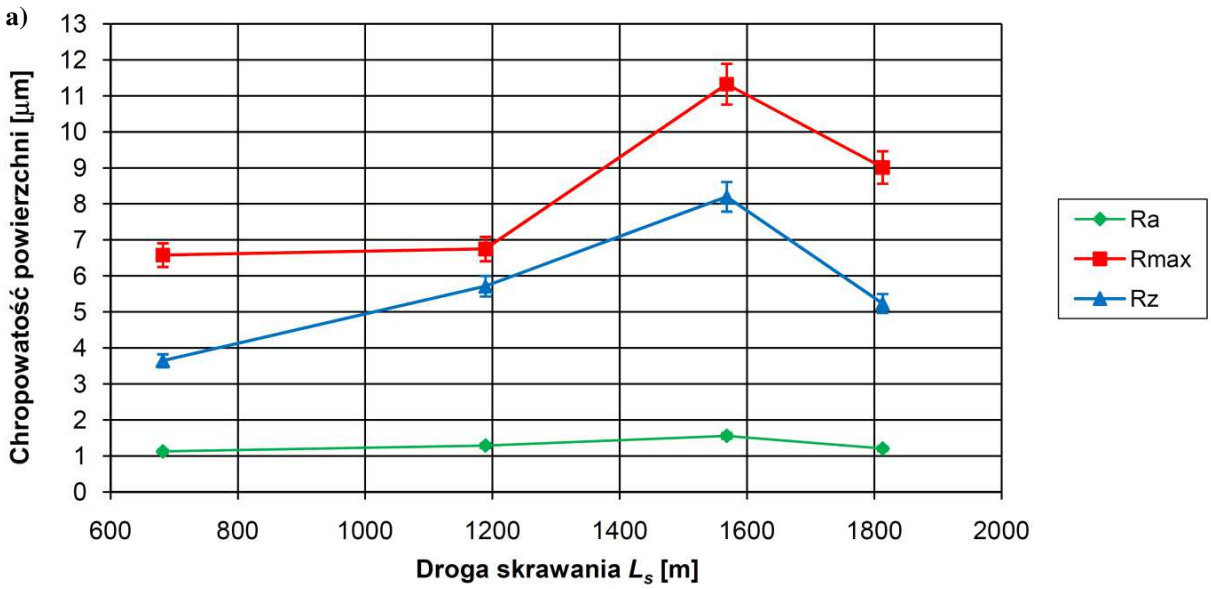
Rys. 5.51. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 1568 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min

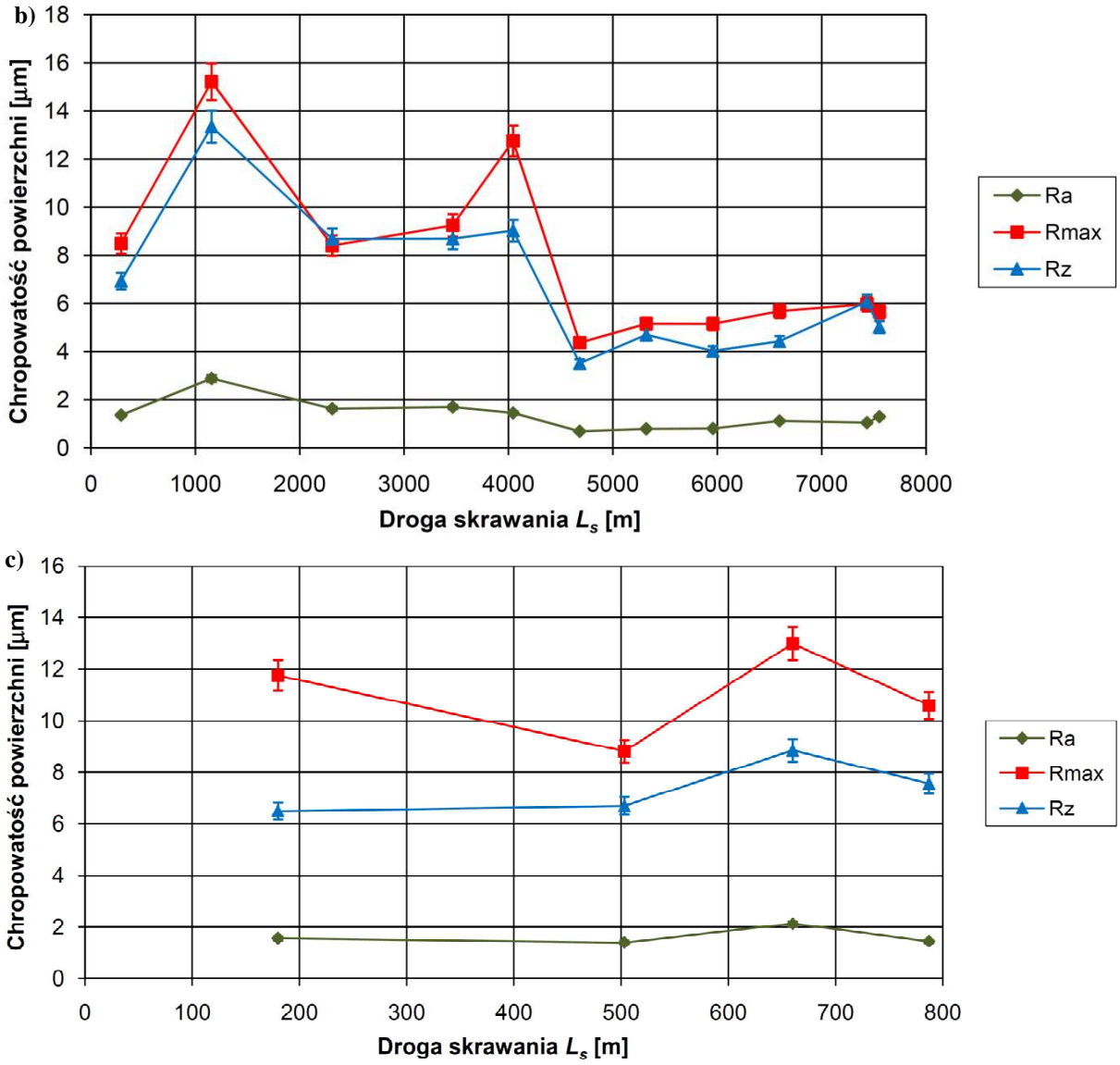
Po 1800 metrach wartości parametrów zmalały do *Ra* = 1,1 µm, *Rz* = 5 µm, *Rmax* = 9 µm.



Rys. 5.52. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 1813 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

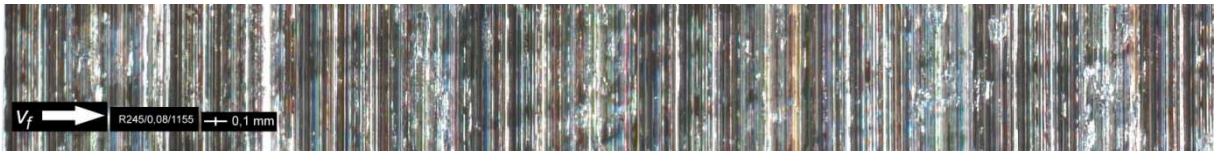
Obrazy cyfrowe powierzchni po frezowaniu z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min, zapisywano jednocześnie w miejscu pomiaru chropowatości i zaprezentowano je na rysunkach 5.49 - 5.52.





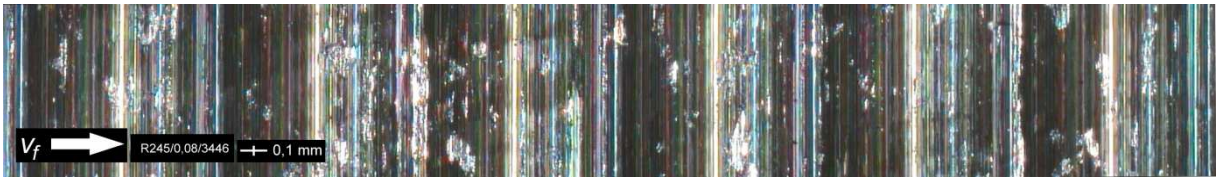
Rys. 5.53. Przebieg zmian parametrów chropowatości powierzchni obrobionej dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu a) v_f=355 mm/min, b) v_f=710 mm/min, c) v_f=1120 mm/min

Z pomiarów chropowatości przeprowadzonych po frezowaniu z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min (rys. 5.53b) stwierdzono, że po 200 metrach drogi skrawania parametry chropowatości rosły do wartości: *Ra* od 1,3 do 3 µm, *Rz* od 7 do 13 µm, *Rmax* od 8,5 do 15,4 µm.



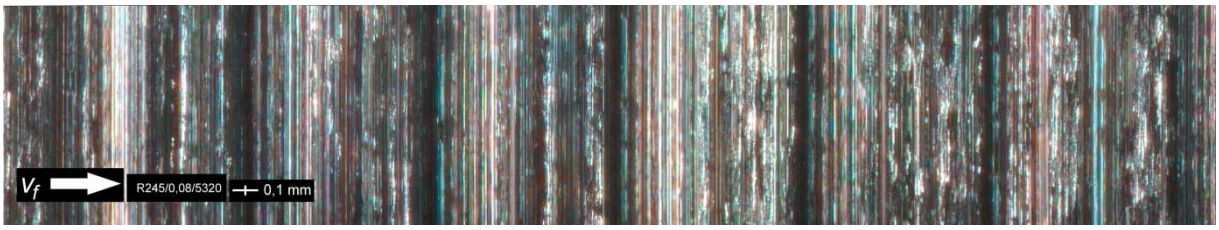
Rys. 5.54. Obraz cyfrowy powierzchni po 1155 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min

Po osiągnięciu 1200 metrów wartości parametrów zmalały *Ra* do 2,8 μm, *Rz* do 8,5 μm, *Rmax* do 8,5 μm. Pomiar po 3400 metrów drogi skrawania wykazał, że wartości parametrów *Rmax* i *Rz* ponownie rosną, a parametr *Ra* maleje.



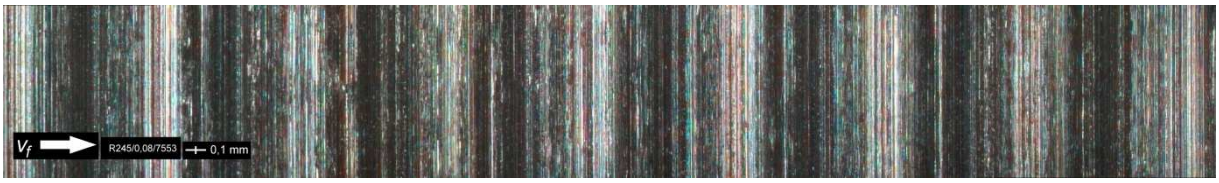
Rys. 5.55. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 3446 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min

Natomiast po przeskrawaniu 4700 metrów wszystkie parametry malały o prawię połowę swojej wartości i były równe *Ra* = 0,6 μm, *Rz* = 3,8 μm, *Rmax* = 4,1 μm.



Rys. 5.56. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 5320 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min

Pomiary parametrów chropowatości na kolejnych odcinkach drogi skrawania wykazały, że ich wartości zwiększały się nieznacznie osiągając dla *Ra* = 1,3 μm, *Rz* = 5 μm, *Rmax* = 5,7 μm.



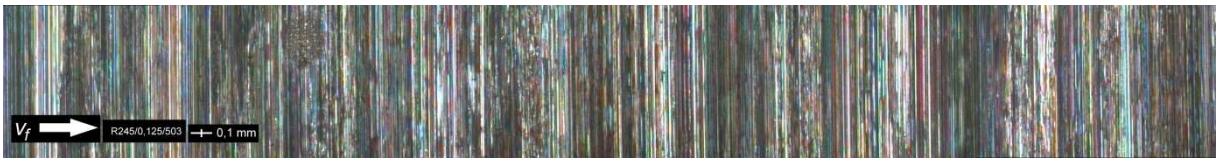
Rys. 5.57. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 7553 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min

Z uwagi na liczne pomiary chropowatości powierzchni dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min, na rysunkach 5.54 - 5.57 zestawiono wybrane ważniejsze obrazy cyfrowe powierzchni po frezowaniu

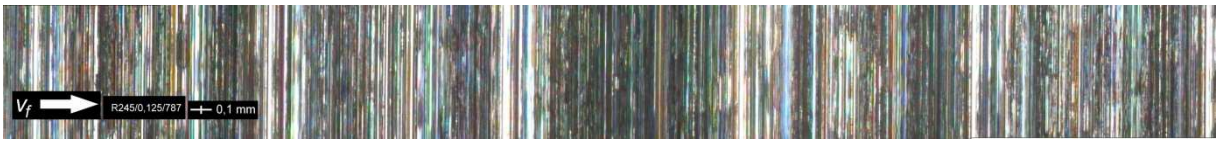
Po wykonaniu pomiarów chropowatości powierzchni obrobionej z prędkością posuwu v_f = 1120 mm/min (rys. 5.53c) stwierdzono, że po 180 metrach drogi skrawania *Ra* i *Rmax* zmalały odpowiednio od 1,8 do 1,7μm i od 11,8 do 8,9 μm, natomiast parametr *Rz* wzrósł od 6,5 μm do 6,8 μm.

Rys. 5.58. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 180 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min

Po osiągnięciu 500 metrów skrawania, wartości wszystkich parametrów zwiększyły się i tak *Ra* do 2,1 μm, *Rz* do 8,8 μm, *Rmax* do 13 μm.



Rys. 5.59. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 503 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min



Rys. 5.60. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 787 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min

Po osiągnięciu 650 metrów wartości zmalały, a po 790 metrach drogi skrawania zmierzone parametry były o wartościach: *Ra* = 1,7 μm, *Rz* = 7,7 μm, *Rmax* = 10,6 μm.

Obrazy cyfrowe powierzchni po frezowaniu dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min zamieszczono na rysunkach 5.58 - 5.60.

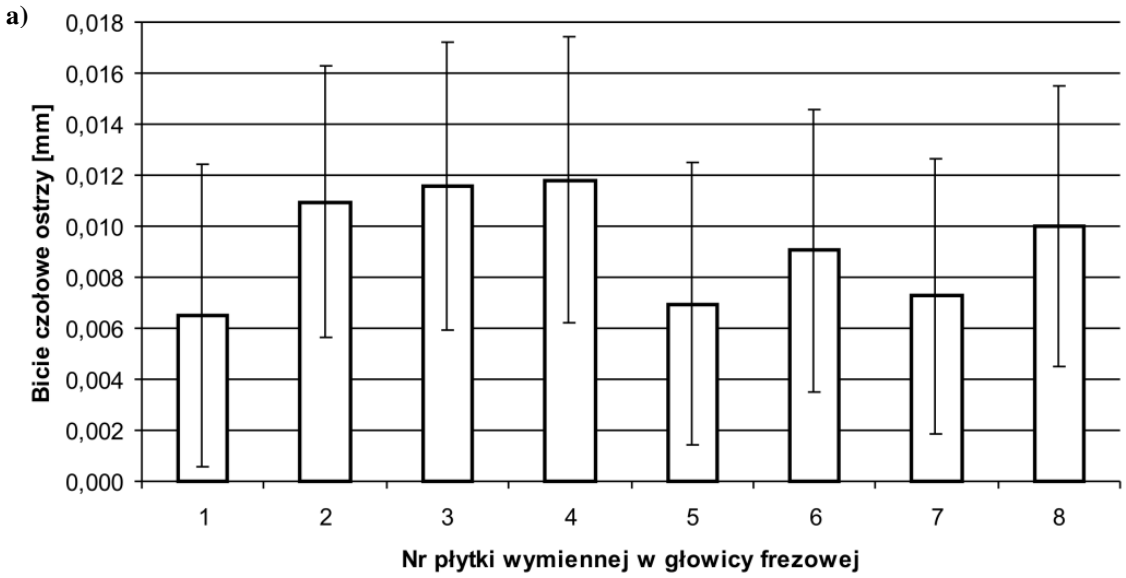
5.4. Wyniki badań dla głowicy frezowej R390

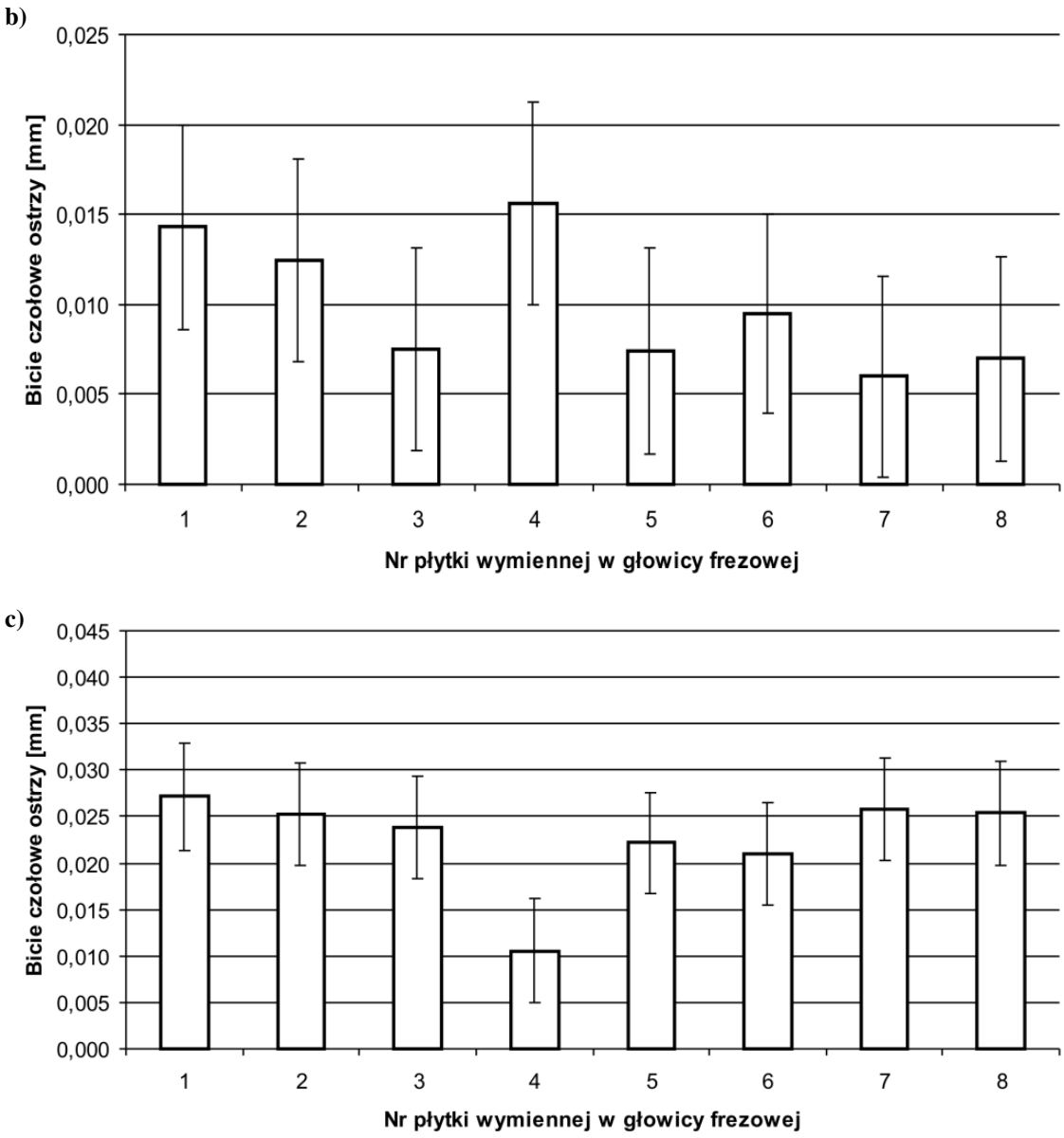
Przedstawiono rezultaty uzyskanych wyników z:

- pomiarów bicia czołowego ostrzy,
- opisu zużycia ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia i jego przyrostów wartości do drogi skrawania L_s.
- opisu powierzchni obrobionych parametrami *Ra*, *Rz*, *Rmax* i ich reprezentacji cyfrowych.

5.4.1. Badania bicia czołowego ostrzy w głowicy R390

Pomiary bicia czołowego przeprowadzono dla ośmiu płytek wymiennych w głowicy frezowej R390 i wykonano je bezpośrednio na frezarce pionowej. Bicie czołowe mierzono dla poszczególnych ostrzy na pomocniczej powierzchni przyłożenia, po czym frezowano z ustaloną prędkością posuwu v_f.





Rys. 5.61. Bicie czołowe płytek wymiennych w głowicy frezowej R390 dla prędkości posuwu a) v_f=355 mm/min, b) v_f=710 mm/min, c) v_f=1120 mm/min

Opisane, we wcześniejszych podrozdziałach, błędy dokładności wykonania płytek wymiennych i powierzchni gniazd w korpusie głowicy frezowej potwierdziły wpływy z sumowania się ich na duże zróżnicowanie ustawienia płytek wymiennych, które przedstawiono na rysunku 5.61a, b, c.

5.4.2. Badania zużycia na roboczych powierzchniach wierzchołka ostrza w głowicy R390

Opisano wyniki kolejnych badań zużycia ostrzy (tabl. 29 - 52) przeprowadzonych dla frezowania z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min głowicą frezową R390.

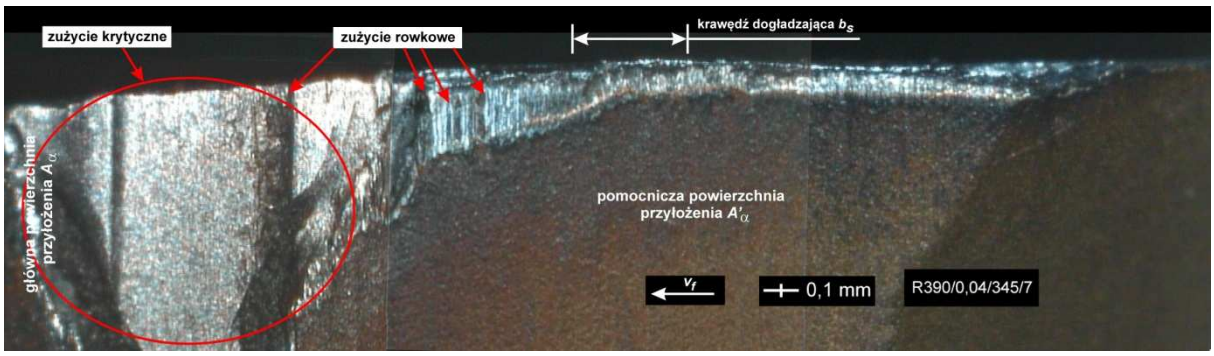
Akwizycję danych zaplanowano po: 180 i 345 metrach drogi skrawania L_s przypisaną dla każdego ostrza w zależności od długości przedmiotu obrabianego.

Tabela 8. .....

SYMBOL GŁOWICY FREZOWEJ	PRĘDKOŚĆ POSUWU v_f [mm/min]	DROGA SKRAWANIA L_s [m]	NR OSTRZA	NR TABLICY
R390	355	180 345	1	29
			2	30
			3	31
			4	32
			5	33
			6	34
			7	35
			8	36
	710	123 181	1	37
			2	38
			3	39
			4	40
			5	41
			6	42
			7	43
			8	44
	1120	285 736 1129 1837	1	45
			2	46
			3	47
			4	48
			5	49
			6	50
			7	51
			8	52

Po 180 metrach frezowania zużycie przebiegało głównie na narożu i dotyczyło to wszystkich ostrzy. Dla tej drogi skrawania, największe wytarcie zaobserwowano na ostrzu nr 7, w porównaniu z pozostałymi ostrzami biorącymi udział w skrawaniu. Oderwanie warstwy ochronnej na pomocniczej krawędzi zarejestrowano dla ostrzy nr 6, 8 (tabl. 34 i 36).

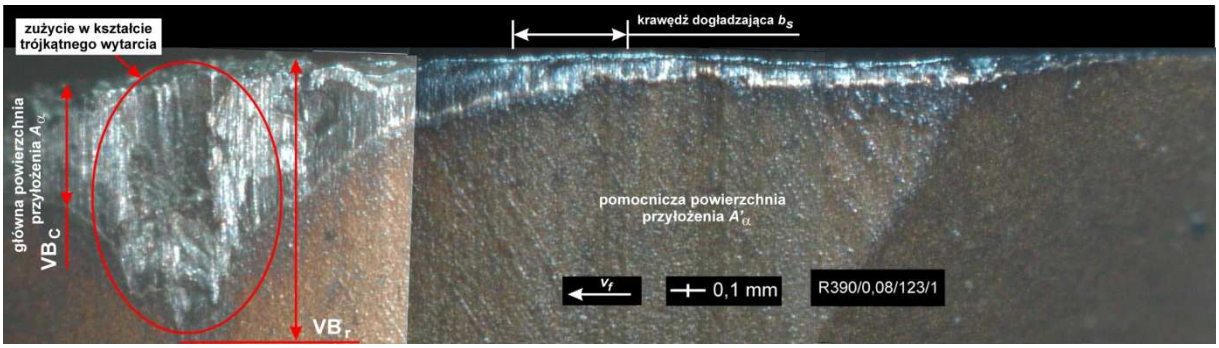
Po 345 metrach frezowania dla wszystkich ostrzy (tabl. 29-36) zarejestrowano zużycie krytyczne (rys. 5.62). Pojawiły się bruzdy i postać zużycia rowkowego w otoczeniu naroża i na pomocniczej powierzchni przyłożenia.



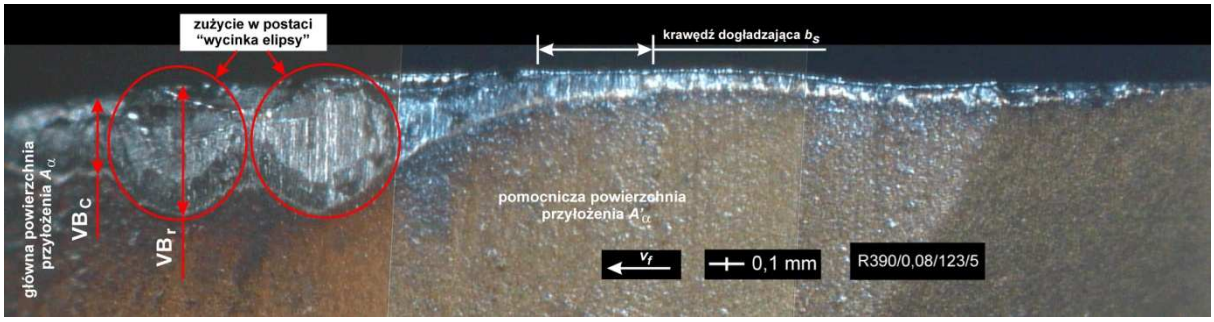
Rys. 5.62. Zużycie ostrza nr 7 po 345 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,04 mm/ostrze

Kolejne badanie zużycia ostrza było zrealizowano dla frezowania głowicą R390 z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min. Akwizycję danych zaplanowano po: 123, 181 metrach drogi skrawania przypisaną dla każdego ostrza w zależności od wymiaru przedmiotu obrabianego.

Po 123 metrach frezowania na ostrzu nr 1 (tabl. 37) w otoczeniu naroża rozwijało się zużycie w kształcie zbliżonym do trójkątnego wytarcia (rys. 5.63). Podobna postać zużycia widoczna była na ostrzu nr 8 ale z dwoma charakterystycznymi zużyciami rowkowymi (tabl.44).

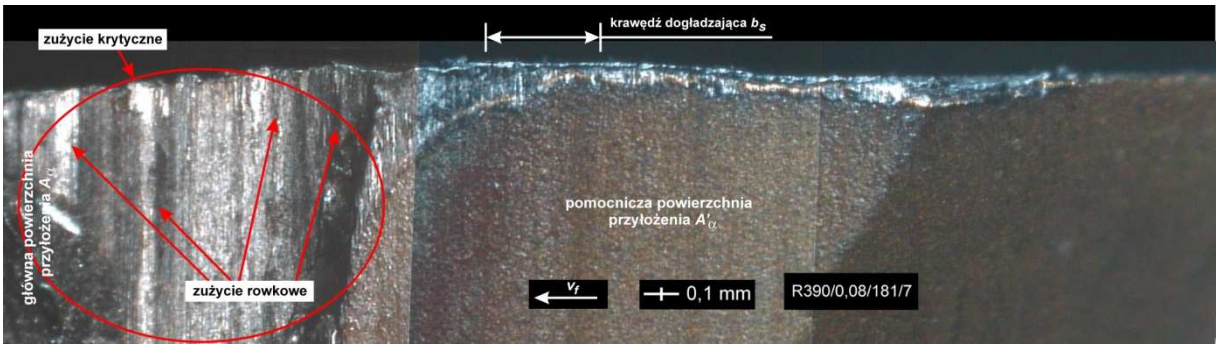


Rys. 5.63. Zużycie ostrza nr 1 po 123 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze



Rys. 5.64. Zużycie ostrza nr 5 po 123 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze

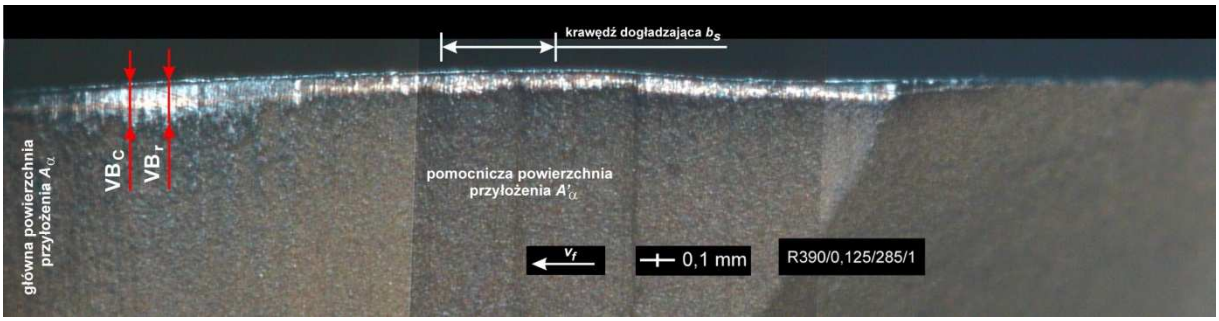
Natomiast na narożu ostrza nr 5 zużycie było widoczne w postaci dwóch skoncentrowanych wycinków elipsy (rys. 5.64) (tabl. 41). Zużycie, ale w postaci pojedynczego wycinka elipsy widoczne było na ostrzach nr 2, 3, 4, 7 (tabl. 38-40,43). Ślady zużycia rowkowego oraz ubytki warstwy ochronnej, w okolicy naroża, zaobserwowano za ostrzach nr 2, 6. Ponadto na ostrzu nr 4 zarejestrowano oderwanie warstwy ochronnej.



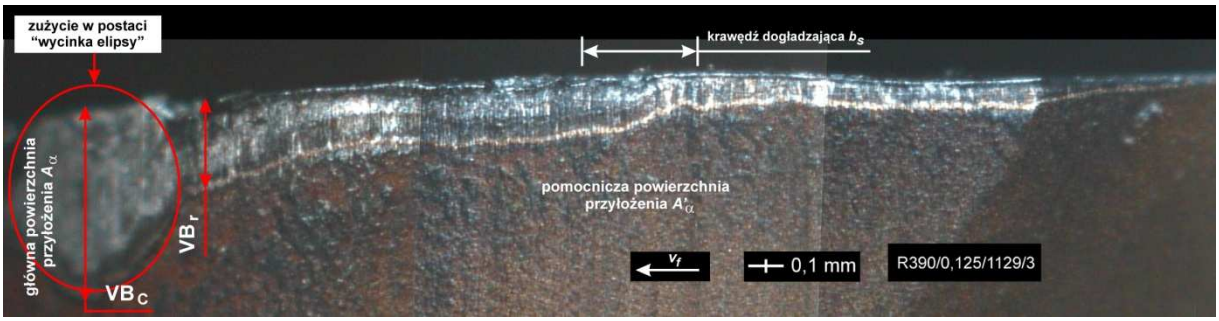
Rys. 5.65. Zużycie ostrza nr 7 po 181 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze

Charakterystyczne jest, że po 181 metrach frezowania na wszystkich ostrzach zauważalne było krytyczne zużycie ostrza w ich otoczeniu naroży, z wyraźnie widocznymi śladami zużycia rowkowego (rys. 5.65).

Dla skrawania z prędkością posuwu v_f = 1120 mm/min przeprowadzono badania zużycia ostrza, a akwizycję danych wykonano po: 285, 736, 1129, 1837 metrach drogi skrawania dla każdego ostrza, w zależności od długości przedmiotu obrabianego. Zużycie na ostrzach nr 1 - 8 (tabl. 45 - 52) widoczne jest w niewielkim stopniu zarówno w otoczeniu naroża i na pomocniczej powierzchni przyłożenia (rys. 5.66).

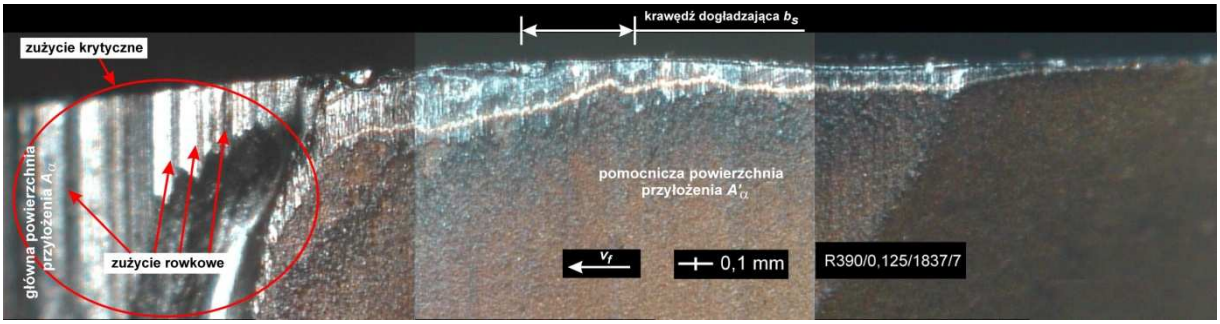


Rys. 5.66. Zużycie ostrza nr 1 po 285 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze



Rys. 5.67. Zużycie ostrza nr 3 po 1129 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze

Z rosnącą drogą frezowania zużycie powiększało się na wszystkich narożach ostrzy. Wówczas na ostrzu nr 3 ujawniło się znaczne zużycie w postaci charakterystycznego wycinka elipsy (rys. 5.67). Dla ostrza nr 5, 6 wyraźne zmiany nastąpiły dopiero przy pomiarze po 1129 metrach drogi frezowania. Zużycie było zdecydowanie większe i wystąpiły pęknięcia termiczne na narożu oraz wykruszenia materiału ostrza na pomocniczej krawędzi przyłożenia.

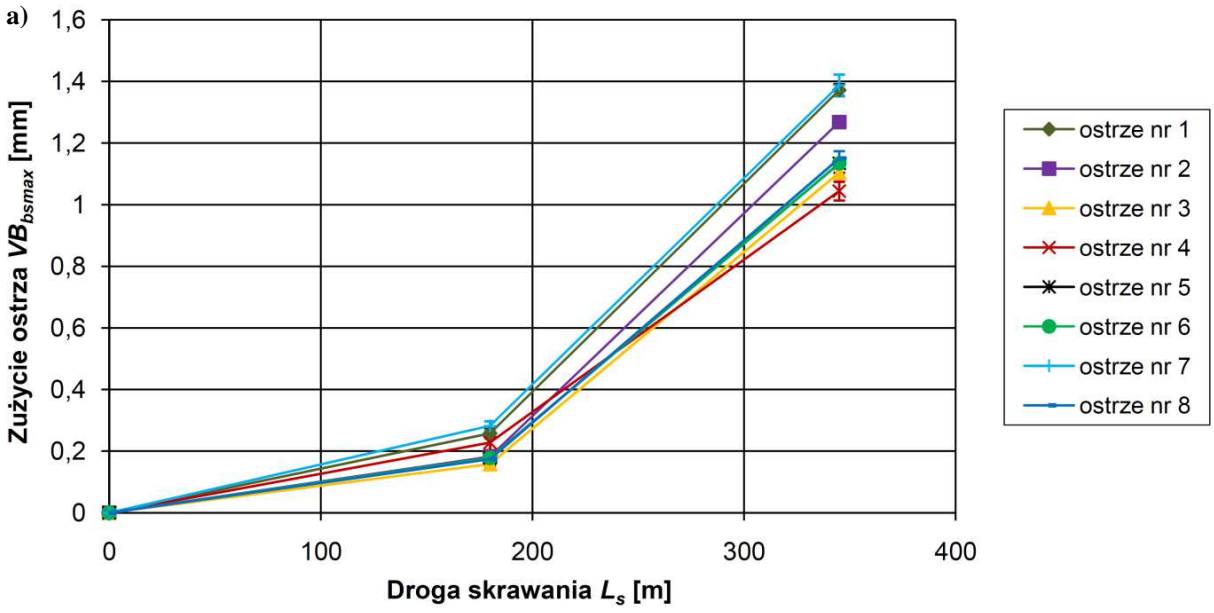


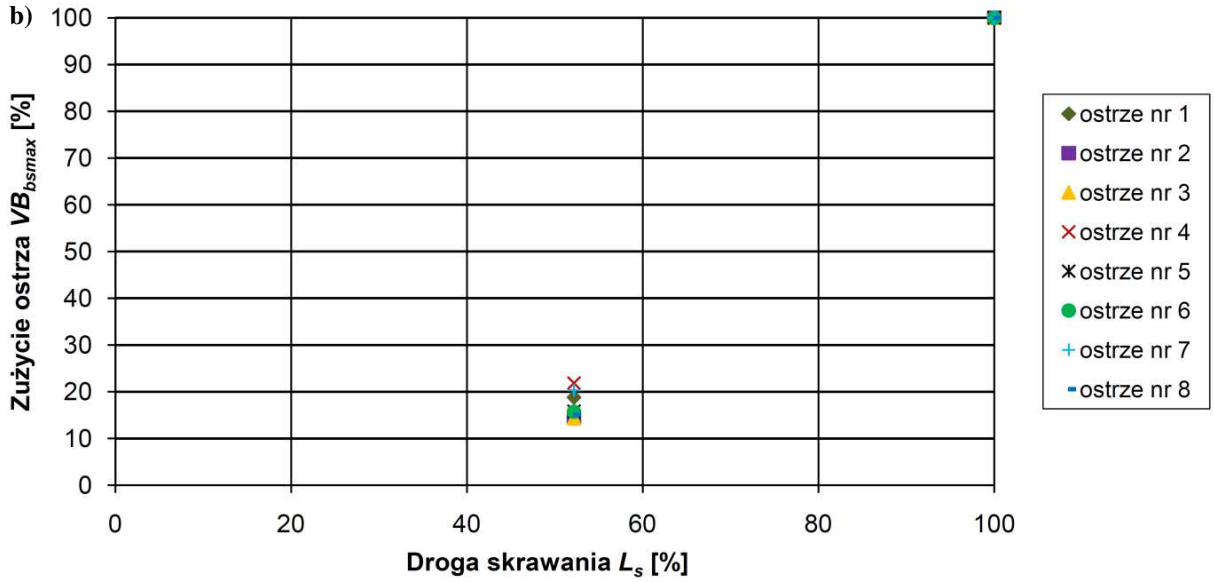
Rys. 5.68. Zużycie ostrza nr 7 po 1837 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze

Przy pomiarze po 1837 metrach frezowania, na wszystkich ostrzach wystąpiło krytyczne zużycie w otoczeniu naroża ostrza z widocznymi licznymi bruzdami i zużyciem rowkowym (rys. 5.68). Ubytki materiału płytki wymiennej zarejestrowano na ostrzu nr 7 (tabl. 51) oraz lokalne wykruszenia warstwy ochronnej dla ostrzy nr 3, 4 (tabl. 47, 48).

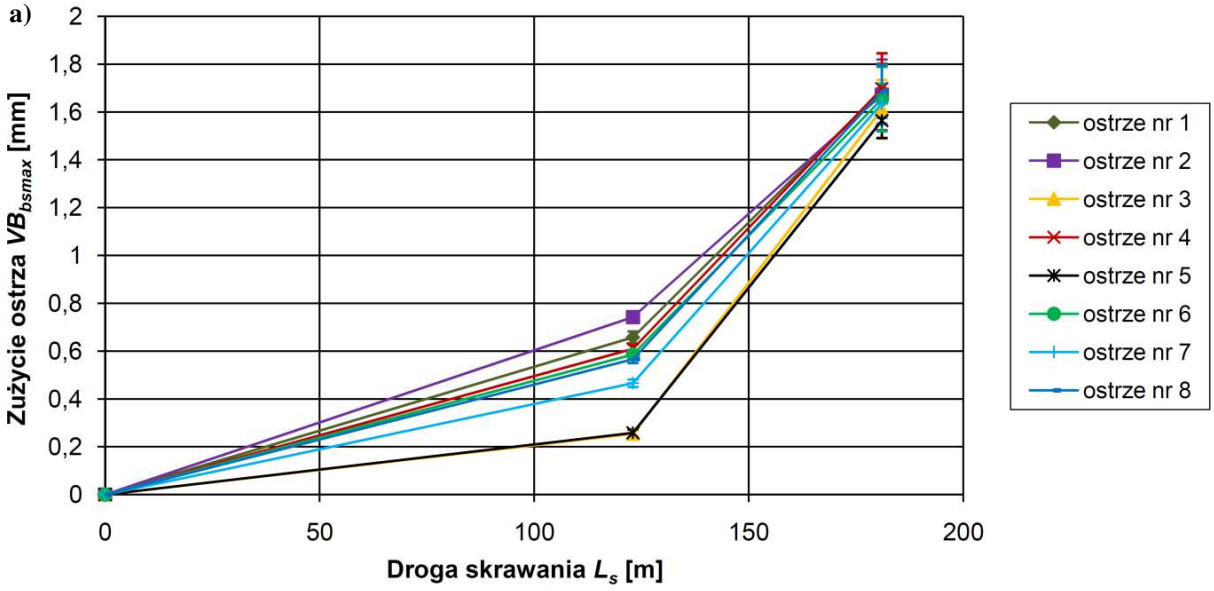
5.4.3. Identyfikacja trwałości poszczególnych ostrzy w głowicy R390

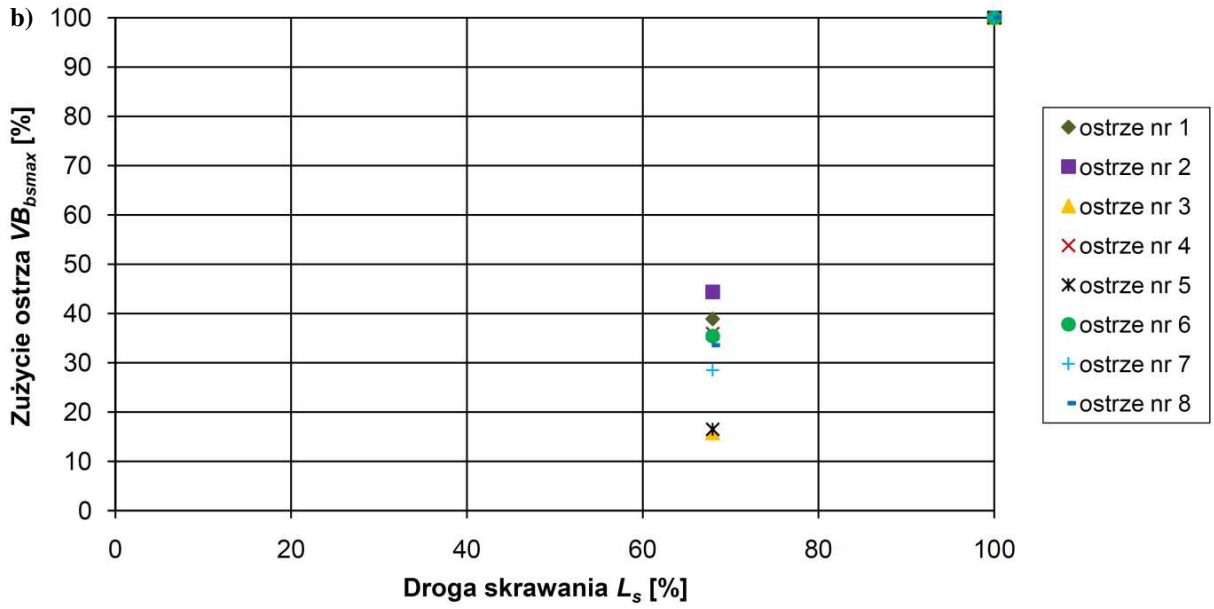
Podczas frezowania drugą głowicą R390 z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min pomiary wykonano w dwóch punktach na odcinku 345 metrów drogi skrawania. Po 180 metrach frezowania wartości zużycia ostrzy VB_{bsmax} mieściły się w zakresie od ~0,16 do ~0,28 mm. Podczas dalszego frezowania nastąpił gwałtowny wzrost zużycia dla wszystkich ostrzy, doprowadzając do zużycia krytycznego (rys. 5.69a). Po zakończeniu frezowania wartości mieściły w zakresie od ~1 do ~1,4 mm. Największe zużycie było na ostrzach nr 7 i 1 oraz 2. Dla pozostałych, wartości były mniejsze poniżej VB_{bsmax} = 1,2 mm. Słabo widoczne były związki między biciem czołowym i zużyciem ostrzy (5.61a i 5.69a). Najbardziej wysunięte były ostrza nr 4, 3, 2 ale akurat dla nich zaobserwowano najmniejsze zużycia.





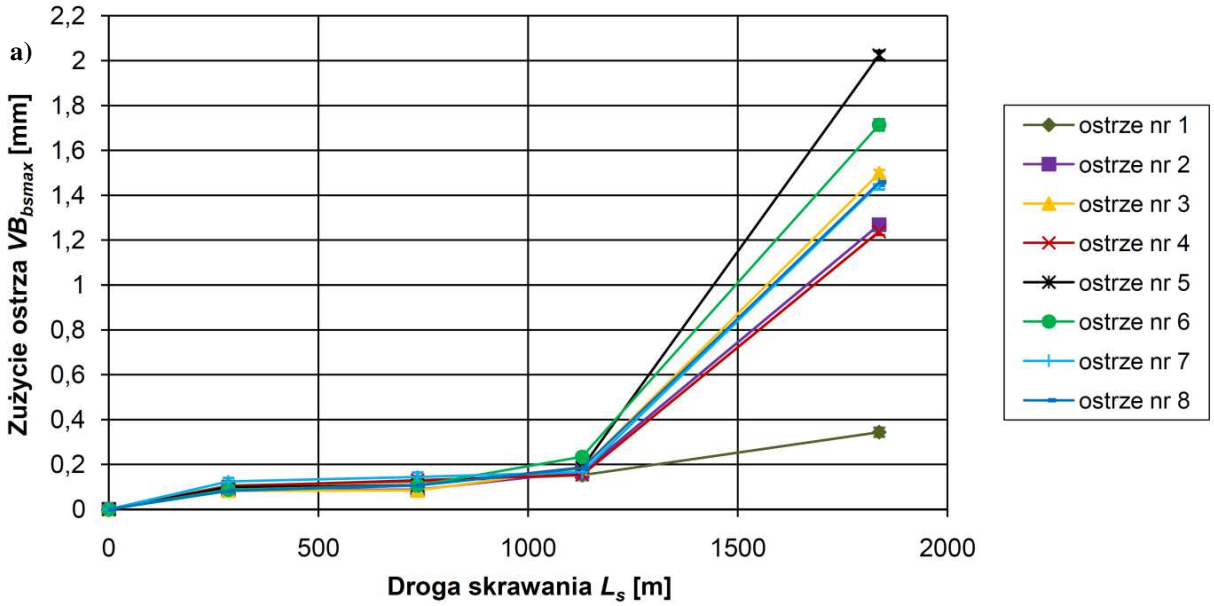
Rys. 5.69. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min.

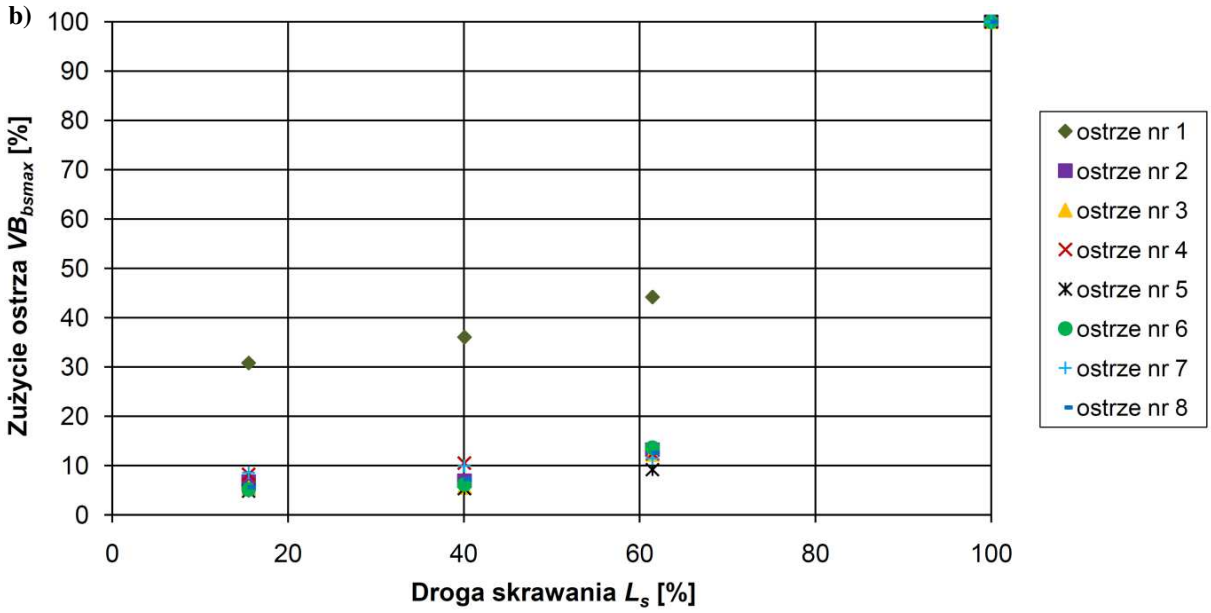




Rys. 5.70. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min.

Wyniki zużycia ostrza dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min pomiary wykonano tylko w dwóch punktów na odcinku 180 metrów frezowania. Po 123 metrach frezowania wartości zużycia VB_{bsmax} były w zakresie od ~0,25 do ~0,75 mm. Największe wartości zużycia zanotowano na ostrzach nr 2, 1, 4. Dla dłuższej drogi frezowania wartości zużycia skupiły się od ~1,5 do ~1,7 mm (rys. 5.70a). Po zakończeniu badań dla tej prędkości posuwu, największe wartości zużycia były dla ostrzy nr 4, 2. Potwierdziło to, że bicie czołowe płytek wymiennych (rys. 5.70b) ma wpływ na wielkość zużycia ostrzy najbardziej wysuniętych z głowicy. Dla pozostałych ostrzy wartości zużycia były zbliżone do poprzednich.





Rys. 5.71. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min.

Podczas frezowania z prędkością posuwu v_f = 1120 mm/min, pomiary wykonywano na odcinku 1837 metrów drogi skrawania. Dla początkowej fazy skrawania wartości zużycia były skupione w zakresie od ~0,08 do ~0,12 mm. Zużycie stopniowo rosło na wszystkich ostrzach dla dłuższej drogi frezowaniu. Po 1130 metrów drogi skrawania nastąpił szybki przyrost wartości zużycia. Po zakończeniu frezowania VB_{bsmax} dla ostrza nr 5 wyniosło ~2 mm, a dla ostrza nr 1 ~0,35 mm. Na pozostałych ostrzach zużycie mieściło się w zakresie od ~1,2 do ~1,7 mm. Porównując wyniki bicia czołowego ostrzy nie potwierdzono wyraźnego wpływu na wielkość wytarcia (rys. 5.61c i 5.71a).

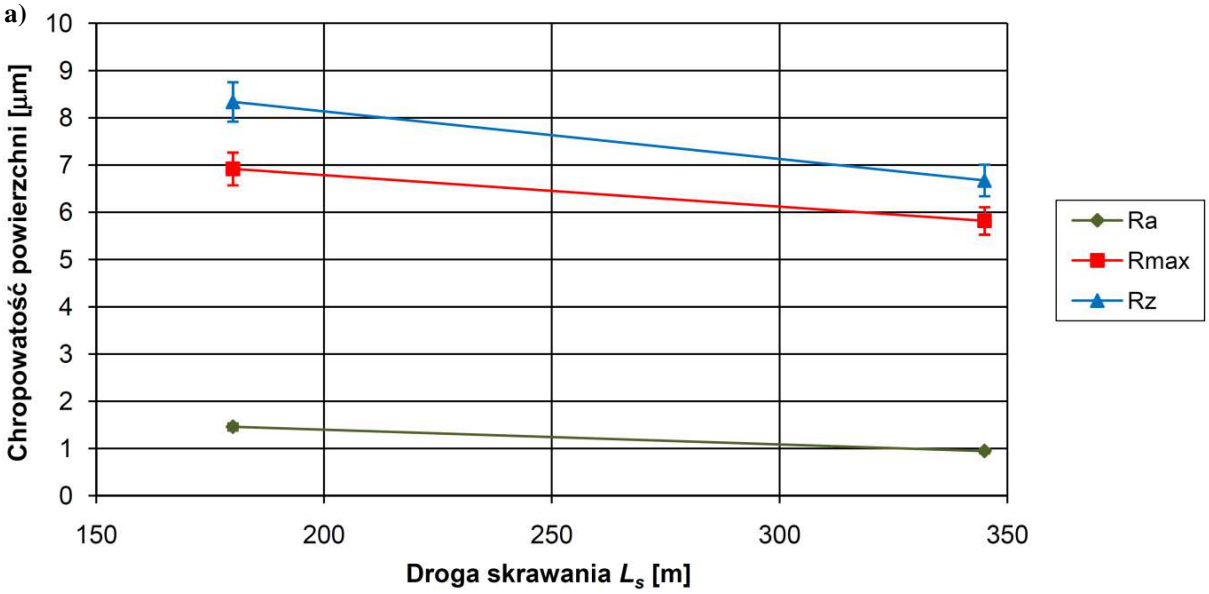
5.4.4. Badanie chropowatości powierzchni obrobionej po frezowaniu głowicą R390

W przypadku ostrzy z narożem zaokrąglonym r_ε, nierówności będą tworzone z udziałem innych części ostrza i wpływ mają wszystkie ostrza niezależnie od wartości ich bicia.

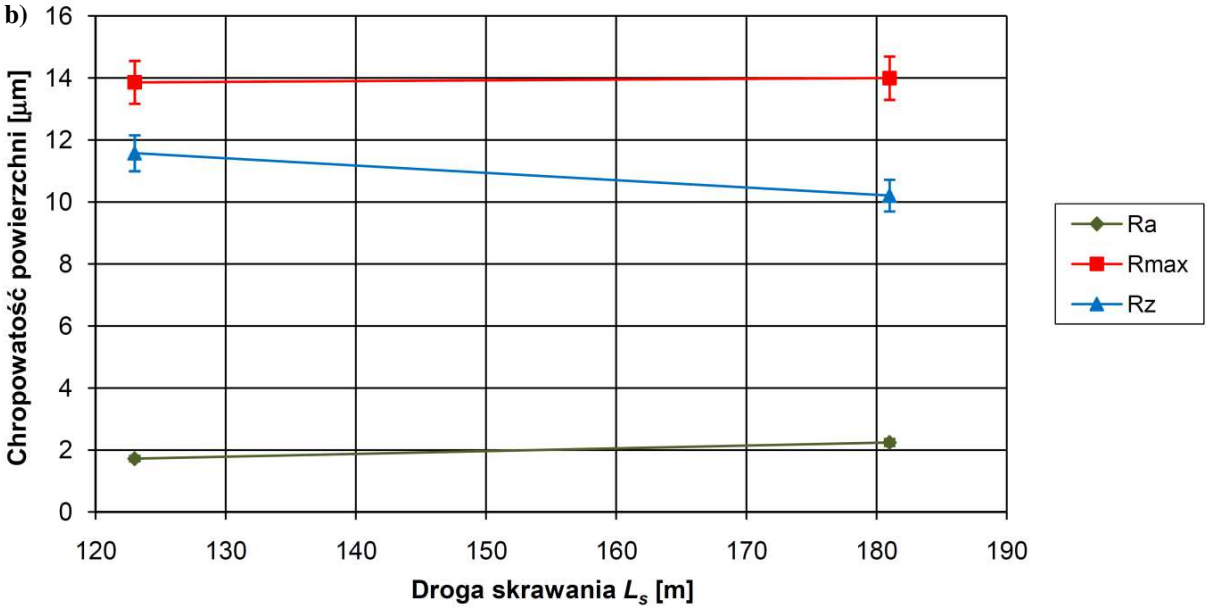
Pomiary dokonywano po przyjętych odstępach drogi skrawania L_s zgodnie z założeniami przedstawionymi w tabeli 8 z jednoczesnym zapisem obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej.

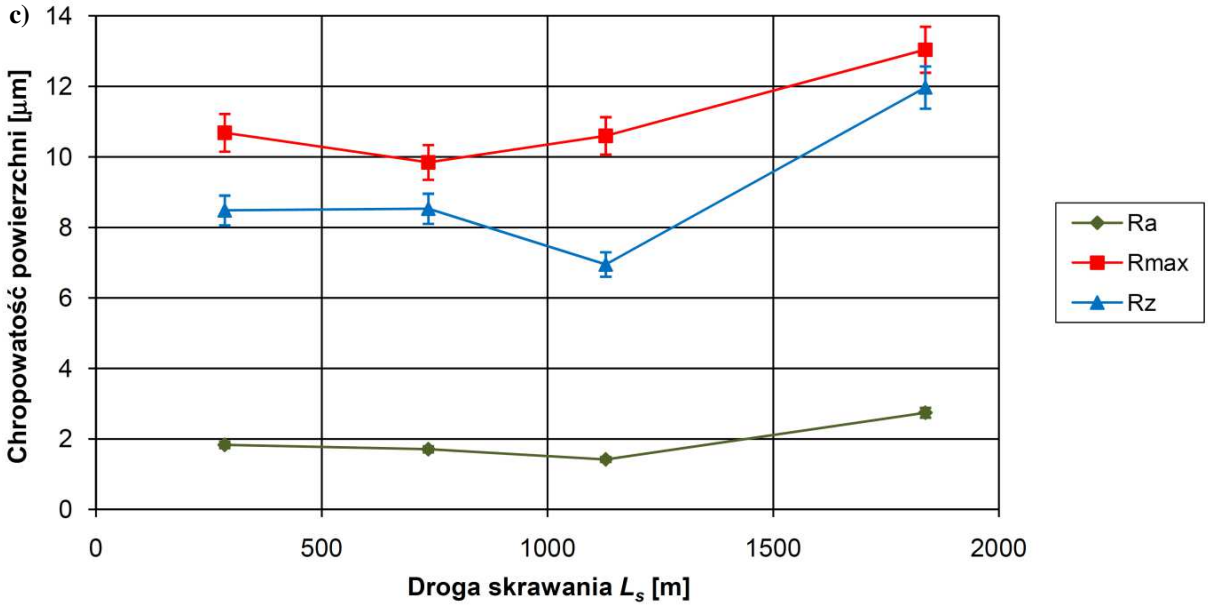
Do oceny wyników z badań nierówności powierzchni użyto parametry opisujące chropowatość powierzchni takie jak *Ra Rz Rmax*. Uzyskane wyniki wykorzystano do opracowania wykresów zmienności dla trzech prędkości posuwu stołu frezarki v_f.

a)


Chropowatość powierzchni [µm]
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
150
200
250
300
350
Droga skrawania L_s [m]
Ra
Rmax
Rz

b)


Chropowatość powierzchni [µm]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
120
130
140
150
160
170
180
190
Droga skrawania L_s [m]
Ra
Rmax
Rz



Rys. 5.72. Przebieg zmian parametrów chropowatości powierzchni obrobionej dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu a) v_f=355 mm/min, b) v_f=710 mm/min, c) v_f=1120 mm/min

Dla głowicy R390, po zmierzeniu chropowatości powierzchni obrobionych z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min (rys. 5.72a) widoczne jest, że po 160 metrach drogi skrawania parametry były dla *Ra* = 1,5 µm, *Rz* = 8,4 µm, *Rmax* = 6,9 µm.

Rys. 5.73. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 180 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

Rys. 5.74. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 345 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

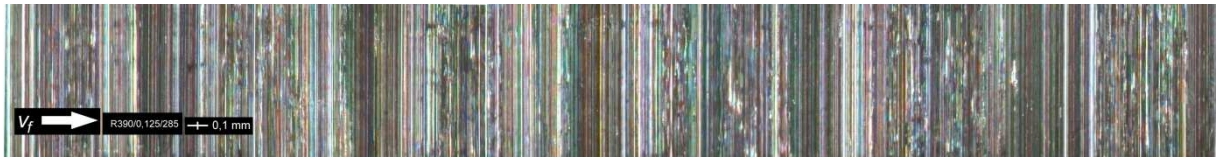
Po przeskrawaniu 340 metrów, zmalały ich wartości do *Ra* = 1 µm, *Rz* = 6,7 µm, *Rmax* = 5,8 µm. Po przefrezowaniu 120 metrów z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min (rys. 5.72b) widoczne było, że zmierzone wartości parametrów chropowatości wyniosły odpowiednio dla *Ra* = 1,8 µm, *Rz* = 11,5 µm, *Rmax* = 13,9 µm.

Rys. 5.75. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 123 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min

Po 180 metrach frezowania wartości dwóch parametrów nieznacznie uległy zwiększeniu do *Ra* = 2,2 μm i *Rmax* = 14 μm, natomiast wartość *Rz* zmalała do 10,1 μm.

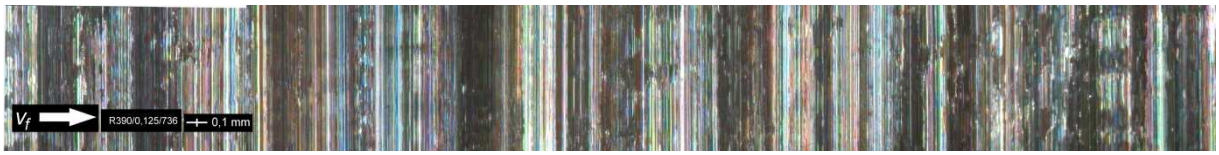
Rys. 5.76. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 181 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuw v_f=710 mm/min

Po 300 metrach drogi skrawania z prędkością posuwu v_f = 1120 mm/min (rys. 5.72c) parametry chropowatości *Ra* i *Rmax* zmalały, odpowiednio od 1,9 do 1,7 μm i od 10,8 do 9,8 μm, natomiast *Rz* zachowała poprzednią wartość około 8,5 μm.

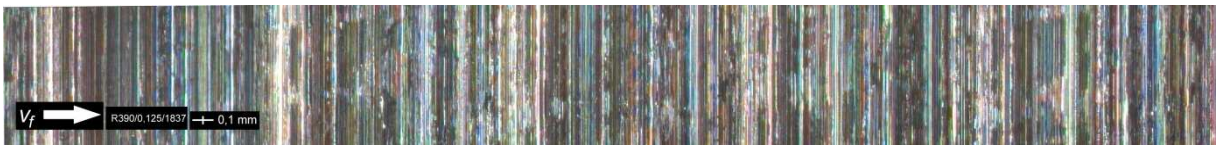


Rys. 5.77. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 285 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min

Po przeskrawaniu 750 metrów, wartości parametrów zmalały *Ra* do 1,6 μm i *Rz* do 7 μm, natomiast *Rmax* wykazała wzrost do 10,8 μm.



Rys. 5.78. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 736 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min



Rys. 5.79. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 1837 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min

Po przeskrawaniu 1100 metrów wszystkie parametry zaczęły zwiększać się kolejno: *Ra* do 2,7 μm, *Rz* do 11,9 μm i *Rmax* do 13 μm.

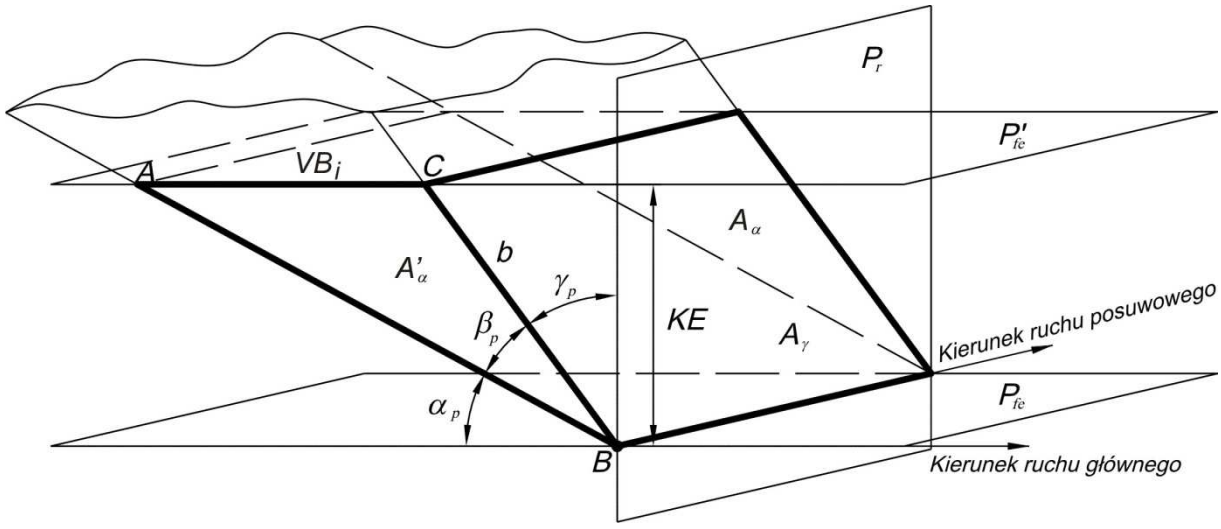
Reprezentacje cyfrowe powierzchni obrobionych po frezowaniu głowicą R390, zaprezentowano na dwóch rysunkach 5.73 i 5.74 dla v_f = 355 mm/min 5.75 i 5.76 dla v_f = 710 mm/min. Wybrane obrazy cyfrowe dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min przedstawiono na rysunkach 5.77 - 5.79.

5.5. Modele pracy ostrzy modyfikowanych

W narzędziach jednoostrzowych wykonuje się modyfikację zmiany geometrii ostrza w obrębie jego wierzchołka. W wyniku zastosowania tak przygotowanego ostrza skrawającego otrzymuje się powierzchnię obrobioną o określonej dokładności wymiarów i chropowatości powierzchni [STO 99], [ZAW 07], [ZAW 08], [ZAW 09]. Szerzej opisuje to patent PL 173536 B1 [STO 98]. Tak przygotowane ostrze stosuje się do obróbki stopów stali i mosiądzu, gdzie obserwuje się powierzchnie obrobione o cechach zdeterminowanych przy zachowaniu stabilnych warunków pracy ostrza oraz równomiernych śladów zużycia. W przypadku skrawania innych stopów np. aluminiowych lub żeliwnych, wyniki chropowatości powierzchni bywają różne [ZAW 08].

Dla narzędzi wieloostrzowych takich jak wiertła, frezy, głowice frezowe zmiana geometrii jest gwarancją poprawy warunków pracy ostrzy [CIC 06].

Układ rozpatrzono na płaszczyźnie tylniej P_p, która przecina wzdłuż ostrze w rozpatrywanym punkcie *B*. W modelu uwzględniono tylne kąty natarcia γ_p, ostrza β_p i przyłożenia α_p zawarte pomiędzy płaszczyzną podstawową P_r, a płaszczyznami ograniczającymi ostrze A_γ i A_a. Wymienione kąty i płaszczyzny są niezbędne do wyznaczenia skrócenia ostrza *KE*.



Rys. 5.80. Geometryczne wyznaczenie zależności skrócenia ostrza *KE* w układzie ostrze – przedmiot obrabiany

Rozpatrywany wycinek ostrza (rys. 5.80) jest na powierzchni dogładzającej b_s. Znając kąty γ_p i α_p, które najczęściej podawane są w katalogach producentów narzędzi i zależność (5.1) można wyznaczyć kąt ostrza β_p.

Posiadając dane w postaci obrazów cyfrowych zużycia ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia można wyznaczyć średnie wytarcie VB_i przypadające na odcinek $\overline{AB}$. Na rysunku 5.80 zaznaczono odcinek $\overline{CB}$ oznaczony jako *b* jest wyrazem wolny, początkowo nieznany i jego wartość jest różna w zależności ze skróceniem ostrza *KE*.

$$\beta_p = 90 - (\alpha_p + \gamma_p) \tag{5.1}$$

Z definicji twierdzenia sinusów, w dowolnym trójkącie iloraz długości dowolnego boku i sinusa kąta naprzeciw tego boku jest stały. Zachowując tą zasadę można wyznaczyć wolny wyraz *b* (5.2).

$$\frac{\mathrm{VB}_i}{\sin\beta_p} = \frac{b}{\sin(90° - \gamma_p - \beta_p)}$$

$$b \cdot \sin\beta_p = VB_i \cdot \sin(90° - \gamma_p - \beta_p)$$

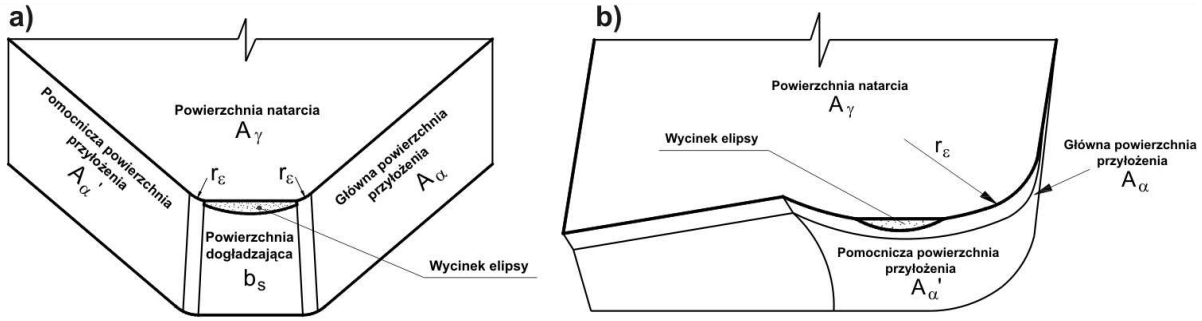
$$\boxed{b = \frac{VB_i \sin(90° - \gamma_p - \beta_p)}{\sin\beta_p}} \tag{5.2}$$

$$\frac{KE}{b} = \cos\gamma_p$$

$$KE = b \cdot \cos\gamma_p$$

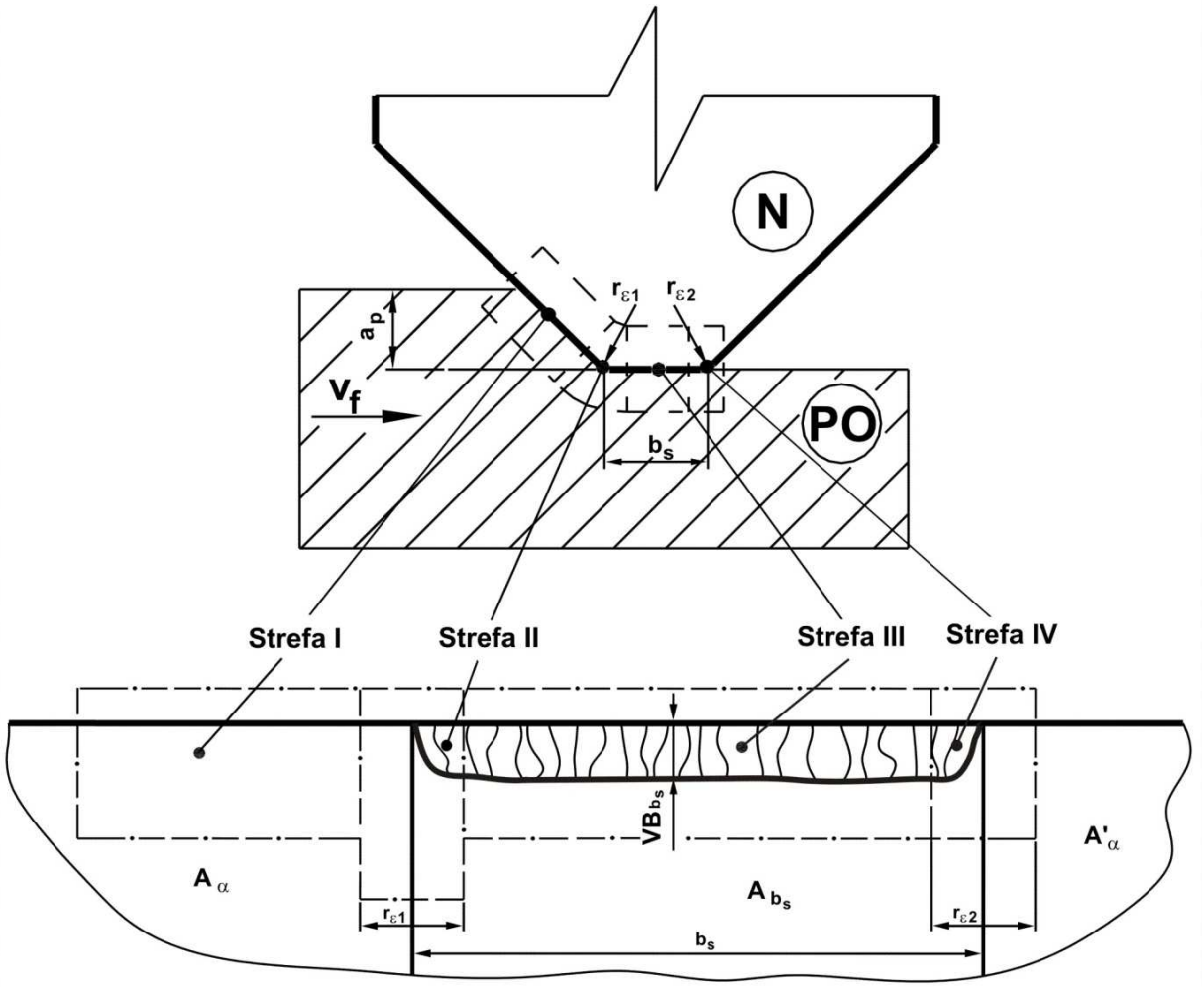
$$\boxed{KE = \frac{VB_i \cdot \sin(90° - \gamma_p - \beta_p)}{\sin\beta_p} \cdot \cos\gamma_p} \tag{5.3}$$

Po uproszczeniach zależności (5.2) i podstawieniu do (5.1) wyznaczono równanie na skrócenie ostrza *KE* (5.3).



Rys. 5.81. Widok pomocniczej powierzchni przyłożenia ostrza a) z powierzchnią dogładzającej b_s i b) z zaokrąglonym narożem r_ε po modyfikacji

Przy dowolnych zmiennych podstawowych płaszczyzn w układzie narzędzia równanie można wykorzystać do obliczeń skrócenia *KE* dla różnych geometrii ostrzy. Efektem jest wyznaczenie pola powierzchni ograniczonej przez założoną płaszczyznę roboczą P_f na pomocniczej powierzchni przyłożenia w postaci rozciągniętego wycinka elipsy lub prostokąta (rys. 5.81).



Rys. 5.82. Postać modyfikacji dla płytki z powierzchnią dogładzającą b_s

Modele modyfikacji wykonania dla ostrzy z powierzchnią dogładzającą b_s (5.82) i z zaokrąglonym narożem r_e (rys. 5.83).

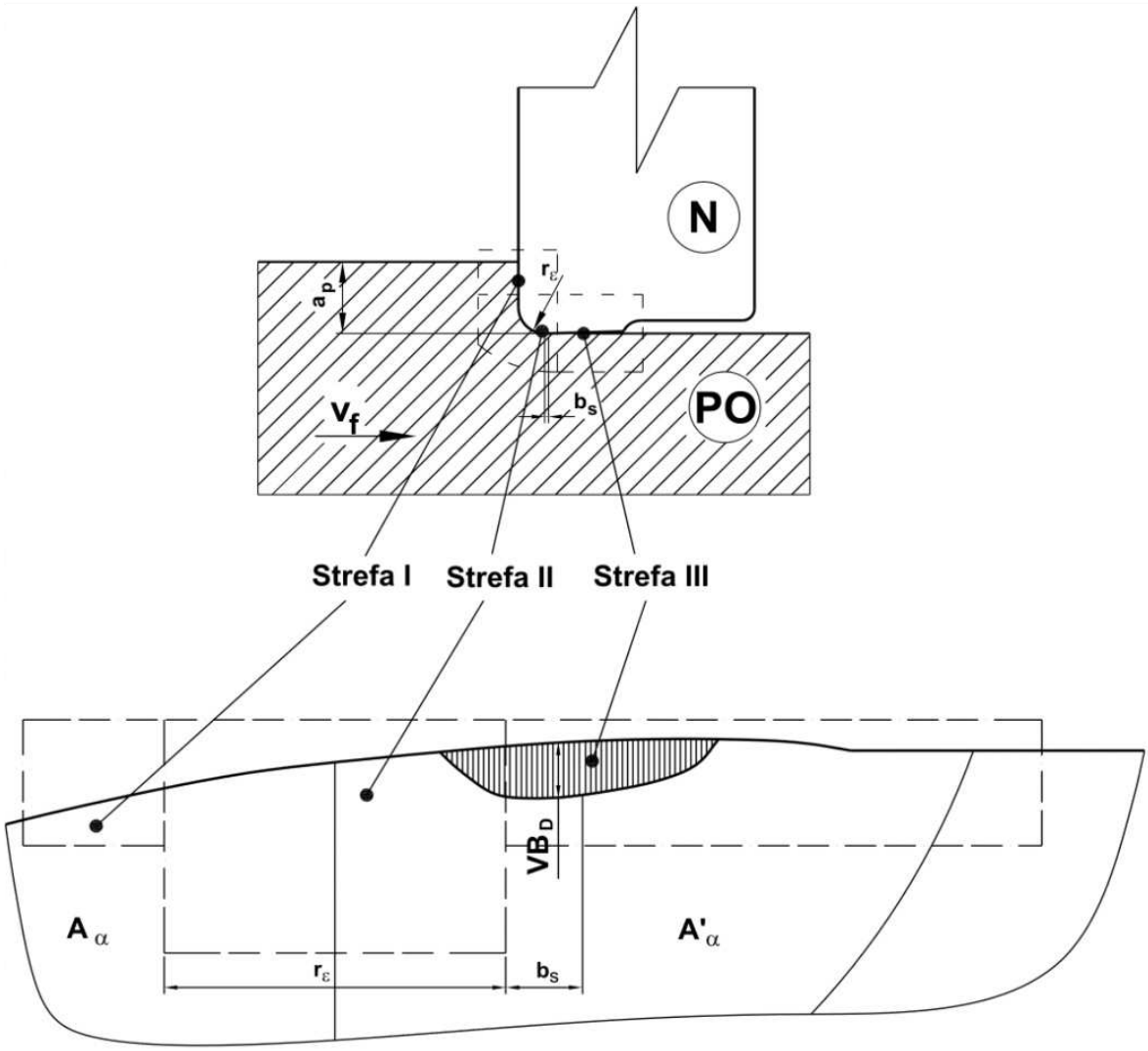
Dla ostrza z powierzchnią dogładzającą b_s przeszlifowano przejściową pomocniczą powierzchnie przyłożenia A_{bs} w postaci prawie prostokątnego wytarcia na szerokość VB_{bs}.

Strefa I - brak modyfikacji na głównej powierzchni przyłożenia A_α. Powierzchnia ta, bierze udział tylko w oddzielaniu materiał. Wykonanie jakichkolwiek zmiany geometrii ostrza, która miała by wpływ na powierzchnię obrobioną, była decyzją niepotrzebną.

Strefa II - w tej strefie, występuje część pasma modyfikacji w okolicach naroża ostrza $r_{\varepsilon 1}$.

Strefa III - właściwe pasmo po szlifowaniu, które powinno mieć jednakową wartość szerokości VB_{bs} na całej przejściowej pomocniczej powierzchni przyłożenia A_{bs}. Na wielkość, postać i równomierność pasma modyfikacji mogą wpływać czynniki technologiczne oraz geometryczne ostrza.

Strefa IV - podobnie jak w strefie II, występuje część pasma modyfikacji ale w okolicach naroża ostrza $r_{\varepsilon 2}$.



Rys. 5.83. Postać modyfikacji dla płytki z narożem zaokrąglonym r_ε

Strefa I - strefa ta podlega takiemu samemu opisowi ja dla ostrza z powierzchnią dogładzającą b_s.

Strefa II - w tej strefie, występuje część pasma modyfikacji w okolicach naroża ostrza $r_{\varepsilon 1}$.

Strefa III - właściwe pasmo modyfikacji. W połączeniu z częścią z naroża ostrza r_ε, będzie wykonana w postaci połówki elipsy VB_D na pomocniczej powierzchni przyłożenia A'_α. Na wielkość, postać i równomierność pasma modyfikacji mogą wpływać czynniki technologiczne, jak i geometryczne ostrza.

5.6. Wyniki badań pracy ostrzy zmodyfikowanych głowicy R245mod

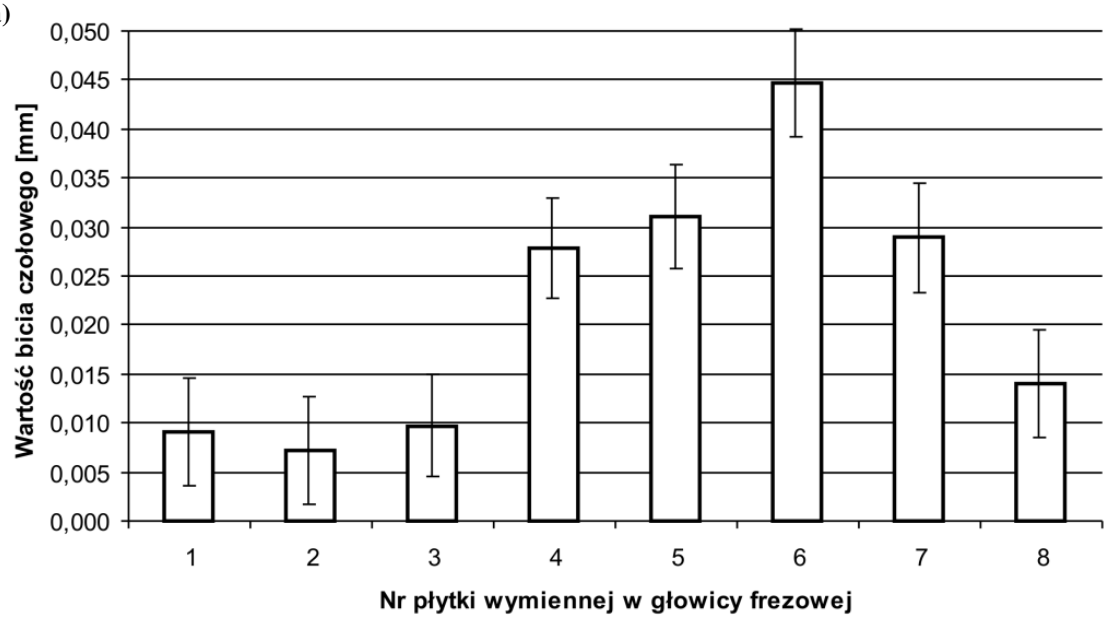
Przedstawiono rezultaty uzyskanych wyników z:

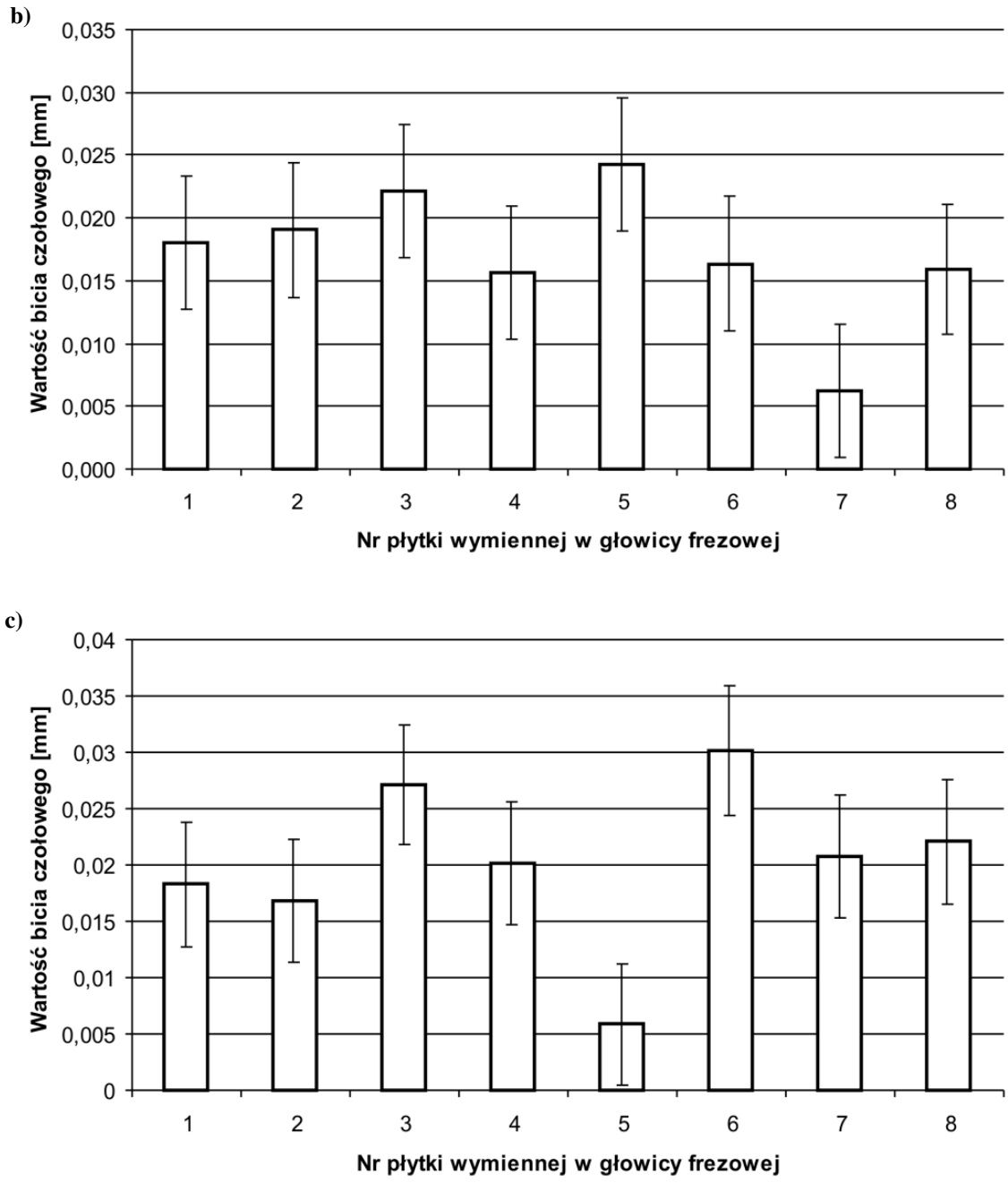
- pomiarów bicia czołowego ostrzy,
- opisu zmian zmodyfikowanej geometrii na pomocniczej powierzchni przyłożenia po frezowaniu i jego przyrostów wartości do drogi skrawania L_s.
- opisu powierzchni obrobionych parametrami *Ra*, *Rz*, *Rmax* i ich reprezentacji cyfrowych po frezowaniu ostrzem zmodyfikowanym.

5.6.1. Badania bicia czołowego ostrzy w głowicy R245mod

W modyfikacji ostrza użyto handlowych płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s R245-12 T3 M-PM 4030 mocowanych w głowicy frezowej R245. Badania przeprowadzono dla frezowania z trzema różnymi prędkościami posuwu v_f.

a)





Rys. 5.84. Bicie czołowe płytek wymiennych przed modyfikacją ostrza w głowicy frezowej R245 dla prędkości posuwu a) v_f=355 mm/min., b) v_f=710 mm/min., c) v_f=1120 mm/min.

Przed przystąpieniem do modyfikacji zmiany geometrii ostrza wykonano pomiary ich bicia czołowego. Wyróżniono najbardziej wysuniętą płytkę w kierunku osiowym i dla na niej wykonano modyfikację na powierzchni dogładzającej b_s (rys. 5.84a,b,c). Uznano, że ta płytka w pierwszej kolejności rozpocznie skrawanie i będzie zużywała się intensywniej niż pozostałe.

5.6.2. Badania zużycia roboczych powierzchni zmodyfikowanego ostrza głowicy R245mod

Z zestawu ośmiu ostrzy, modyfikację wykonano tylko dla jednej najbardziej wysuniętej płytki wymiennej w korpusie narzędzia. Utrudnieniem w wykonaniau modyfikacji było utrzymanie powtarzalności wielkości pola powierzchni wycinka elipsy ostrzy przy zachowaniu stałych parametrów i ustawień stanowiska do modyfikacji. Dotyczyło to dwóch głowic R245mod i R390mod. Brak określnia pierwszego kontaktu krawędzi ostrza z narzędziem ściernym powodował rozrzut obrazu pola obserwoanego na narożu.

Wyniki badań i zdokumentowane obrazy zestawiono w pomocnicze tabeli 9 i numerowanych stron.

Tabela 9. .....

SYMBOL GŁOWICY FREZOWEJ	**PRĘDKOŚĆ POSUWU v_f [mm/min]**	**DROGA SKRAWANIA L_s [m]**	**NR OSTRZA**	**NR TABLICY**
R245 mod.	355	189 315 630 946	1	53
			2	54
			3	55
			4	56
			5	57
			6 mod.	58
			7	59
			8	60
	710	189 315	1	61
			2	62
			3	63
			4	64
			5 mod.	65
			6	66
			7	67
			8	68
	1120	100 200 260	1	69
			2	70
			3	71
			4	72
			5	73
			6 mod.	74
			7	75
			8	76

Poniżej w pracy, opisano badania dotyczące monitorowania śladu modyfikacji, jego zachowań przed i po procesie frezowania (tabl. 58, 65, 74, 81, 91, 100). Opisano narastające zużycie dla pozostałych ostrzy.

Podczas frezowania głowicą R245mod z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min, wyniki zużycia ostrzy zestawiono w tablicach 53 – 60. Zestawienia obrazów cyfrowych zaplanowano po: 189, 315, 630, 946 metrach drogi skrawania L_s.

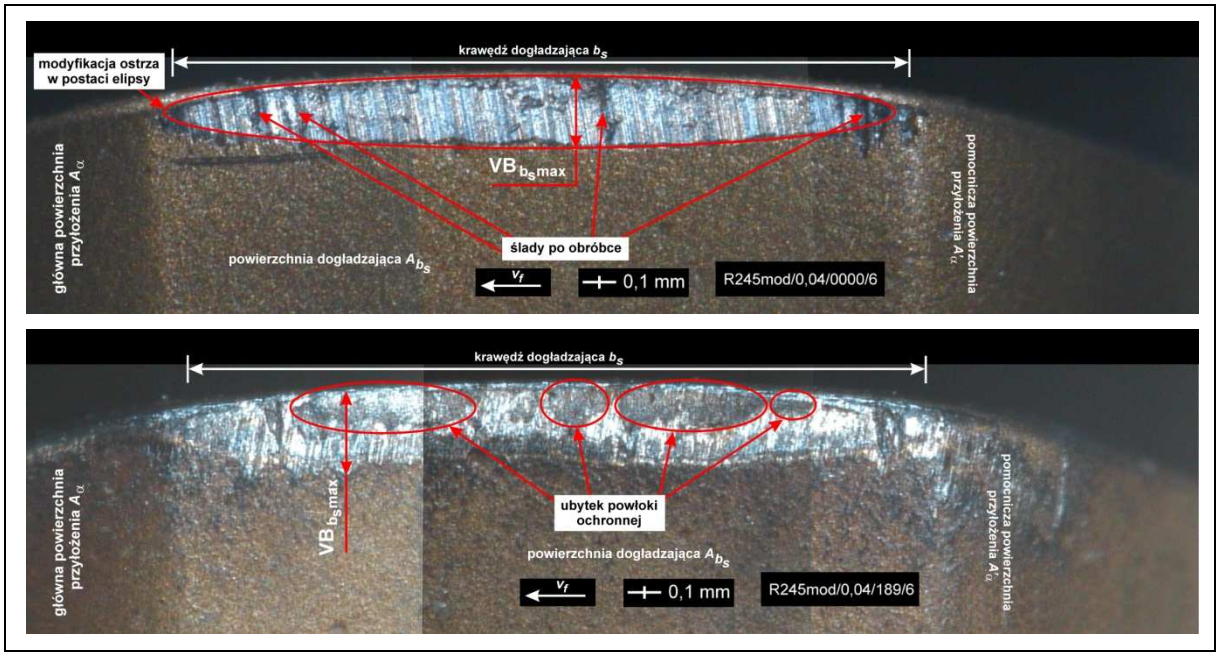
Na ostrzach nr 1 - 4, 7, 8 zużycie widoczne było na powierzchni dogładzającej b_s. Dla ostrza nr 1 początkowo zużycie wystąpiło tylko na krawędzi dogładzającej. Na ostrzu nr 5 w okolicach drugiego zaokrąglenia naroża $r_{\varepsilon 2}$ zarejestrowano wykruszenie w 1/3 jego części obserwując od strony zaokrąglenia naroża $r_{\varepsilon 1}$, które powiększyło się dla rosnącej drogi skrawania, aż do rozwinięcia na całą powierzchnię ostrza.

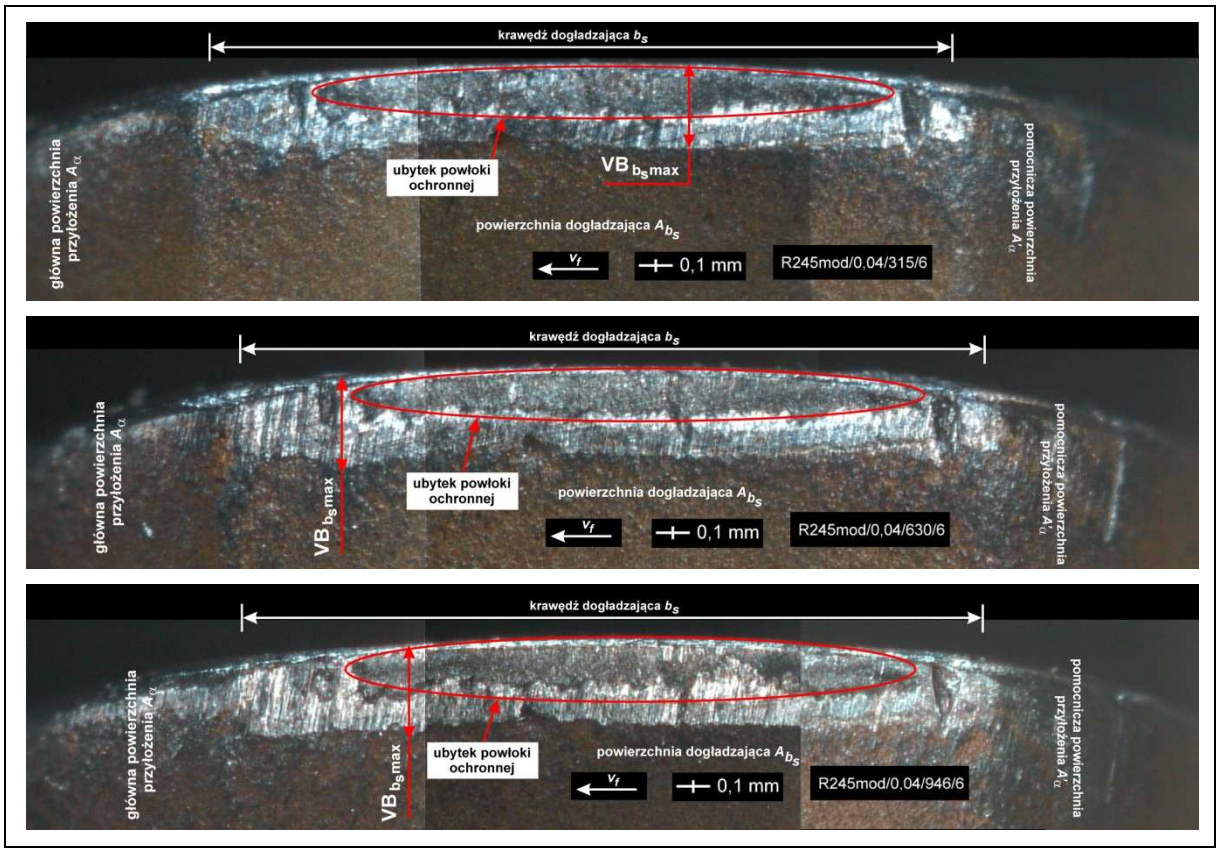
Po 630 metrach frezowania zaobserwowano narost na ostrzu nr 8 oraz ubytek warstwy ochronnej w części środkowej ostrza nr 4. Dla dłuższej drogi skrawania zarejestrowano zużycie rowkowe dla ostrzy nr 1, 2, 3, 4, ubytek warstwy ochronnej na ostrzu nr 8 oraz narost na ostrzu nr 7 (tabl. 59). Dla ostrza nr 3 widoczny był przyrost wytarcia w okolicach zaokrąglenia naroża $r_{\varepsilon 1}$.

W tablicy 58 zestawiono obrazy cyfrowe powierzchni dogładzającej ostrza po modyfikacji. Na ostrzu nr 6 widoczne są ślady obróbki po szlifowaniu (tabl. 58-R245mod/0,04/000/6). Na obrazy powierzchni modyfikowanej, dla wszystkich ostrzy użytych w badaniach, istotny wpływ miały rozmiary ziarna ściernego oraz błędy ustawcze tarczy docieraka żeliwnego.

Powierzchnia po szlifowaniu była w postaci elipsy i długość modyfikacji objęła całą powierzchnię dogładzającą ostrza. Średnie wytarcie VB_{bsmax} wyniosło 0,2 mm. Wartość tą podstawiono do równania (5.3) i obliczono skrócenie ostrza *KE*, które było równe 0,028 mm.

Tablica 58. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245mod z posuwem na ostrze f_z = 0,04 mm/ostrze





Po 189 metrach frezowania zarejestrowano ubytki warstwy ochronnej, które zmieniały się po dłuższych drogach skrawania. Ślady powstałe po modyfikacji nie ulegały istotnym zmianom. Widać to szczególnie w okolicach zaokrąglenia naroża $r_{\varepsilon 1}$ i $r_{\varepsilon 2}$ jak i na powierzchni dogładzającej b_s (tabl. 58).

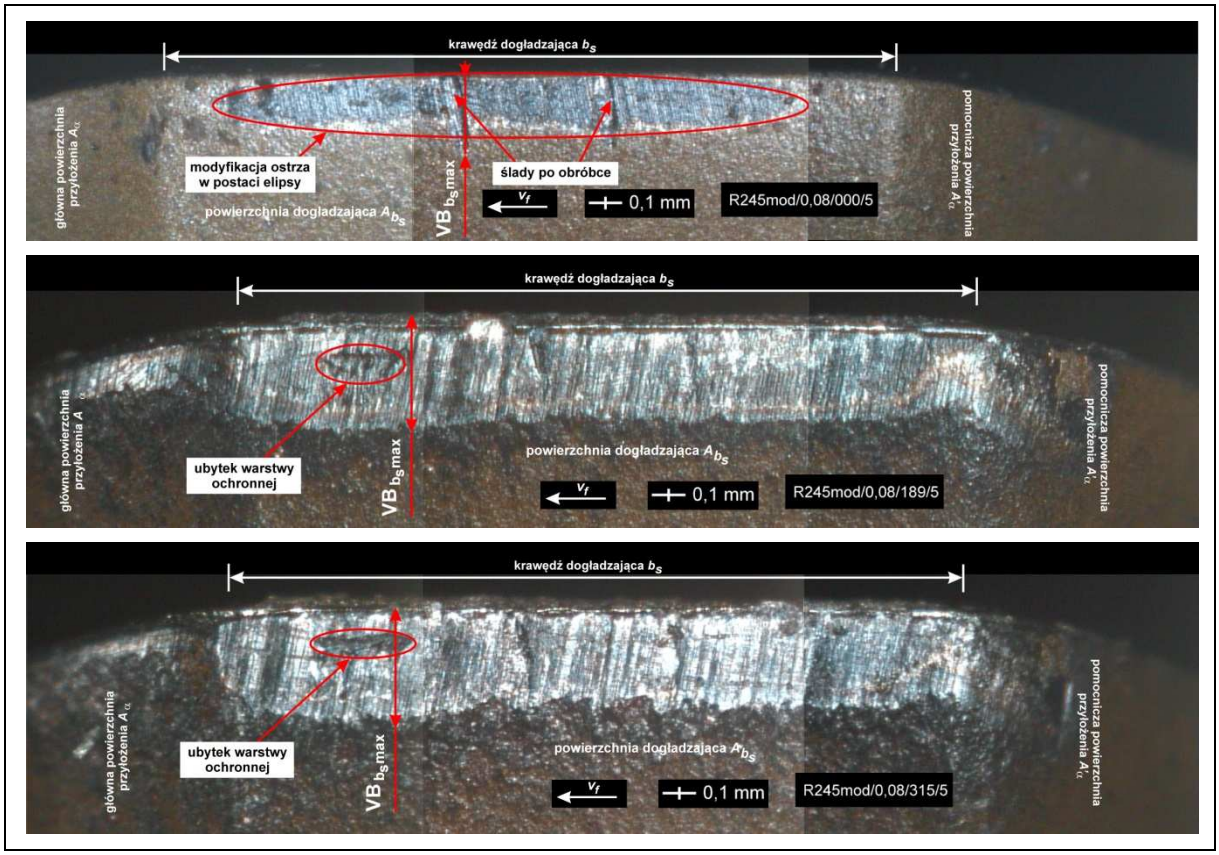
Dla frezowania z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min, wyniki zużycia ostrzy zestawiono w tablicach 61- 68. Zestawienia obrazów cyfrowych wykonano po: 189, 315 metrach drogi skrawania L_s.

Zużycie na ostrzach nr 1 - 4, 6 - 8 skoncentrowało się głównie na powierzchni dogładzającej b_s. Po 315 metrach frezowania powiększyło się, szczególnie dla ostrzy nr 1, 2, 3 (tabl. 61- 63), a dla pozostałych ostrzy ślad wytarcia był niewielki i ustabilizowany. Na ostrzach nr 3, 4 i 6 wystąpiło zużycie rowkowe oraz wystąpiły drobne ubytki warstwy ochronnej na krawędzi dogładzającej b_s na ostrzach nr 1 - 4.

Obrazy cyfrowe powierzchni dogładzającej po modyfikacji dla ostrza nr 5 (tabl. 65- R245mod/0,08/000/5) zestawiono w tablicy 65.

Powierzchnia po szlifowaniu była w postaci rozciągniętej elipsy i długość jej objęła prawie całą krawędź dogładzającą. Średnie poprzeczne wytarcie VB_{bsmax} było 0,15 mm. Wartość tą podstawiono do równania (5.3) i obliczono skrócenie ostrza *KE*, które wyniosło 0,022 mm.

Tablica 65. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245mod z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze



Zmodyfikowaną powierzchnię na ostrzu nr 5 wykorzystano do przeprowadzenia frezowania. Zużycie widoczne było na powierzchni dogładzającej b_s i podczas dalszego skrawania rozwinęło się do postaci sporego wytarcia (tabl. 65). Zaobserwowano ubytek warstwy ochronnej w okolicach zaokrąglenia naroża ostrza $r_{\varepsilon 1}$ (tabl. 65-245mod/0,08/315/5) oraz kilka śladów zużycia rowkowego.

Dla frezowania z prędkością posuwu v_f = 1120 mm/min, wyniki zużycia ostrzy zestawiono w tablicach 69-76. Zestawienia obrazów cyfrowych wykonano po: 100, 200, 260 metrach drogi skrawania L_s.

Dla ostrzy nr 1 - 5, 7, 8 zużycie rozwijało się na całej powierzchni dogładzającej b_s i nie zmieniło swojej wielkości dla dłuższej drogi skrawania. Zarejestrowano widoczną granicę materiału ostrza i warstwy ochronnej na ostrzu nr 3 po 200 metrach frezowania (tabl. 71-245mod/0,125/200/3). Po 260 metrach frezowania większe wytarcie skoncentrowało się w okolicach zaokrąglenia naroża $r_{\varepsilon 1}$ dla ostrza nr 8 i $r_{\varepsilon 2}$ dla ostrza nr 7. Zużycie rowkowe pojawiło się na ostrzach nr 1 i 7 i nastąpił ubytek warstwy ochronnej na krawędzi i na narożu $r_{\varepsilon 2}$ ostrza nr 5.

W tablicy 74 zaprezentowano cyfrowe obrazy powierzchni dogładzającej ostrza nr 6 po modyfikacji i jego zmiany zużycia po frezowaniu (tabl. 74-R245mod/0,125/000/6). Pole zmodyfikowanej powierzchni było nieregularne. Po prawej i lewej stronie na powierzchni ostrza ślad modyfikacji był większy, a w środkowej części mniejszy. Zarejestrowano poprzeczne ślady przypominające zużycie rowkowe. Po szlifowaniu powstała prostokątna powierzchnia, która była na całej długość powierzchni

dogładzającej b_s ostrza. Średnie poprzeczne wytarcie wyniosło 0,18 mm. Obliczono skrócenie ostrza *KE*, które wyniosło 0,026 mm.

Tablica 74. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245mod z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze

Po 100 metrach frezowania zarejestrowano ubytki warstwy ochronnej, które zmieniały się po dłuższych drogach skrawania. Ślady powstałe po modyfikacji ulegały istotnym zmianom, w taki sposób, że po frezowaniu powstała nowa powierzchnia wytarcia, która powiększyła swoją wielkość (tabl. 74) w miarę rosnącej drogi skrawania.

5.6.3. Identyfikacja trwałości ostrza zmodyfikowanego głowicy R245mod

W tym podrozdziale opisano wyniki rozwinięcia pola powierzchni wycinka elipsy w ostrzu zmodyfikowanym. Do opisu wykorzystano wskaźniki zużycia VB_{bsmax} dla ostrzy z powierzchnią

dogładzającą b_s. Pozostałe ostrza, zużywały się względem drogi skrawania i dla nich przyjęto te same wskaźniki zużycia.

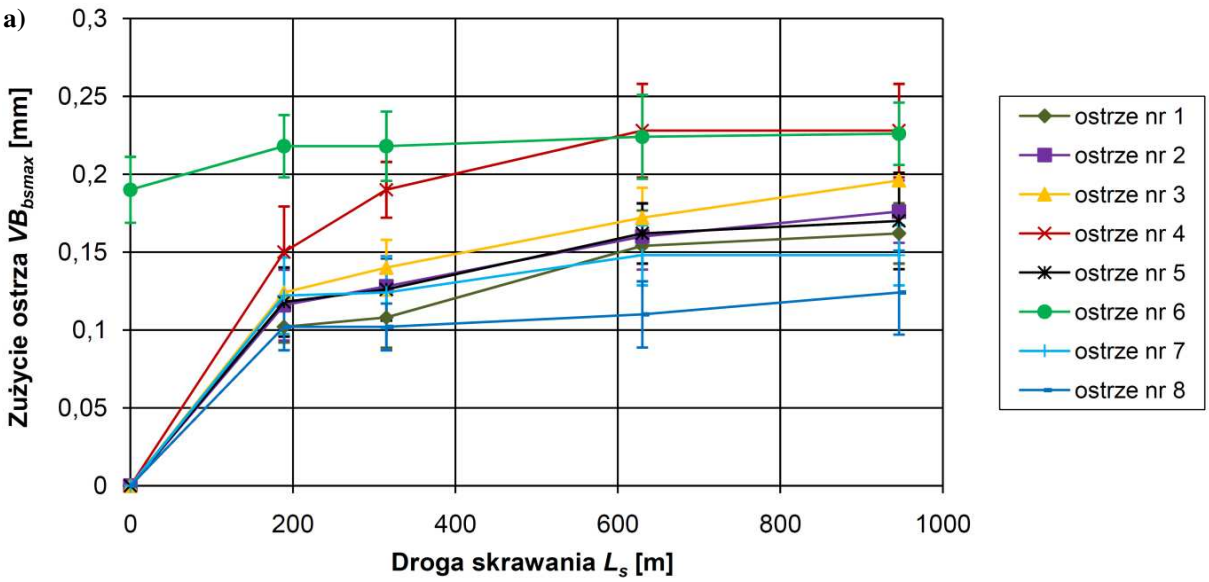
Pomiary zużycia i rozwinięcia wycinka elipsy ostrza wykonano z wykorzystaniem krzyżowego stolika ze śrubą mikrometryczną. Zmierzone wartości zweryfikowano z wynikami uzyskanymi z obrazów cyfrowych. Pomiary powtarzano czterokrotnie dla otrzymania dokładnych wyników.

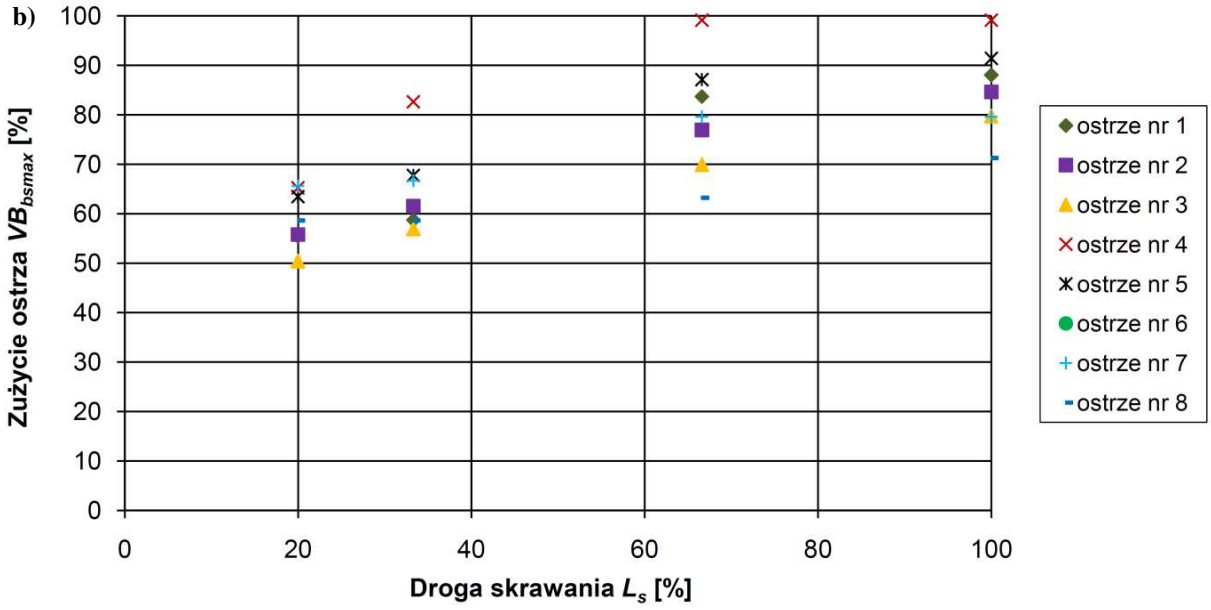
Z uzyskanych wartości obliczono średnie arytmetyczne, które posłużyły do opracowania wykresów zależności zużycia ostrzy i wycinka elipsy do drogi skrawania L_s.

Droga skrawania była zmienna dla trzech prędkości posuwu. Założono, aby zużycie ostrzy nie przekroczyło VB_{bsmax} = 0,3 mm. Skupiono się na oszacowaniu rozwinięcia wycinka elipsy na ostrzach zmodyfikowanym po frezowaniu. Pomiary zużycia pozostałych ostrzy były drugorzędne.

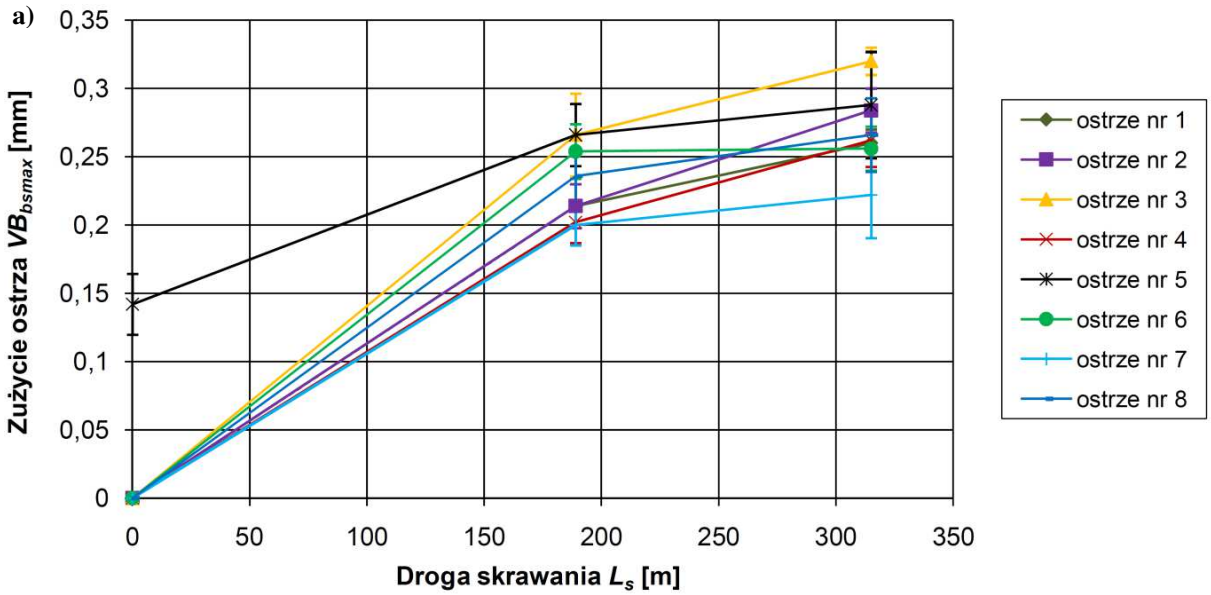
Pierwsze w kolejności, mierzono ostrza w głowicy R245mod. Dla prędkości posuwu v_f = 335 mm/min pomiary wykonano w czterech punktach na odcinku 946 metrów drogi skrawania L_s.

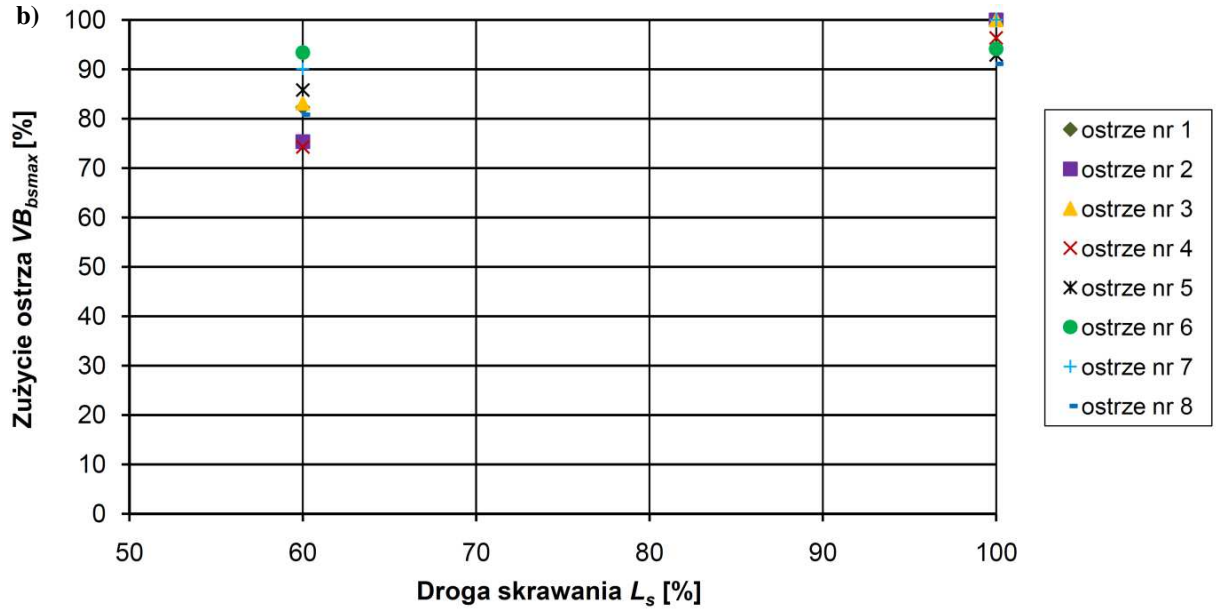
Po modyfikacji średnie poprzeczne wytarcie na ostrzu wynosiło 0,19 mm. Wytarcie wycinka elipsy na ostrzu dla początkowej drogi skrawania wzrosło do ~0,22 mm. Dalsze frezowanie powodowało, że wytarcie nie uległo powiększeniu aż do zakończenia frezowania. (rys. 5.85). Zużycie dla pozostałych ostrzy rosło względem dłuższej drogi skrawania. Wyraźny przyrost do szybszego zużycia wykazało ostrze nr 4.





Rys. 5.85. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min.



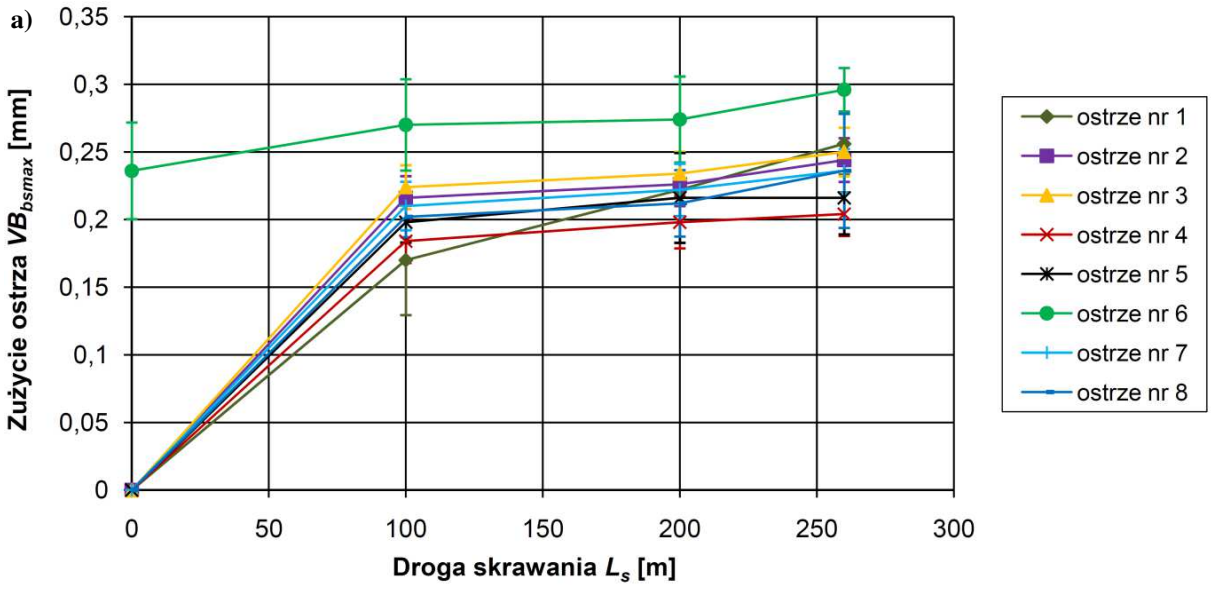


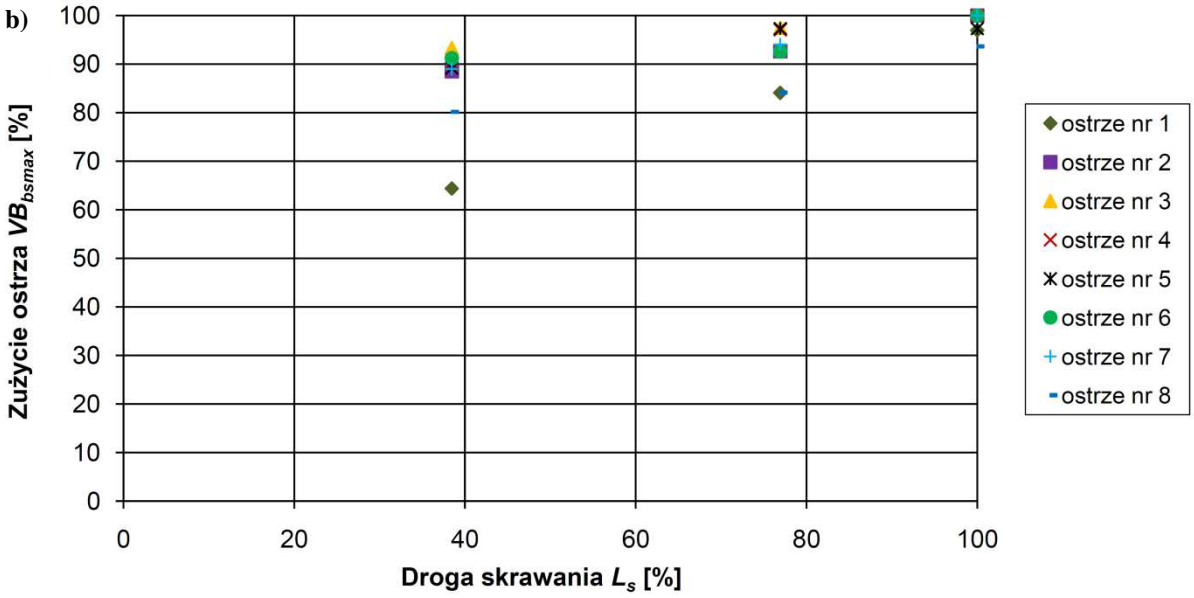
Rys. 5.86. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min.

Wyniki rozwinięcia wycinka elipsy i zużycia ostrza dla frezowania z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min przedstawiono na rysunku 5.86a. Pomiary wykonano w dwóch punktach na odcinku 315 metrów drogi skrawania L_s.

Uzyskane, średnie poprzeczne wytarcie po modyfikacji ostrza wynosiło ~0,14 mm. Podczas frezowania, wielkość wytarcia wycinka elipsy rosła, poprzez VB_{bsmax} ~0,26 mm do ~0,29 mm. Zużycia na pozostałych ostrzach wzrastały dla dłuższej drogi skrawania. Wyraźny przyrost nastąpił na ostrzu nr 3, gdzie po 180 metrach frezowania jego wartość była większa od wielkości powierzchni zmodyfikowanej.

Zmierzone zmiany wycinka elipsy i zużycia ostrzy dla kolejnej prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min, wykonano w trzech punktach na odcinku 260 metrach drogi skrawania L_s.





Rys. 5.87. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min.

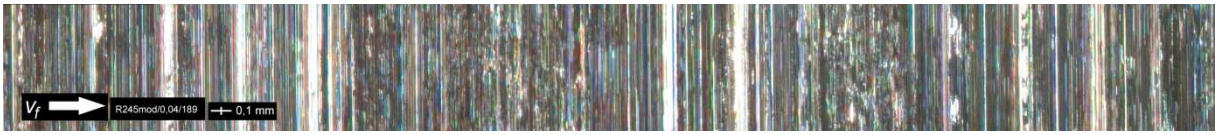
Średnie poprzeczne wytarcie dla ostrza zmodyfikowanego wynosiło ~0,23 mm. Po 100 metrach frezowania wartość wytarcia wycinka elipsy wzrosła do VB_{bsmax} ~0,27 mm i była niezmienna dla dłuższej drogi skrawania. Po zakończeniu frezowania uzyskano zmierzony wycinek elipsy o wartości VB_{bsmax} ~0,3 mm (Rys. 5.87a). Zużycie na pozostałych ostrzach nieznacznie rosło i po zakończeniu badań było w zakresie od 0,2 do ~0,26 mm.

5.6.4. Badanie chropowatości powierzchni obrobionej zmodyfikowanym ostrzem głowicy R245

Opisane badania dotyczą kształtowania powierzchni obrobionej z wykorzystaniem ostrza zmodyfikowanego na powierzchni dogładzającej b_s oraz wpływu zmiany jego geometrii na uzyskane wyniki chropowatości powierzchni. Badania przeprowadzono dla frezowanie powierzchni płaskich głowicą R245mod.

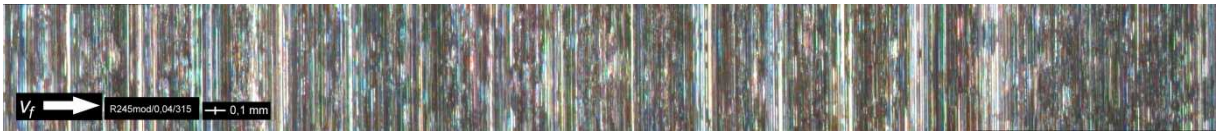
Do opisu wyników chropowatości powierzchni przyjęto taką sama zasadę pomiarów jak opisano to w podrozdziale 5.4.2. Na rysunkach 5.92a, b, c przedstawiono wyniki zmian parametrów chropowatości w zależności drogi skrawania z wykorzystaniem ostrza o zmodyfikowanej geometrii.

Z pomiarów chropowatości przeprowadzonych po frezowaniu z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min dla głowicy R245mod (rys. 5.92a) wynika, że po 190 metrach drogi skrawania parametry chropowatości malały *Ra* od 1,2 do 0,4 µm, *Rz* od 8,5 do 2 µm, *Rmax* od 9,5 do 2,9 µm.



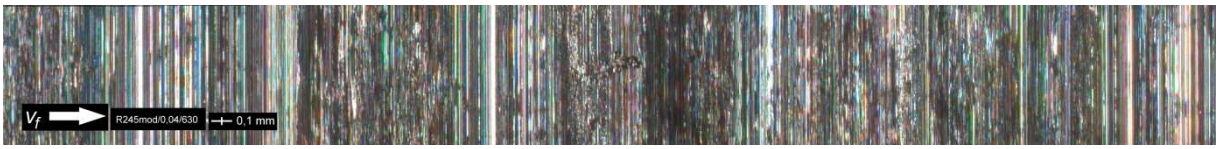
Rys. 5.88. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

Po 300 metrach skrawania wartości parametrów rosły *Ra* do 0,9 µm, *Rz* do 5 µm, *Rmax* do 7,7 µm.



Rys. 5.89. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 315 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

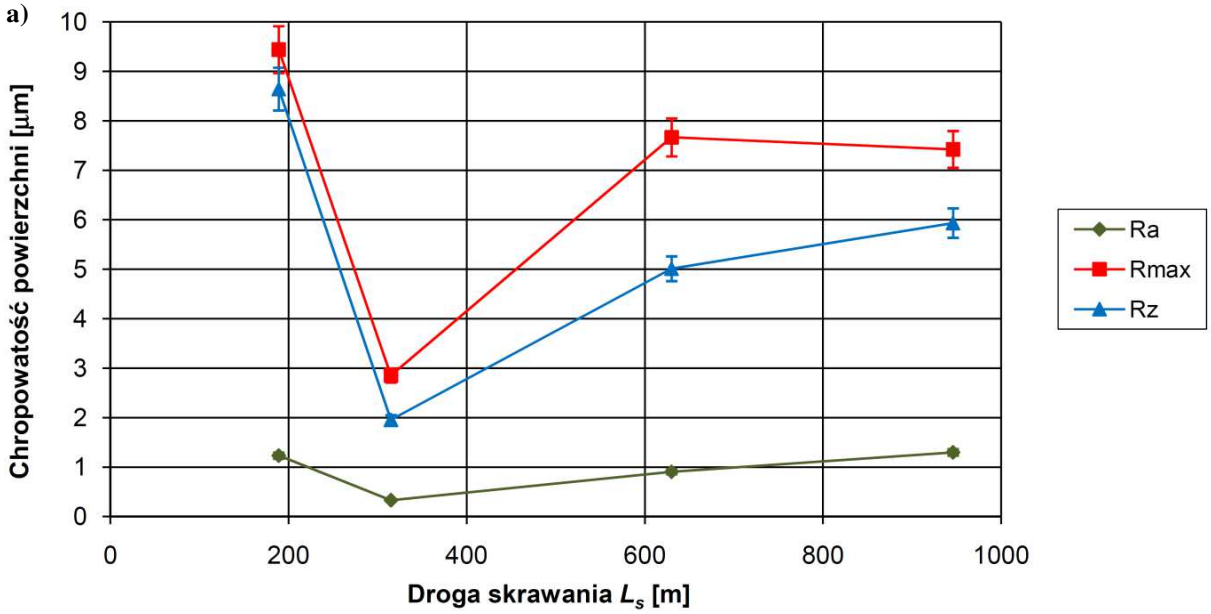
Kolejne pomiary zarejestrowane dla wartość parametrów *Ra* i *Rz* nadal rosły, a *Rmax* malało. Po 950 metrach frezowania przyjęły wartości *Ra* = 1,2 µm, *Rz* = 6 µm, *Rmax* = 7,5 µm.

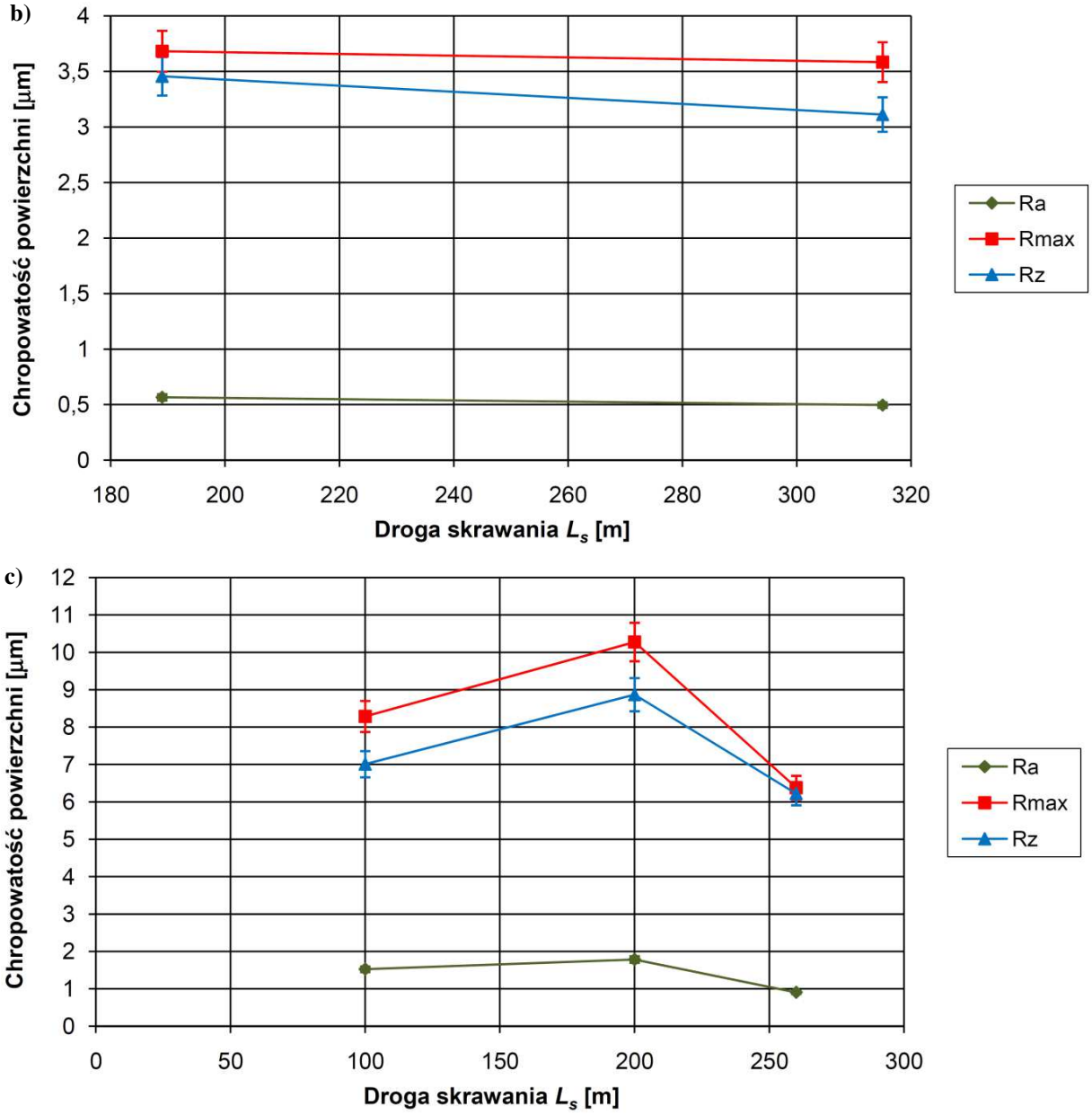


Rys. 5.90. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 630 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

Rys. 5.91. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 946 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

Obrazy cyfrowe powierzchni po frezowaniu dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min. zamieszczono na czterech rysunkach 5.88 - 5.91.

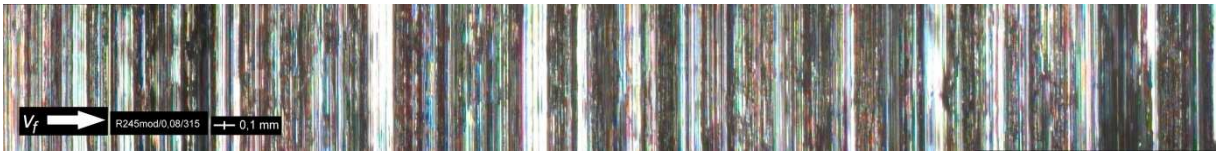




Rys. 5.92. Przebieg zmian parametrów chropowatości powierzchni obrobionej po modyfikacji ostrza dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu a) v_f=355 mm/min, b) v_f=710 mm/min, c) v_f=1120 mm/min

Po frezowaniu z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min (rys. 5.92b) stwierdzono, że po 190 metrach drogi skrawania parametry chropowatości były dla *Ra* = 0,55 µm, *Rz* = 3,4 µm, *Rmax* = 3,6 µm, które zaczęły maleć. Po 310 metrach frezowania ich wartości były równe *Ra* = 0,5 µm, *Rz* = 3,15 µm, *Rmax* = 3,6 µm.

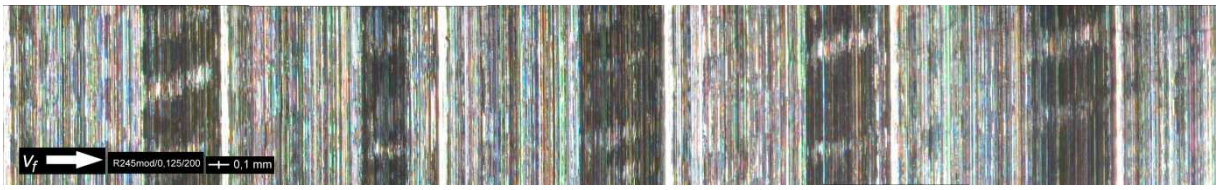
Rys. 5.93. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min



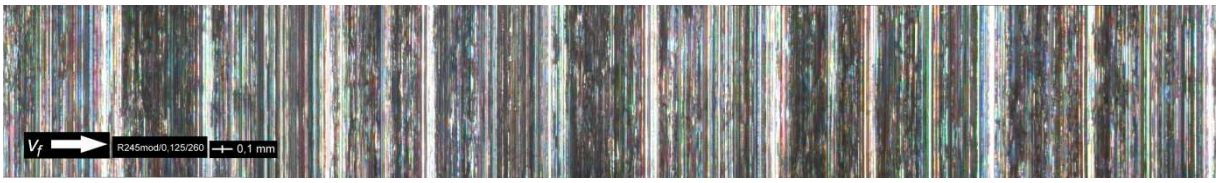
Rys. 5.94. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 315 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min

Dla prędkości posuwu v_f =1120 mm/min (rys. 5.92c) po 100 metrach drogi skrawania parametry chropowatości rosły *Ra* od 1,5 do 1,9 μm, *Rz* od 6,9 do 8,8 μm, *Rmax* od 8,2 do 10,3 μm.

Rys. 5.95. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 100 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min



Rys. 5.96. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 200 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min



Rys. 5.97. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 260 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min

Po osiągnięciu 200 metrów wartości parametrów zaczęły maleć i na 260 metrze przyjęły wartości *Ra* = 1 μm, *Rz* = 6,3 μm, *Rmax* = 6,4 μm.

Cyfrowe reprezentacje powierzchni po frezowaniu dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min. i v_f = 1120 mm/min. zamieszczono rysunkach 5.93 - 5.97.

5.7. Wyniki badań pracy ostrzy zmodyfikowanych głowicy R390mod

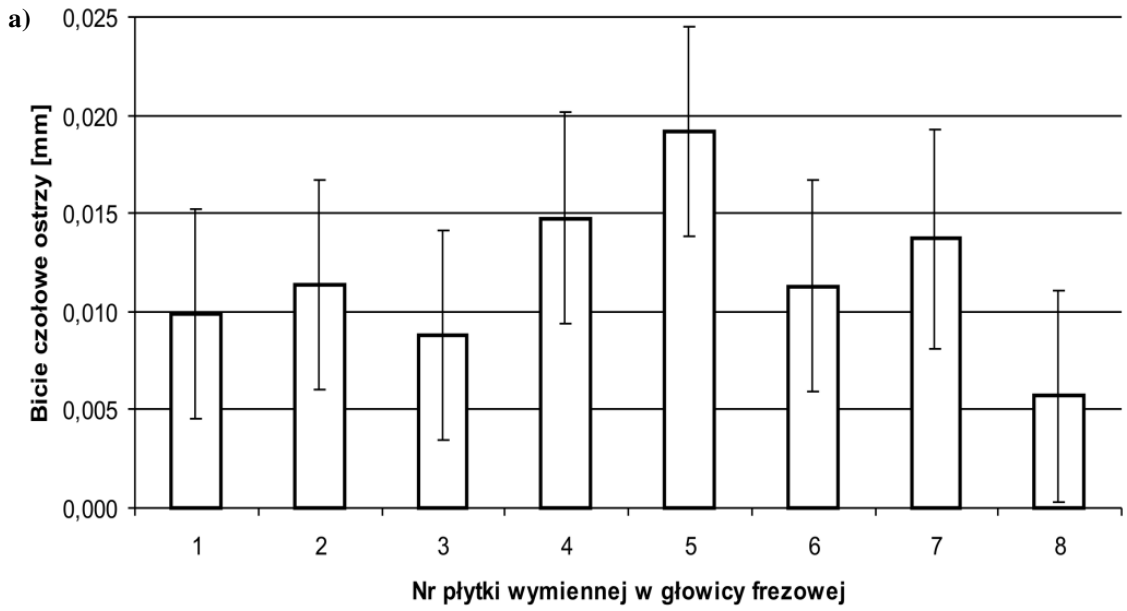
Przedstawiono wyniki badań uzyskanych wyników z:

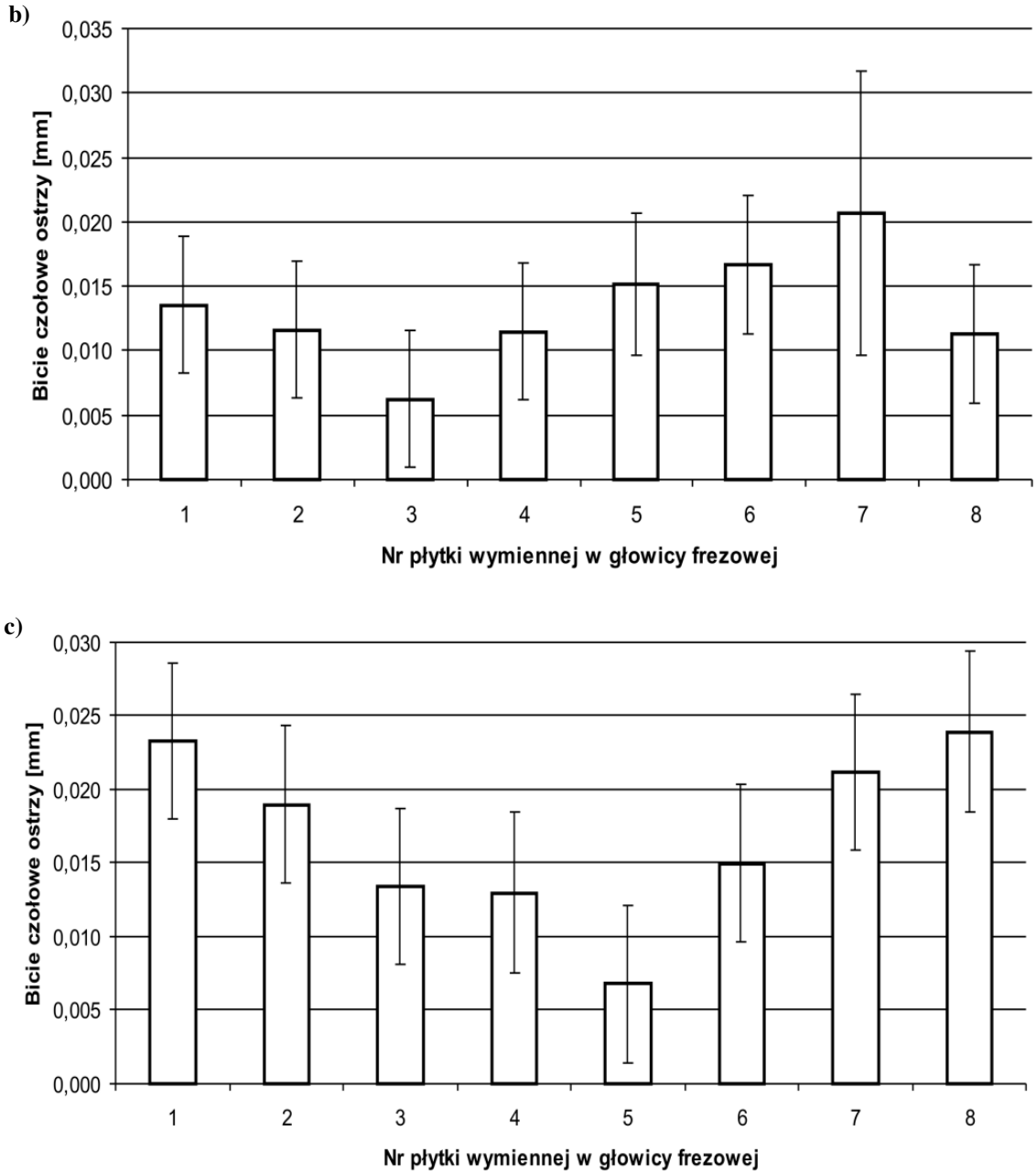
- pomiarów bicia czołowego ostrzy,
- opisu zmian zmodyfikowanej geometrii na pomocniczej powierzchni przyłożenia po frezowaniu i jego przyrostów wartości do drogi skrawania L_s.
- opisu powierzchni obrobionych parametrami *Ra*, *Rz*, *Rmax* i ich reprezentacji cyfrowych po frezowaniu ostrzem zmodyfikowanym.

5.7.1. Badania bicia czołowego ostrzy w głowicy R390mod

Wyniki pomiarów bicia czołowego płytek wymiennych przedstawiono na rysunku 5.98 a,b,c. Ostrze które było najbardziej wysujęte z korpusu narzędzia zostało zmodyfikowane na pomocniczej powierzchni przyłożenia dla płytek wymiennych R390-17 04 20 E-PM 4240 w głowicy frezowej R390.

Badania przeprowadzono dla frezowanie powierzchni płaskich z trzema różnymi prędkościami posuwu v_f.





Rys. 5.98. Bicie czołowe płytek wymiennych przed modyfikacją ostrza w głowicy frezowej R390 dla prędkości posuwu a) v_f=355 mm/min., b) v_f=710 mm/min., c) v_f=1120 mm/min.

5.7.2. Badania zużycia roboczych powierzchniach zmodyfikowanego ostrza głowicy R390mod

Opisano wyniki rozwinięcia pola powierzchni wycinka elipsy w ostrzu zmodyfikowanym, a także zużycie na pozostałych ostrzach. Do opisu wykorzystano wskaźniki zużycia VB_r dla badanych ostrzy.

Wyniki badań i zdokumentowane obrazy po modyfikacji zmiany geometrii ostrza dla głowicy frezowej R390mod zestawiono w pomocnicze tabeli 10 i numerowanych stron.

Tabela 10. .....

SYMBOL GŁOWICY FREZOWEJ	PRĘDKOŚĆ POSUWU v_f [mm/min]	DROGA SKRAWANIA L_s [m]	NR OSTRZA	NR TABLICY
R390	355	126 189 315	1	77
			2	78
			3	79
			4	80
			5 mod.	81
			6	82
			7	83
			8	84
	710	95 189 315	1	85
			2	86
			3	87
			4	88
			5	89
			6	90
			7 mod.	91
			8	92
	1120	100 200 300	1	93
			2	94
			3	95
			4	96
			5	97
			6	98
			7	99
			8 mod.	100

Po frezowaniu z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min z ostrzem po modyfikacji, wyniki zużycia zestawiono w tablicach 77 – 84 . Zestawienia obrazów cyfrowych wykonano po: 126, 189, 315 metrach drogi skrawania L_s.

Głównie, zużycie wystąpiło na całym jego narożu i pomocniczej powierzchni przyłożenia ostrzy nr 1-4, 6-8. Rejestrując kolejne fazy zużycia, widoczne były niewielkie wytarcia oraz punktowe wykruszenie na pomocniczej powierzchni przyłożenia. Wyjątek stanowiło ostrze nr 7 na którym wielkość zużycia była większa niż na pozostałych ostrzach. Dopiero po 315 metrach skrawania wystąpiły ślady większego wytarcia, w otoczeniu naroża r_ε.

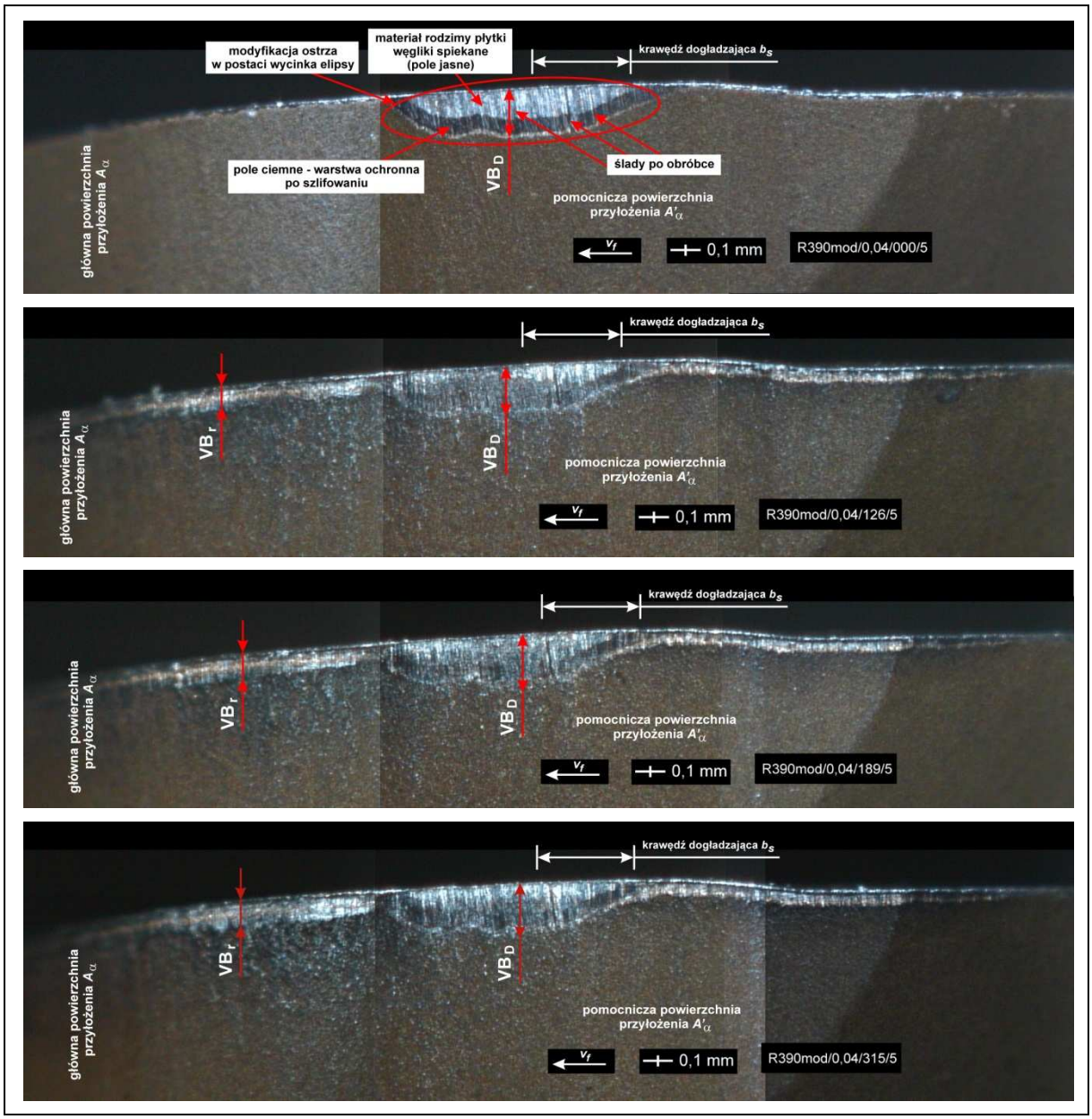
Cyfrowe obrazy pomocniczej powierzchni przyłożenia po modyfikacji ostrza nr 5, zestawiono w tablicy 81. Po szlifowaniu zaobserwowano wyraźne przenikanie zeszlifowanego węglika spiekanego

(jasne pole) i warstwy ochronnej (ciemne pole) (tabl. 81-R390mod/0,04/000/5). Widać że, powstała po modyfikacji powierzchnia jest w postaci wycinka elipsy z pewnymi nieregularnymi krawędziami. Na kształt takiej powierzchnię, wpływ miała geometria oraz dokładność wykonania ostrza.

Z zarejestrowanego obrazu cyfrowego na powierzchni po modyfikacji widoczne są poprzeczne ślady, powstałe w wyniku obróbki diamentowymi ziarnami ściernymi zawartych w luźnym ścierniwie. Nie są one tak intensywne jak w przypadku powierzchni po modyfikacji ostrzy w głowicy R245mod.

Uzyskaną elipsę po szlifowaniu wykonano w otoczeniu naroża ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia. Średnie poprzeczne wytarcie było 0,15 mm. Znając podaną wartość obliczono skrócenie ostrza *KE*, które wyniosło 0,016 mm.

Tablica 81. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390mod z posuwem na ostrze f_z = 0,04 mm/ostrze



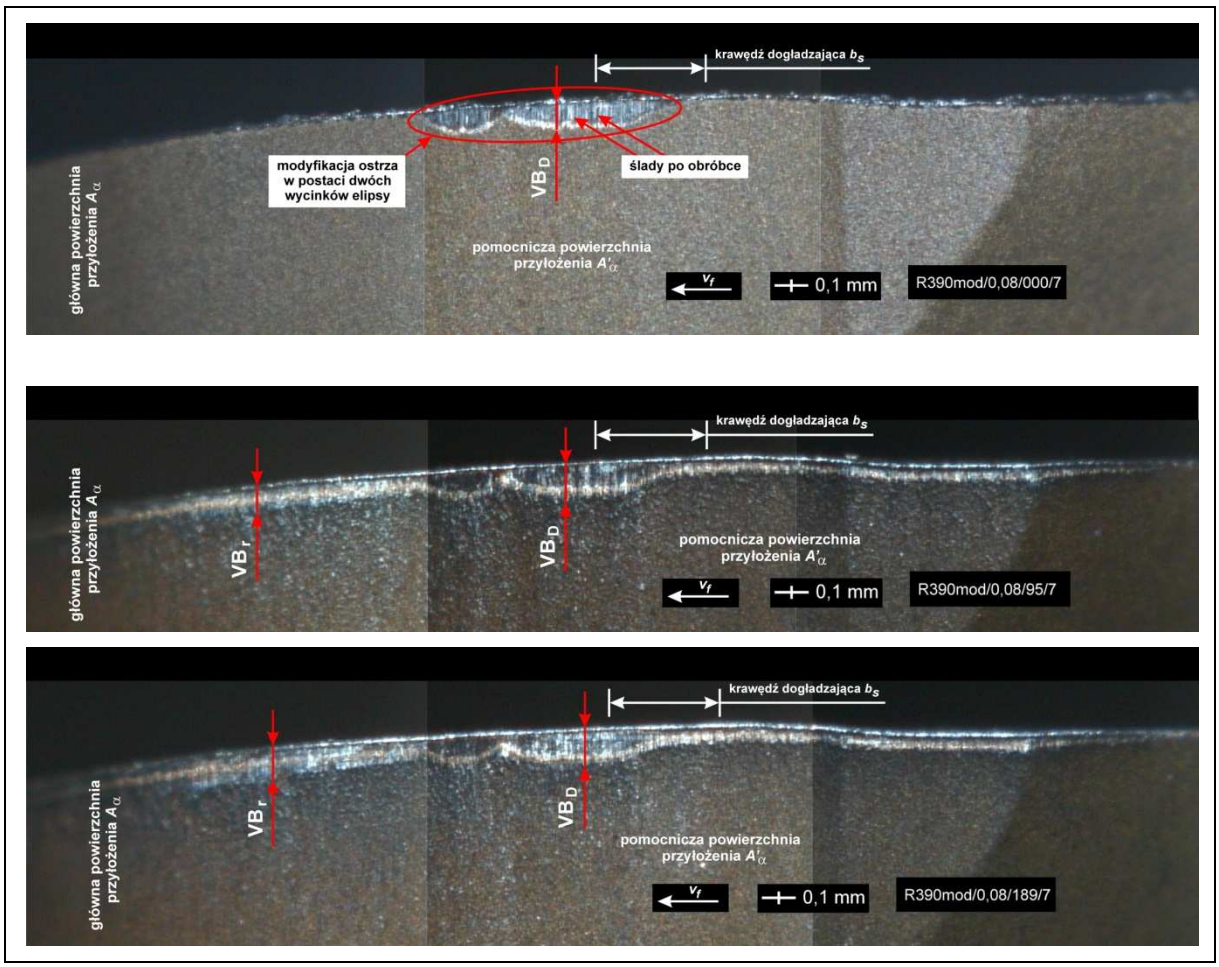
Ślady po modyfikacji nie rozwijały swojego wytarcia. Jedynie po dłuższych drogach skrawania zarejestrowano niewielkie zużycie w otoczeniu narożu ostrza i na pomocniczej powierzchni przyłożenia (tabl. 81).

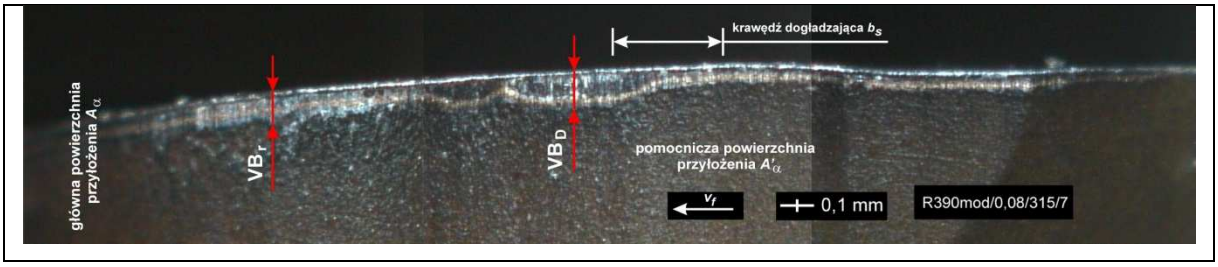
Poniżej opisano wyniki zużycia ostrzy dla frezowania z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min, które zaprezentowano w tablicach 85-92. Zestawienia obrazów cyfrowych zaplanowano po: 95, 189, 315 metrach drogi skrawania L_s.

Dla ostrza nr 1-6, 8 wytarcie zużycia było niewielkie i wystąpiło w okolicy zaokrąglenia naroża ostrza i na pomocniczej powierzchni przyłożenia (tabl. 85-90 i 92). Po 315 metrach powiększyła się wielkość zużycia dla tych ostrzy na narożu i nieznacznie na pomocniczej powierzchni przyłożenia.

W tablicy 91 zestawiono obrazy cyfrowe pomocniczej powierzchni przyłożenia po modyfikacji ostrza nr 7. Widoczne jest że, powierzchnia po modyfikacji jest w postaci dwóch wycinków elips (tabl. 91-R390mod/0,08/000/7). Na powstanie takiej powierzchni, wpływ miała geometria oraz dokładność wykonania ostrza. Średnie poprzeczne wytarcie było 0,08 mm, poczym wyznaczono skrócenie ostrza *KE*, które wyniosło 0,008 mm.

Tablica 91. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390mod z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze





Wielkości wytarcia powierzchni po modyfikacji, nie uległa zmianie. Po dłuższej drodze skrawania zaobserwowano wytarcie na pomocniczej powierzchni przyłożenia i narożu ostrza.

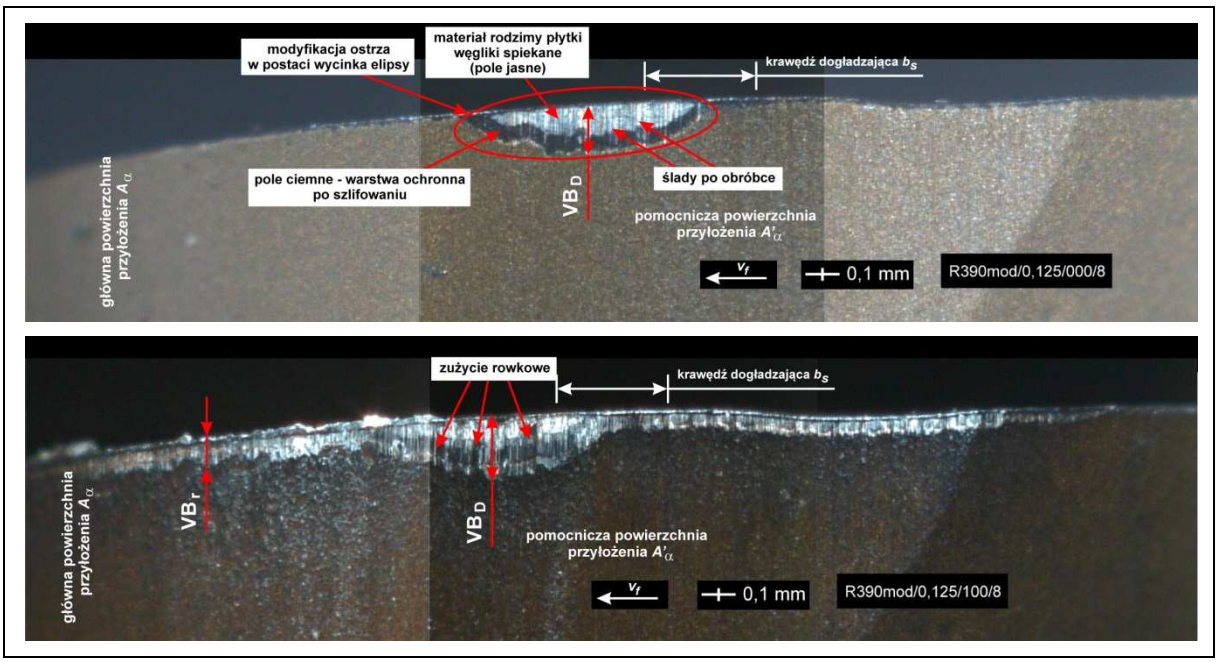
Dla frezowania z prędkością posuwu v_f = 1120 mm/min, wyniki zużycia ostrzy zestawiono w tablicach 93-100. Zestawienia obrazów cyfrowych zaplanowano po: 100, 200, 300 metrach drogi skrawania L_s.

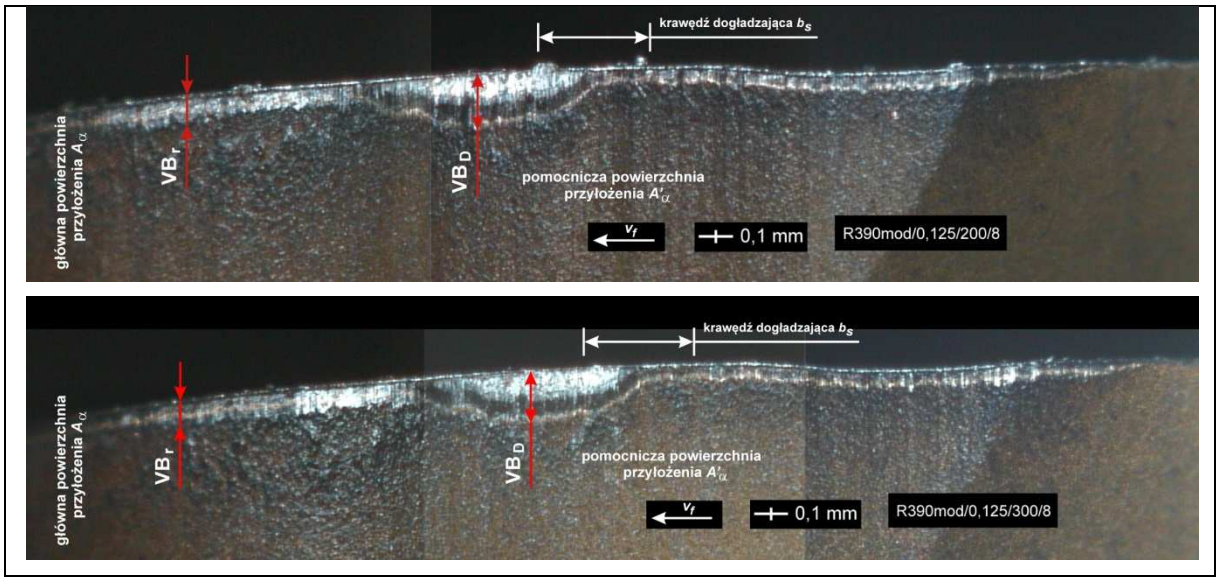
Dla ostrzy nr 1-7 rozwinięcie zużycia było widoczne w otoczeniu naroża i na pomocniczej powierzchni przyłożenia ostrza. Rozmiar tego zużycia był niewielkim, nawet dla narastającej drogi skrawania.

W tablicy 100 zestawiono obrazy cyfrowe pomocniczej powierzchni przyłożenia po modyfikacji ostrza nr 8 i jego rozwinięcie zużycia po frezowaniu. Otrzymana powierzchnia po modyfikacji była w postaci elipsy (tabl. 100-R390mod/0,125/000/8) z nieregularnymi krawędziami oraz widocznymi śladami poprzecznymi po obróbce. Na zapisanym obrazie jest widoczne przenikanie zeszlifowanych węglików spiekanych (jasne pole) i warstwy ochronnej.

Zmierzone średnie poprzeczne wytarcie było 0,11 mm. Wartość tą, użyto do obliczenia skrócenia ostrza *KE*, które wyniosło 0,012 mm.

Tablica 100. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390mod z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze





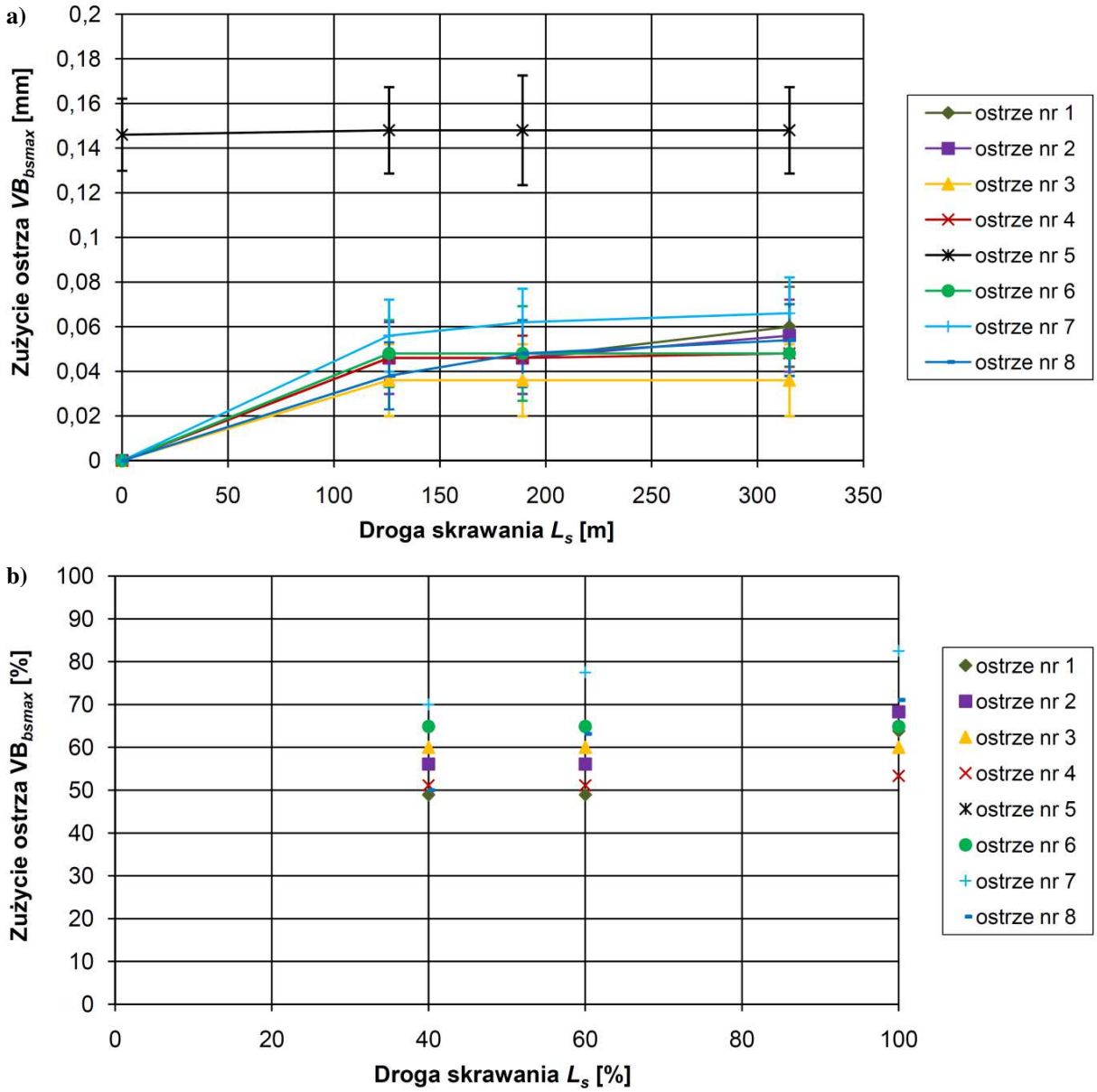
Po frezowaniu, zmodyfikowana powierzchnia nie ulegała zmianom, a wytarcie na ostrzu rozwinęło się jedynie na narożu i na pomocniczej powierzchni przyłożenia w niewielkim stopniu. Po 100 metrach skrawania powstały wyraźne ślady podobne do zużycia rowkowego, które znikły dla dłuższej drogi skrawania.

5.7.3. Identyfikacja trwałości ostrza zmodyfikowanego głowicy R390

W drugiej części podrozdziału opisano wyniki rozwinięcia wytarcia wycinka elipsy dla głowicy frezowej R390mod z ostrzami o narożu z zaokrąglonym promieniem r_ε.

Dla frezowania z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min pomiary wykonano w trzech punktach na odcinku 315 metrach drogi skrawania L_s.

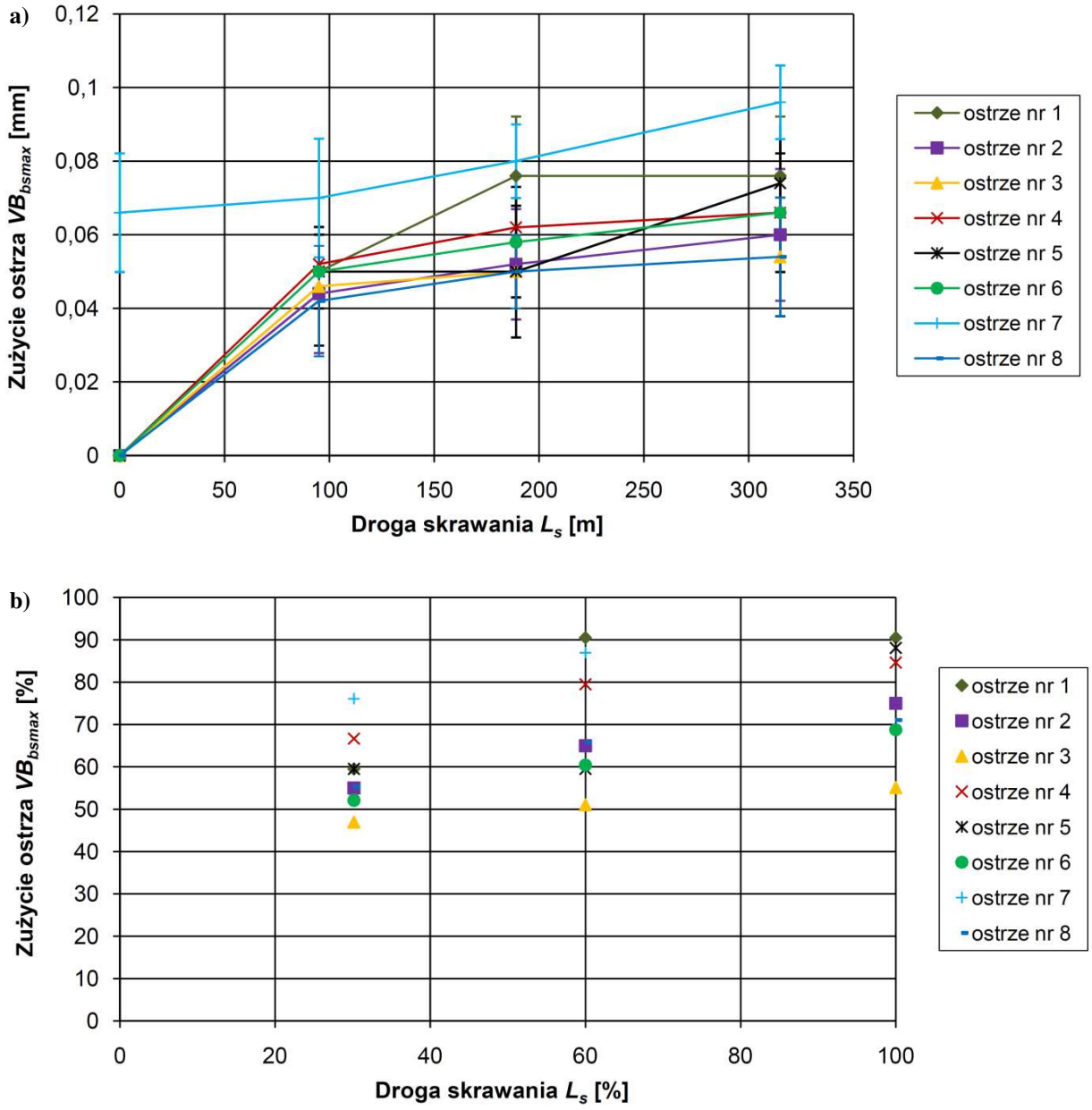
Po modyfikacji średnie poprzeczne wytarcie na ostrzu wynosiło ~0,15 mm i taki stan zachowało do zakończenia frezowania (Rys. 5.99a). Dla pozostałych ostrzy wartość zużycia była w zakresie VB_{bsmax} od 0,04 do ~0,06 mm i dla dłuższej drogi skrawania ich wartości zmieniły się nieznacznie.



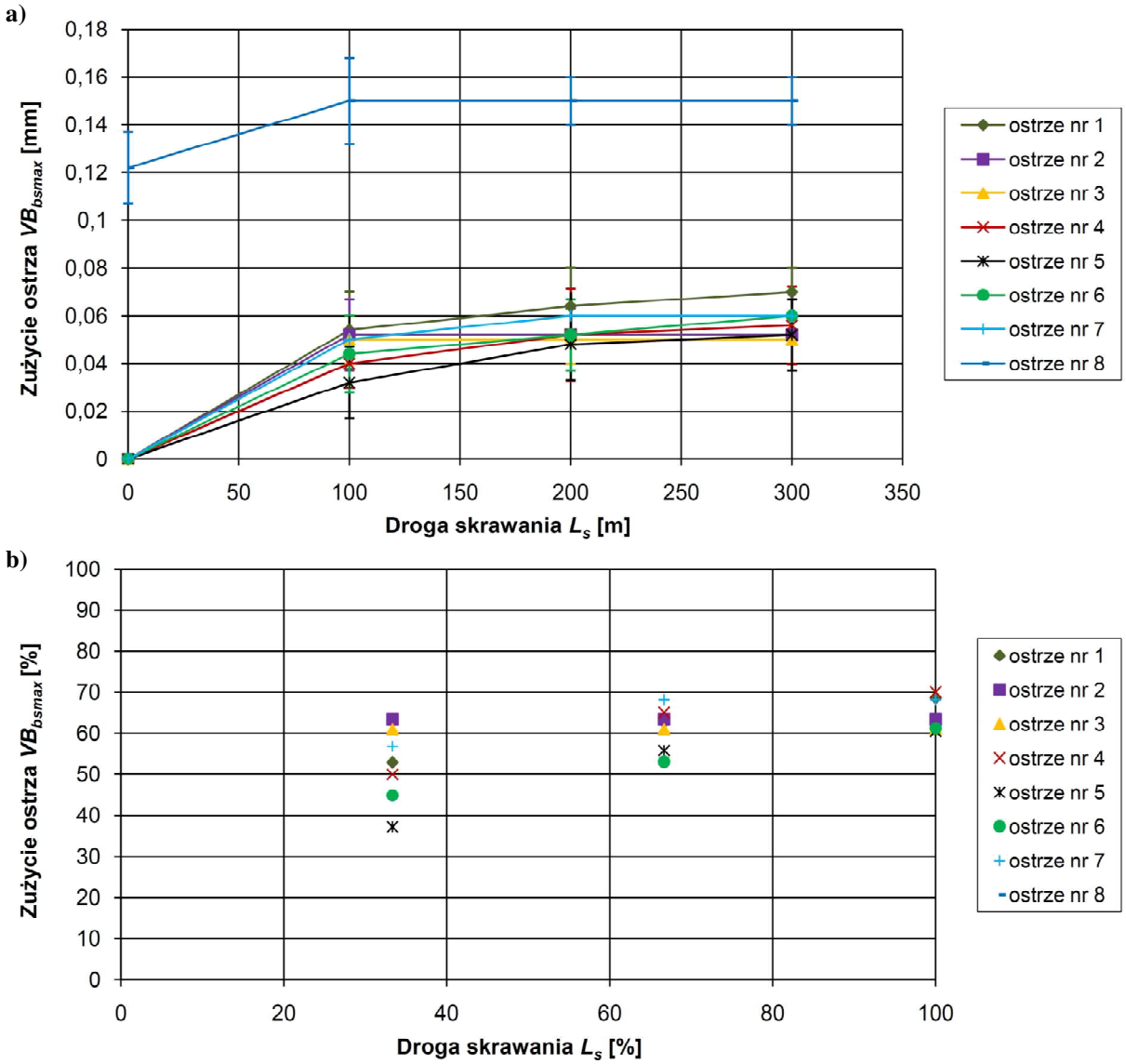
Rys. 5.99. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min.

Wyniki zmian wycinka elipsy po frezowaniu dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min zaprezentowano na rysunku 5.100. Pomiary wykonano w trzech punktach na odcinku 315 metrach drogi skrawania L_s.

Po modyfikacji średnie poprzeczne wytarcie na ostrzu wynosiło ~0,07 mm. Na całej drodze skrawania wytarcie elipsy powiększało się około 0,01 mm na 100 metrów drogi skrawania (rys. 5.100a). Wartości zużycia dla pozostałych ostrzy były do siebie skupione w zakresie od ~0,04 do ~0,05 mm. Ostrza nr 1 i 5 wykazały wzrost zużycia dla dłuższej drogi skrawania L_s.



Rys. 5.100. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min.



Rys. 5.101. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min.

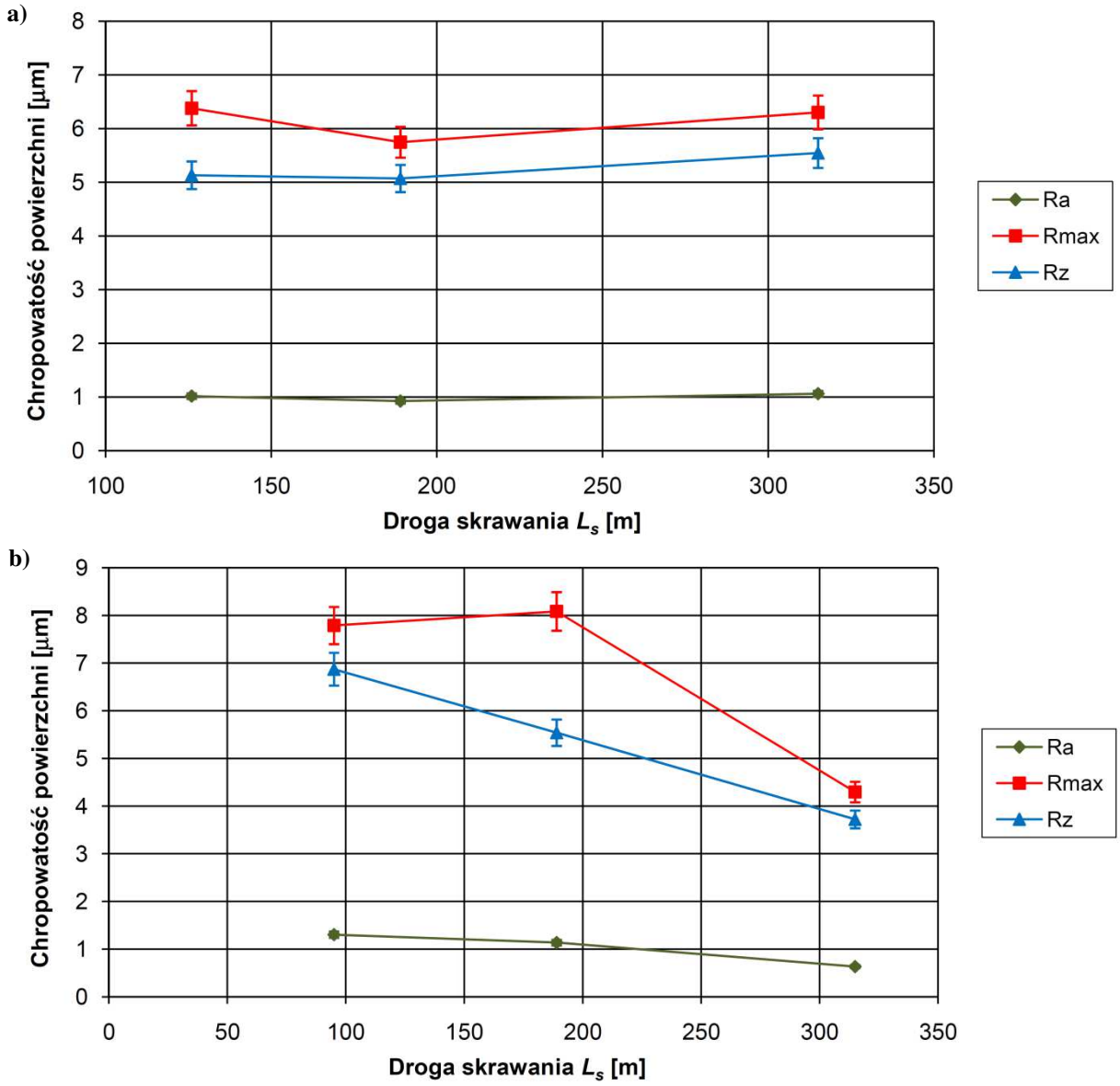
Po modyfikacji wytarcia zużycia ostrza dla frezowania z prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min przedstawiono na rysunku 5.101. Pomiary wykonano w trzech punktach na odcinku 300 metrów drogi skrawania L_s.

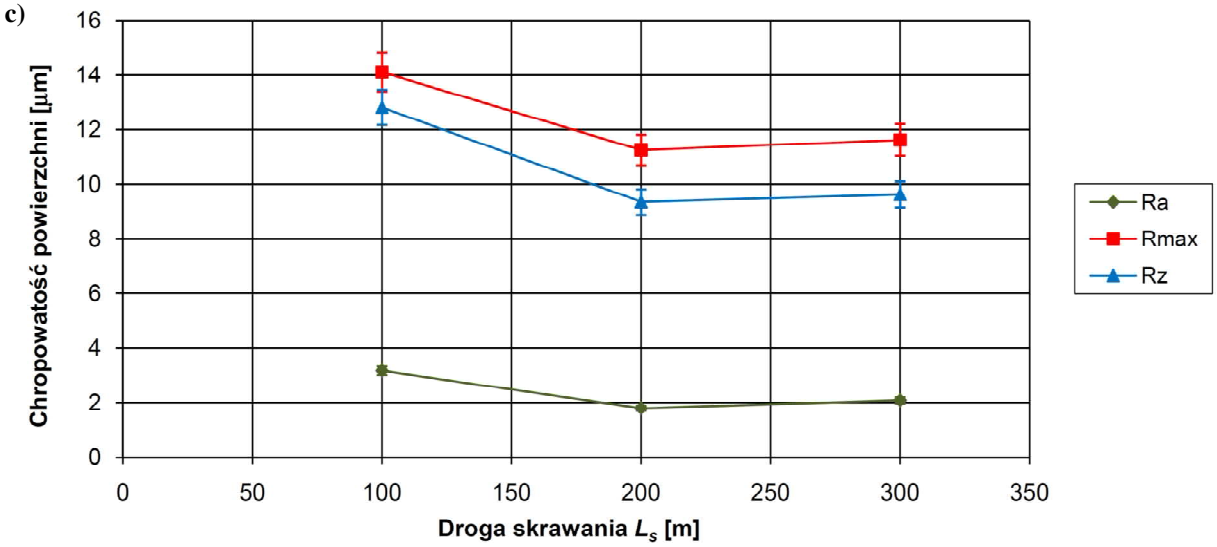
Średnie poprzeczne wytarcie na ostrzu wynosiło ~0,12 mm. Po 100 metrach frezowania wytarcie wycinka elipsy VB_{bsmax} wzrosło do 0,15 mm i wartość ta nie zmieniała się do zakończenia frezowania.

Dalsze skrawania powodowało, że obserwowane zużycie VB_{bsmax} na pozostałych ostrzach nieznacznie rosły i po zakończeniu badań były w zakresie od ~0,05 do ~0,07 mm.

5.7.4. Badanie chropowatości powierzchni obrobionej zmodyfikowanym ostrzem głowicy R390mod

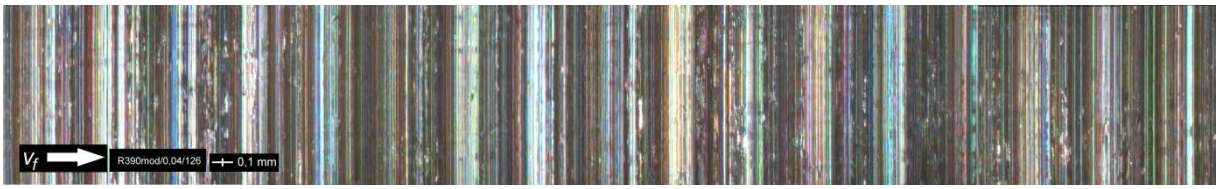
Opisane poniżej badania dotyczą kształtowania powierzchni obrobionej z wykorzystaniem ostrza zmodyfikowanego na pomocniczej powierzchni przyłożenia i jej wpływu na uzyskane wyniki chropowatości powierzchni. Do badań wykorzystano płytki wymienne o symbolu R390-125Q40-17M.





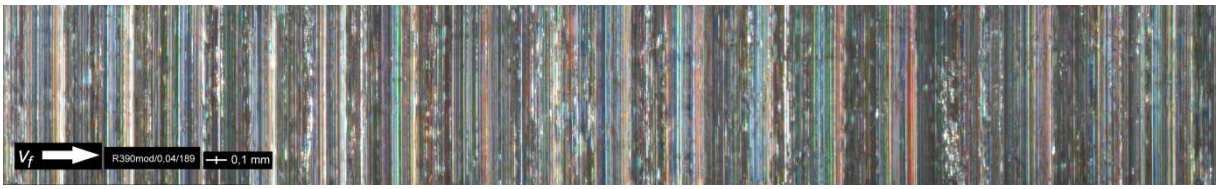
Rys. 5.102. Przebieg zmian parametrów chropowatości powierzchni obrobionej po modyfikacji ostrza dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu a) v_f=355 mm/min, b) v_f=710 mm/min, c) v_f=1120 mm/min

Dla głowicy R390mod, po zmierzeniu chropowatości powierzchni obrobionych z prędkością posuwu v_f=355 mm/min (rys. 5.102a) zarejestrowano parametry: *Ra* od 1 do 0,9 µm, *Rz* od 5,2 do 5,1 µm, *Rmax* od 6,5 do 5,8 µm.

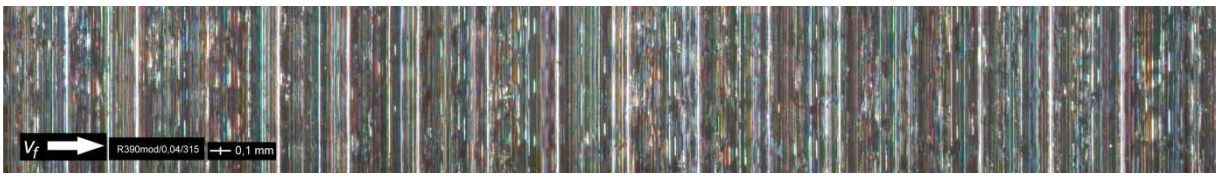


Rys. 5.103. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 126 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

Po 180 metrach drogi skrawania. Podczas dalszego frezowania wartości parametrów zaczęły rosnąć i po 310 metrach przyjęły wartości *Ra* = 1 µm, *Rz* = 5,5 µm, *Rmax* = 6,3 µm.

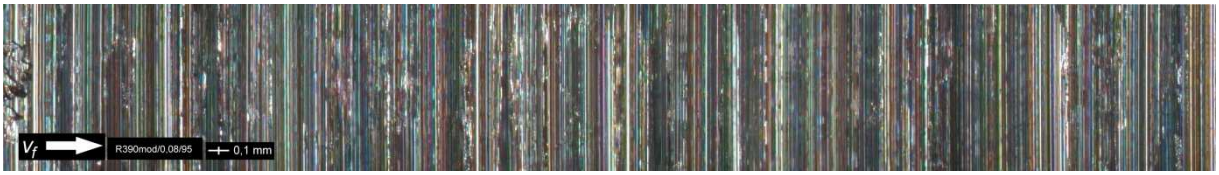


Rys. 5.104. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min



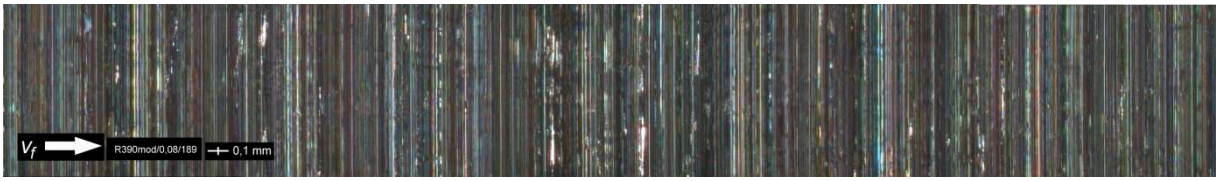
Rys. 5.105. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 315 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min

Po przefrezowaniu 95 metrów z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min (rys. 5.102b) parametry chropowatości malały odpowiednio *Ra* od 1,3 do 1,1 μm i *Rz* od 6,8 do 5,5 μm, natomiast wartość parametru *Rmax* wzrastał od 7,8 do 8,1 μm.

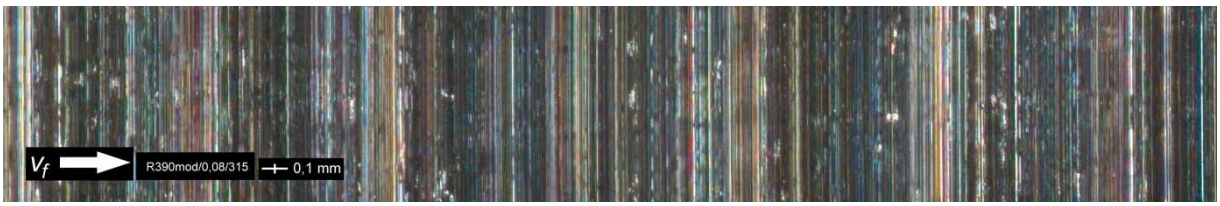


Rys. 5.106. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 95 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min

Po 190 metrach frezowania wszystkie wartości parametrów chropowatości zaczęły maleć i po 315 metrach były równe *Ra* = 0,7 μm, *Rz* = 3,7 μm, *Rmax* = 4,3 μm.

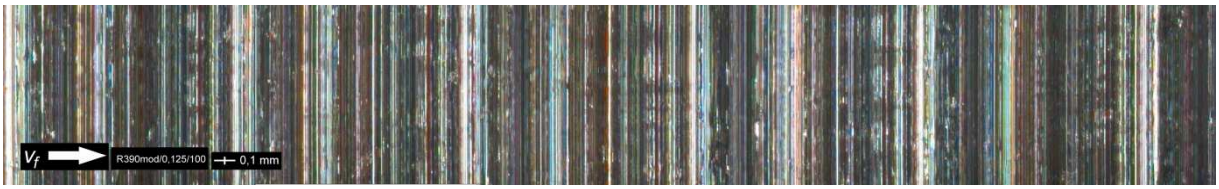


Rys. 5.107. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min

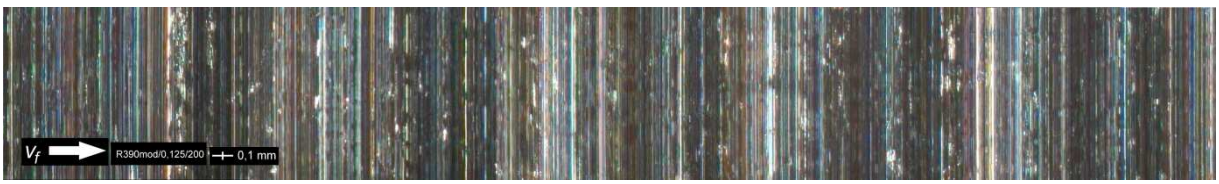


Rys. 5.108. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 315 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min

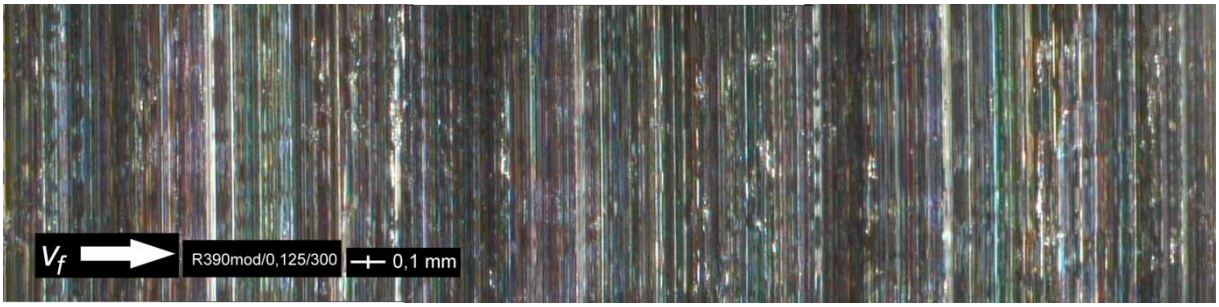
Po 100 metrach drogi skrawania z prędkością posuwu v_f = 1120 mm/min (rys. 5.102c) parametry chropowatości malały *Ra* od 3,1 do 1,9 μm, *Rz* od 12,6 do 9,5 μm, *Rmax* od 14 do 13,5 μm. Po przeskrawaniu 300 metrów nieznacznie rosły do: *Ra* = 2 μm, *Rz* = 9,7 μm, *Rmax* = 11,8 μm.



Rys. 5.109. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 100 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min



Rys. 5.110. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 200 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min



Rys. 5.111. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 300 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min

Reprezentacje cyfrowe powierzchni obrobionych po frezowaniu głowicą R390mod, zaprezentowano na trzech rysunkach 5.103 - 5.105 dla v_f = 355 mm/min., 5.106 - 5.108 dla v_f = 710 mm/min., oraz 5.109 - 5.111 dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.

5.8. Wnioski z wyników badań

W przypadku narzędzi o zmodyfikowanej krawędzi powierzchni przyłożenia przy długości większej niż stosowany posuw na ostrze, kolejne ostrze zagładza ślady pochodzące ze styku każdego z poprzedzających ostrzy. Jak widać, zachowanie się płytek ze zmodyfikowanymi ostrzami nie podlega ogólnym opisom. Należy przyjąć, że tylko jedno ostrze najbardziej wysunięte tworzy chropowatość na powierzchni obrobionej.

Rowkowe ślady zużycia na powierzchni dogładzającej ściśle wpływają na parametry chropowatości głównie *Rz* i *Rmax*.

Wyniki badań chropowatości dla głowicy R245 przy prędkości posuwu v_f = 710 mm/min, widać że wartości przyjętych w badaniach parametrów chropowatość powierzchni wyraźnie zmalała po około 4500 metrach frezowania.

Porównując te wyniki z cyfrowymi obrazami śladów zużycia na ostrzach (tabl. 14; ostrze nr 6; R245; v_f = 710 mm/min), widoczne są zużycia rowkowe. Taki charakter zużycia na powierzchni dogładzającej zarejestrowano dla drogi 4682 metrów.

Dla kolejnej drogi skrawania L_s obrazu cyfrowego zużycie rowkowe na ostrzu jest mniejsze i przybiera postać gładkiego wytarcia na powierzchni ostrza.

Podczas pomiaru bicia czołowego ostrzy uzyskano duże zróżnicowanie w ustawieniu płytek wymiennych w gniazdach głowic frezowych. Dla najbardziej wysuniętej płytki wymiennej w głowicy frezowej wykonano modyfikację

Z wyników przebiegów zmienności parametrów chropowatości może zauważyć ze wykazują zachowania malejące i rosnące z wydłużeniem drogi skrawania. Dotyczy to dwóch typów płytek wymiennych przed i po modyfikacji geometrii.

Tego typu przebiegi zauważono w opracowaniach wyników dla obróbki jednoostrzowej. Opisano że, obserwuje się określone tendencje wpływu zmian wartości parametrów chropowatości do szerszego pola powierzchni wytarcia na ostrzu. Zdefiniowano trzy przypadki:

Frezując ostrzami o zmodyfikowanej geometrii ostrza typu Wiper z prędkościami posuwu v_f =710 i 1120 mm/min, uzyskano niższe parametry chropowatości powierzchni w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla tych samych ostrzy bez modyfikacji (rys…..). Dla pozostałej prędkości v_f =355 mm/min wyniki były zbliżone.

Dla drugiego typu ostrza z zaokrąglonym narożem r_ε wyniki parametrów chropowatości były zbliżone lub niezmienne dla prędkości posuwu v_f = 355 i 1120 mm/min. Niższe wartości parametrów chropowatości uzyskano wykorzystując ostrza z modyfikacją frezując z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min

Modyfikacja zmniany geometrii ostrza wykonana została na powierzchni dogładzającej i pomocniczej powierzchni przyłożenia płytek wymiennych dla głowic frezowych R245 i R390. Przy stałych parametrach i ustawieniach stanowiska do modyfikacji ostrza, sporym utrudnieniem w wykonaniau modyfikacji było utrzymanie powtarzalności wielkości pola powierzchni wycinka elipsy. W większości zmodyfikowanych ostrzy pole powierzchni było w postaci wycinka elipsy i zależało od dokładności wykonania ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia lub powierzchni dogładzającej.

Powodem takich wyników było brak określnia pierwszego kontaktu krawędzi ostrza z narzędziem ściernym.

Z zarejestrowanych obrazów cyfrowych stwierdzono że modyfikowana powierzchnia posiadała liczne ślady zużycia rowkowego.

Dla dłuższej drogi frezowania zaczęły pojawiać się charakterystyczne wytarcia na ostrzu w postaci pionowych śladów przebiegających pod pewnym kątem w poprzek powierzchni dogładzającej ostrza. Powstałe ślady, były wynikiem oddziaływań nierówności powstałych na ostrzu i powierzchni obrobionej oraz wychodzenia ostrza ze strefy skrawania, które zależą od kąta skrawania Ψ. Im ten kąt będzie większy tym ślady zużycia będą bardziej pochylone.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

6.1. Wnioski naukowe

Frezując ostrzami Wiper o zmodyfikowanej geometrii ostrza z prędkościami posuwu v_f =710; 1120 mm/min, uzyskano niższe parametry chropowatości powierzchni w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla ostrzy Wiper bez modyfikacji (rys. 6.4.2b, 6.4.3b) i (rys. 6.4.5b, 6.4.6b). Dla pozostałej prędkości v_f =355 mm/min wyniki były do siebie zbliżone.

Dla drugiego typu ostrza zbliżone i niezmienne wyniki parametrów chropowatości uzyskano dla prędkości posuwu v_f = 355 i 1120 mm/min. W porównaniu z wynikami uzyskanymi dla ostrzy z klasycznym promieniem zaokrąglenia r_ε, uzyskano znacznie niższe wyniki parametrów chropowatości wykorzystując ostrza z modyfikacją frezując z prędkością posuwu v_f = 710 mm/min (rys. 6.4.11).

Opracowano model matematyczny skrócenia ostrza KE, który jest uniwersalny bo może być zastosowany do obliczeń dla różnych geometrii ostrzy.

W większości zmodyfikowanych ostrzy, pole powierzchni było w postaci wycinka elipsy i zależało od dokładności wykonania ostrza na pomocniczej powierzchni przyłożenia lub powierzchni dogładzającej.

Z zarejestrowanych obrazów cyfrowych stwierdzono że modyfikowana powierzchnia posiadała liczne ślady zużycia rowkowego.

Pozyskanie cyfrowej reprezentacji powierzchni obrobionych oraz śladów wytarcia na narożu ostrzy pozwoliło na ich porównania. W konsekwencji na zarejestrowanych obrazach ujawniono liczbę ostrzy aktywnie pracujących w określonym czasie skrawania, które pozostawiają swój ślad na powierzchni obrobionej i jest informacją o stanie zużycia każdego z ostrzy oddzielnie po kolejnych obrotach głowicy.

Wyniki badań uzyskane z wykorzystaniem ostrzy bez modyfikacji geometrii dowiodły, że gdy ostrze osiągnie odpowiednią (jaką?) wartość zużycia to parametry chropowatości maleją. Założono, że jest możliwość wykonania " sztucznego" zużycia na ostrzu z wykorzystaniem stanowiska do modyfikacji.
Zużycie naroży ostrzy nie ma takiego wpływu na strukturę geometryczną powierzchni obrobionej aby wykorzystać jej wskaźniki dla monitorowania aktywnego procesu obróbki.

6.2. Wnioski utylitarne

Wykonano moduł do stanowiska, który pozwolił na wykonanie zmiany geometrii ostrza w głowicy frezowej. Opracowano technologie i instrukcje do wykonania zmiany geometrii ostrza.

Z powodzeniem wszystkie podzespoły zostały zamontowane na frezarce pionowej i wykonano modyfikację ostrza.

Do dalszych prac badawczych będzie opracowanie metody i sterowania precyzyjnym dosuwem narzędzia ściernego w stanowisku do modyfikacji ostrza.

Monitorowanie śladów zużycia na narożach ostrzy ogranicza koszty i bezzasadne wymiany ostrzy zużytych.

BIBLIOGRAFIA

[ALA 95-1] Alauddin M., El Baradie M.A., Hashmi M.S.J.: Tool-life testing in the end milling of Inconel 718. Journal of Materials Processing Technology 55, 321-330, 1995.

[ALA 95-2] Alauddin M., El Baradie M.A., Hashmi M.S.J.: Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling. Journal of Materials Processing Technology 55, 123-127, 1995.

[AL-K 07] Al-Kindi G. A., Shirinzadeh B.: An evaluation of surface roughness parameters measurement using vision-based data. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 697–708, 2007.

[ASL 05] Aslan E.: Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC). Materials and Design 26, 21–27, 2005.

[BAE 01] Bake D. K., Ko T. J., Kim H. S.: Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, s. 451–462, 2001

[BEL 00] Belloy P., Foucard E.: Roughness and materials in concurrent engineering systems. Computational Materials Science 19, 166-169, 2000

[BEL 01] Bellosi A., Monteverde F., Calzavarini R., Zancolo C.: Factors influencing the milling performances of Ti(C,N)-based tools against carbon steel. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 19, 191-202, 2001.

[BEN 02] Benardos P.G., Vosniakos G.C.: Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18, 343–354, 2002.

[BEN 03] Benardos P.G., Vosniakos G.C. Predicting surface roughness in machining: a review. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 833–844, 2003.

[BER 10] Bernat A.: Ocena cech stereometrycznych powierzchni narzędzi ściernych na podstawie danych, zawartych w obrazach tych powierzchni. Rozprawa doktorska, Katedra Mechaniki Precyzyjnej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska, 2010.

[BRE 04] Brezocnik M., Kovacic M., Ficko M. Prediction of surface roughness with genetic programming. Journal of Materials Processing Technology 157–158, 28–36, 2004.

[BOM 04] Bombiński S., Jemielniak K.: Assessment of Signal Feature Applicability for Tool Wear Monitoring. The VIIth International Conference on Monitoring And Automatic Supervision in Manufacturing, AC`04, 19 – 21, Zakopane, Poland, 2004.

[CAM 05] Camuscu N, Aslan E.: A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel. Journal of Materials Processing Technology 170, 121–126, 2005.

[CHA 06] Chandrasekaran H., M´Saoubi R.: Improved machinability in hard milling and strategies for steel development. Annals of the CIRP Vol.55/1, 2006.

[CIC 06] Cichosz P.: Narzędzia skrawające. WNT, Warszawa, 2006.

[CIE 97] Cieloszyk J., Sobkowiak E.: Pomiary stanu geometrycznego powierzchni frezowanej z dużymi posuwami. VII Konferencja Naukowo – Techniczna, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn, Mechanika 63, Kielce 1997.

[COK 96] Coker S. A., Shin Y. C.: In-process control of surface roughness due to tool wear using a new ultrasonic system. International journal of machine tools & manufacture, vol. 36, no. 3, pp. 411-422, 1996.

[COL 07] Colak O., Kurbanoglu C., Kayacan M. C.: Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. Materials and Design 28, 657–666, 2007.

[CUT 05] Cutting Tools: Narzędzia skrawające, WIDIA, Kennametal, 2005

[DĄB 01] Dąbrowski L., Marciniak M., Nowicki B.: Obróbka skrawaniem, ścierna i erozyjna – Laboratorium. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2001.

[D'ER 97] D'Errico G.E., Bugliosi S., Cuppini D., Guglielmi E.: A study of cermets' wear behaviour. Wear 203-204, 242-246, 1997.

[DES 02] Destefani J.: Cutting tool 101 materials. Manufacturing Engineering, September, 2002.

[DĘB 90] Dębiński B., Storch B.: Zapis stereometrii obrobionej powierzchni. Sympozjum „Makro i Mikro Geometria Powierzchni", Gdańsk, 1990.

[DIN 99] Diniz A. E., Filho J. C. Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. Wear 232, 67–75, 1999.

[DMO 80] Dmochowski J., Uzarowicz A.: Obróbka skrawaniem i obrabiarki. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1980.

[DRA 04] Dransfeld S., Sørby K., Johansen V.: Tool condition monitoring in side milling of nickel-based super alloy VIIth Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing, Poland, 2004.

[FIL 00] Filipowski R., Marciniak M,: Techniki obróbki mechanicznej i erozyjnej, Politechnika Warszawska, 2000.

[FIL 02] Filo C.J., Diniz E.A.: Influence of cutting conditions on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 2002.

[FRA 04] Franco P., Estrems M., Faura F.: Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44, s. 1555–1565, 2004.

[FRA 08] Franco P., Estrems M., Faura F.: A study of back cutting surface finish from tool errors and machine tool deviations during face milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, 112–123, 2008

[FRE 04] Frezowanie: Płytki wieloostrzowe i narzędzia składane, Baildonit, Katowice, 2004/2005.

[GAN 06] Gangopadhyay A., Barber G., Zhao H.: Tool wear reduction through an externally applied electric current. Wear 260, 549–553, 2006.

[GAW 98] Gawlik J., Karbowski K.: Matematyczne modelowanie procesu zużycia narzędzi skrawających. Nadzorowanie stanu narzędzi. Monografia 231, Kraków, 1998.

[GHA 04] Ghani J.A., Choudhury I.A., Masjuki H.H. Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications. Journal of Materials Processing Technology 153–154, 1067–1073, 2004.

[GHO 07] Ghosh N., Ravi Y.B., Patra A., Mukhopadhyay S., Paul S., Mohanty A.R., Chattopadhyay A.B.: Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion Mechanical Systems and Signal Processing 21, 466–479, 2007

[GÓR 83] Górecka R., Polański Z.: Metrologia warstwy wierzchniej. Warszawa. WNT, 1983.

[GÓR 99] Górski E.: Poradnik frezera. WNT, Warszawa, 1999.

[GRZ 98] Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów metalowych. WNT, Warszawa, 1998.

[GUJ 99] Gu J., Barber G, Tung S, Gu N. J.: Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts, Wear 225–229, 273–284, 1999

[HAM 04] Hamed A.M., El-Ghandoor H., El-Diasty F., Saudy M.: Analysis of speckle images to assess surface roughness. Optics & Laser Technology 36, 249 – 253, 2004.

[HUA 99] Huang P.T., Chen J. C., Chou C. Y.: A Statistical Approach in Detecting Tool Breakage in End Milling Operations. Journal of Industrial Technology, Volume 15, Number 3, 1999.

[JAN 06] Jankowska E.: Badania analityczne i doświadczalne istotności oraz współzależności parametrów struktur geometrycznych powierzchni. Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, 2006.

[JAW 01] Jawaid A., Koksal S., Sharif S. Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy. Journal of Materials Processing Technology 116, 2-9, 2001.

[JEM 98] Jemielniak K., Przemysłowe układy diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania, Mechanik, nr 11, 1998.

[JEM 02] Jemielniak K.: Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2002.

[JEM 04] Jemielniak K., Obróbka skrawaniem. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.

[KAC 70] Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej. WNT, Warszawa, 1970.

[KAC 86] Kaczmarek J., Klimczak T.: Dwu- i trójwymiarowa charakterystyka nierówności powierzchni. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Polska Akademia Nauk. Komitet Budowy Maszyn. Z. 1 (65), 1986.

[KAC 94] 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, 1994.

[KAC 01] Kaczmarek J.: O zwrotach myślenia w inżynierii wytwarzania elementów maszyn. Poznań – Kraków, Naukowe Podstawy Inżynierii Budowy Maszyn, 2001.

[KAN 05] Kang M. C., Kim J. S., Kim K. H.: Fractal dimension analysis of machined surface depending on coated tool wear. Surface & Coatings Technology 193, 259– 265, 2005.

[KAN 04] Kang M. C., Kim J. S., Kim K. H.: Quality evaluation of coating tool by indirect measurement of edge surface roughness. Surface and Coatings Technology 177 –178, 765–769, 2004.

[KAP 08] Kapłonek W., **Żurawski Ł.**: Ocena mikronierówności powierzchni frezowanych z zastosowaniem optycznych metod pomiarowych i komputerowej analizy obrazu. Advances in Materials Sciences, Volume 8, Number 2, Warsaw, 2008.

[KAP 11] Kapłonek W., **Żurawski Ł.**: Ocena geometrii narzędzi skrawających z wykorzystaniem stołowej współrzędnościowej maszyny pomiarowej Werth Video-Check®-IP 250. Pomiar-Automatyka-Kontrola, vol. 57, nr 9, 2011.

[KAR 74] Karpiński T., Kacalak W.: Podstawy teoretyczne obróbki wiórowej ściernej i erozyjnej cz. I. Obróbka wiórowa. Wyższa Szkoła Inżynierska, Koszalin, 1974.

[KAT 09] Katalog 8010: Toczenie, Kennametal, 2009.

[KAW 09] Kawalec M, Rybicki M.: Struktura geometryczna powierzchni po frezowaniu czołowym zahartowanej stali. Mechanik, nr 10, 2009.

[KIS 05] Kishawy H.A., Dumitrescu M., Ng E.G., Elbestawi M.A.: Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 219–227, 2005.

[KOS 96] Kosmol J.: Monitorowanie ostrza skrawającego. Metody konwencjonalne i sieci neuronowe, WNT, Warszawa, 1996.

[KOS 04] Koshy P., Dumitrescu P., Ziada Y.: Novel methods for rapid assessment of tool performance in milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 1599–1605, 2004.

[KOZ 08] Koziarski A., Styczyński A., Kołodziej W., Warenczak M.: Wybrane problemy dokładności wykonania gniazd na płytki wymienne w narzędziach składanych. Obróbka skrawaniem 2 – Innowacje. Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, 2008.

[KUK 94] Kukiełka L.: Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Koszalin, 1994.

[KUK 02] Kukiełka L.: Podstawy badań inżynierskich. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002.

[KUM 05] Kumar R., Kulashekar P., Dhanasekar B., Ramamoorthy B.:Application of digital image magnification for surface roughness evaluation using machine vision. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 228–234, 2005.

[KUN 69] Kunstetter S.: Narzędzia skrawające do metali – Konstrukcja. WNT, Warszawa, 1969.

[LAN 01] Lanzetta M.: A new flexible high-resolution vision sensor for tool condition monitoring. Journal of Materials Processing Technology 119, 73-82, 2001.

[LAN 01-1] Landers R.G., Ulsoy A.G.: Supervisory Control of a Face Milling Operation in Different Manufacturing Environments. Transactions on Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 3, No. 1., pp1-9., 2001.

[LAT 06] Latoś H.: Patent nr P-380548 PL, Ostrze skrawające do obróbki płaszczyzn, B23B 27/08.

[LAT 07] Latoś H.: Monolityczne ostrza skojarzone do skośnego skrawania. Obróbka Skrawaniem 1 – Wysoka Produktywność, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007.

[LAT 08] Latoś H, Rozwadowski W, Polasik R.: Toczenie Żelaza ARMCO ostrzem skojarzonym do skośnego skrawania. Obróbka Skrawaniem 2 – Innowacje. Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, 2008.

[LAT 09] Latoś H, Rozwadowski W.: Parametry chropowatości powierzchni ukształtowanej skośnym skojarzonym skrawaniem. Obróbka Skrawaniem 3 – Zaawansowana Technika, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2009.

[LAT 10] Latoś H, Rozwadowski W.: Toczenie kompozytu na osnowie stopu AL ostrzami specjalnymi do skrawania skośnego. Obróbka Skrawaniem 4 – Współczesne Problemy. Prace poligraficzno-wydawnicze agencja „MAGA", Łódź, 2010.

[LI 04] Li X.P., Li H.Z.: Theoretical modelling of cutting forces in helical end milling with cutter runout . International Journal of Mechanical Sciences 46, 1399–1414, 2004.

[LI 06] Li H.Z., Zeng H., Chen X.Q.: An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts. Journal of Materials Processing Technology 180, 296–304, 2006.

[LIC 00] Li C. J., Tzeng T.C.: Multimilling-insert wear assessment using non-linear virtual sensor, time - requency distribution and neural networks. Mechanical Systems and Signal Processing 14(6), 945 –957, 2000.

[LIN 98] Lin T-R.: Reliability and failure of face-milling tools when cutting stainless steel. Journal of Materials Processing Technology 79, 41–46, 1998.

[LIU 03] Liu K., Li X.P., Rahman M., Liu X.D.: CBN tool wear in ductile cutting of tungsten carbide. Wear 255, 1344–1351, 2003

[LIU 05] Liu N., Han C., Yang H., Xu Y., Shi M., Chao S., Xie F.: The milling performances of TiC-based cermet tools with TiN nanopowders addition against normalized medium carbon steel AISI1045. Wear 258, 1688–1695, 2005

[LO 03] Lo S. P.: An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling. Journal of Materials Processing Technology 142, 665–675, 2003.

[LOP 00] Lopez de lacalle L.N., Perez J., Llorente J.I., Sanchez J.A.: Advanced cutting conditions forthe milling of aeronautical alloys. Journal of Materials Processing Technology 100, 1-11, 2000.

[ŁUK 02] Łukianowicz Cz.: Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła. VII Posiedzenie Komitetu Budowy Maszyn PAN. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, 30, 333 – 335, 2002.

[ŁUK 01] Łukianowicz Cz.: Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła. Monografia Wydziału Mechanicznego, nr 85, Koszalin, 2001.

[MAK 76] Makarov A.D.: Optimizacjia processov rezanija. Masinostroenie, Moskva, 1976.

[MIK 04] Miko E.: Konstytuowanie mikronierówności powierzchni metalowych obrobionych narzędziami o zdefiniowanej stereometrii ostrzy. Monografie, Studia, Kielce, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Rozprawy nr 46, 2004.

[MIL 06] Milling Catalog 6050 – METRIC, Technical Data. Kennametal, 2006

[MEL 91] Melder B., Darlewski J.: Narzędzia skrawające w zautomatyzowanej produkcji. WNT, Warszawa, 1991.

[NAR 01] Narzędzia skrawające do metali. Narzędzia obrotowe. Sandvik, Szwecja, 2001.

[NAR 09] Narzędzia skrawające. Katalog główny. Sandvik, Szwecja, 2009.

[NOW 91] Nowicki B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni. WNT, Warszawa, 1991.

[POR 91] Poradnik inżyniera-Obróbka skrawaniem. WNT, Tom 1, Warszawa, 1991.

[OCZ 08] Oczoś K.E., Liubimov V. „Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D. Mechanik, nr 3, 2008

[OLS 08] Olszak W.: Obróbka skrawaniem. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 2008.

[OZC 06] Ozcelik B., Bayramoglu M.: The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, 1395–1402, 2006.

[PAW 04] Pawlus P.: Topografia powierzchni – pomiary, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.

[PEI 04] Peigne G., Paris H., Brissaud D., Gouskov A. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 1133–1142, 2004

[PFE 00] Pfeifer T., Wiegers L.: Reliable tool wear monitoring by optimized image and illumination control in machine vision. Measurement 28 (2000) 209–218

[PRI 99] Prickett P.W., Johns C. An overview of approaches to end milling tool monitoring. International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, 105–122, 1999.

[PRI 07] Priya P., Ramamoorthy B.:The in.uence of component inclination on surface finish evaluation using digital image processing. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 570–579, 2007.

[RAH 02] Rahman M., Senthil Kumar A., Salam M.U.: Experimental evaluation on the effect of minmal quantities of lubricant in milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, 539–547, 2002.

[REI 05] Reiner J.: Systemy wizyjne w zapewnieniu jakości wytwarzania. Inżynieria Maszyn, R. 10, z. 3, 2005.

[RIC 04] Richetti A., Machado A. R., Da Silva M.B., Ezugwu E.O., Bonney J.: Influence of the number of inserts for tool life evaluation in face milling of steels. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 695–700, 2004.

[SAS 00] Sastry S., Kapoor S. G., Devor R. E.: Compensation of progressive radial run-out in facemilling by spindle speed variation, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, s. 1121–1139, 2000.

[SCH 06] Schmahling J., Hamprecht F.A., Hoffmann D.M.P.: A three-dimensional measure of surface roughness based on mathematical morphology. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, 1764–1769, 2006.

[SCH 07] Schmitz T. L., Couey J., Marsh E., Mauntler N., Hughes D.: Runout effects in milling: Surface finish, surface location error, and stability. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, s. 841–851, 2007.

[SHA 04] Shao H., Wang H.L., Zhao X.M.: A cutting power model for tool wear monitoring in milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 1503–1509, 2004.

[SEE 00] Seethaler R.J., Yellowley I.: Process control and dynamic process planning. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, 239–257, 2000.

[SOR 03] Sortino M.: Application of statistical filtering for optical detection of tool wear. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 493–497, 2003.

[STO 89] Storch B.: Wzajemne oddziaływanie naroża ostrza i materiału skrawanego. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989

[STO 94] Storch B., Kochaniewicz T.: Pomiary chropowatości powierzchni przedmiotów będących w ruchu za pomocą metody reflektrometrycznej. I Forum Prac Badawczych. Kształtowanie części maszyn przez usuwanie materiału, Koszalin, 1994.

[STO 98] Storch B.: Patent nr PL 173536 B1, Geometria ostrza skrawającego. WUP 03/98.

[STO 99] Storch B.: Modyfikacja geometrii ostrza narzędzi skrawających z przeznaczeniem do obróbki wykańczającej, Konferencja Mechanika 99, Mechanika i Praktyka. T.1, Gdańsk, 1999.

[STO 01] Storch B.: Podstawy obróbki skrawaniem. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001

[STO 06] Storch B. Zjawiska przykrawędziowe i monitorowanie chropowatości powierzchni po obróbce jednoostrzowej. Monografia Wydziału Mechanicznego, nr 124, Koszalin, 2006.

[STO 07] Storch B., Zawada - Tomkiewicz A., Tomkiewicz D., Wierucka I.: Monitorowanie powierzchni obrobionej z wykorzystaniem cyfrowej reprezentacji obrazu. Sprawozdanie szczegółowe z realizacji projektu badawczego 5 T07D 019 24, Politechnika Koszalińska, Projekt badawczy, 2007.

[STO 09] Storch B.: Uogólnienie zjawiska tworzenia nierówności na powierzchni obrobionej podczas toczenia. Obróbka Skrawaniem 3 – Zaawansowana Technika. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytety Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2009.

[STO 10] Storch B., Zawada - Tomkiewicz A., **Żurawski Ł.**: Wspomaganie kształtowania ostrzy narzędzi skrawających systemem wizyjnym. Pomiar-Automatyka-Kontrola, vol. 56, nr 4, 2010.

[SZA 04] Szafarczyk M: Rozwój obróbki skrawaniem. Mechanik nr 2, 2004.

[SZA 06] Szafarczyk M., Chranowski J., Gościniak R.: Nowoczesne metody monitorowania zużycia ostrzy narzędzi. Innowacje w Budowie i Eksploatacji Maszyn, salon MACH – TOOL, Poznań, 2006.

[TAY 07] Taylor F.W.: On the art of cutting metals. Trans. ASME 28, 31, 1907.

[TIA 07] Tian G. Y., Lu R. S., Gledhill D.: Surface measurement using active vision and light scattering. Optics and Lasers in Engineering 45, 131–139, 2007.

[WAN 05] Wang W., Wong Y.S., Hong G.S.: Flank wear measurement by successive image analysis. Computers in Industry 56, 816–830, 2005.

[WAN 06] Wang W.H., Hong G.S., Wong Y.S.: Flank wear measurement by a threshold independent method with sub-pixel accuracy, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, 199–207, 2006.

[WER] Werkzeuge: Dreh-, Frase- Und Bohrwerkzeuge, Tungaloy Corporation

[WIE 03] Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.: Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko. Zakład Poligraficzno – Wydawniczy M-Druk, Poznań, 2003.

[WIL 97] Wilkinson P., Reuben R.L., Jones J.D.C., Barton J.S., Hand D.P., Carolan T.A., Kidd S.R.: Surface finish parameters as diagnostics of tool wear in face milling. Wear 205, 47-54, 1997.

[WYS 98] Wysiecki M.: Nowoczesne materiały narzędziowe. WNT, Warszawa, 1998.

[YEN 04] Yen Y.C., Söhner J., Lilly B., Altan T.: Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis. Journal of Materials Processing Technology 146, 82–91, 2004.

[ZAW 95] Zawada A., Storch B.: Teoretyczny model refleksyjności powierzchni rzeczywistej. Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn. VI Konferencja Naukowo – Techniczna, Rzeszów, 1995.

[ZAW 01] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B.: Classifying the wear of turning tools with neural networks. Journal of Materials Processing Technology Vol.109, No 3, 2001.

[ZAW 07] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B.: Efektywność procesu toczenia ostrzami o zmodyfikowanej geometrii. Obróbka Skrawaniem 1 – Wysoka Produktywność. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007.

[ZAW 08] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B.: Analiza obrazu powierzchni obrobionej w obróbce na sucho ostrzami o modyfikowanej geometrii. Obróbka Skrawaniem 2 – Innowacje. Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, 2008.

[ZAW 09] Zawada-Tomkiewicz A.: Ocena jakości powierzchni po toczeniu ostrzami o zmiennej geometrii. Obróbka Skrawaniem 3 – Zaawansowana Technika. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytety Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2009.

[ZHA 07] Zhang J. Z., Chen J. C., Kirby E. D.Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method Journal of Materials Processing Technology 184, 233–239, 2007.

[ZHE 03] Zheng H.Q., Li X.P., Wong Y.S., Nee A.Y.C., Theoretical modelling and simulation of cutting forces in face milling with cutter runout, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, 1999, s. 2003–2018.

[ZHO 95] Zhou Q., Hong G. S., Rahman M.: A new tool life criterion for tool condition monitoring using a neural network. Engng Applic. Artif. Intell. Vol. 8, No. 5. pp. 579-588, 1995.

[ŻEB 04] Żebrowski H., i inni: Techniki wytwarzania. Obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.

[ŻUR 05] **Żurawski Ł.**: Monitorowanie powierzchni frezowanych głowicą frezarską z płytkami z powierzchnią dogładzającą. VIII. Seminarium Naukowe Studentów i Młodych Inżynierów Mechaników „Postępy w Inżynierii Mechanicznej", Gdańsk, 2005.

[ŻUR 06 - 1] **Żurawski Ł.**: Monitorowanie płytek wymiennych w głowicy frezerskiej. Przegląd Mechaniczny 12 – suplement, 165 – 168, 2006.

[ŻUR 06 - 2] **Żurawski Ł.**: Ocena zużycia ostrzy skrawających pokrytych warstwą TiN w głowicy frezowej. Doktoranci dla Gospodarki. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego, Koszalin, 2006.

[ŻUR 07] **Żurawski Ł.**, Storch B.: Ocena chropowatości powierzchni dla bicia ostrzy głowicy frezowej. Obróbka Skrawaniem 1 – Wysoka Produktywność. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007.

[ŻUR 08] **Żurawski Ł.**, Storch B.: Powierzchnia po frezowaniu na sucho ostrzami do obróbki gładkościowej. Obróbka Skrawaniem 2 – Innowacje. Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, 2008.

[ŻUR 09] **Żurawski Ł.**: Stanowisko do monitorowania zużycia ostrza i chropowatości powierzchni podczas frezowania. Obróbka Skrawaniem 3 – Zaawansowana Technika. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytety Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2009.

[ŻUR 10-1] **Żurawski Ł,** Pałka T: Modelowanie powierzchni obrobionej dla ostrzy typu WIPER w procesie frezowania. Obróbka Skrawaniem 4 – Współczesne Problemy. Prace poligraficzno-wydawnicze agencja „MAGA", Łódź, 2010.

[ŻUR 10-2] **Żurawski Ł.**: Modyfikowanie geometrii ostrza skrawającego w głowicy frezowej z wykorzystaniem luźnego ścierniwa diamentowego. Podstawy i Techniki Obróbki Ściernej. Prace poligraficzno-wydawnicze agencja „MAGA", Łódź, 2010.

NORMY

[PN-ISO 8688-1:1996] Norma międzynarodowa. Badanie trwałości frezów. Arkusz 1:Frezowanie czołowe.

[PN M – 55667-2:1994] Warunki odbioru frezarek wspornikowych -- Badanie dokładności

[PN - EN ISO 4287:1999] Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.

[DIN 4760] Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem.

STRONY INTERNETOWE

[SUN] http://www.sunnen.pl "Obróbka płaszczyzny głowicy i bloku"

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Rozwój materiału narzędziowego na ilość wytworzonych części [CoroKey 2006] 13
Rys. 1.2. Obróbka zwrotnic do samochodów ciężarowych.
a) na obrabiarce realizowana jest obróbka,
b) podczas gdy na obrotowej kołysce można mocować półfabrykaty lub pobierać gotowe elementy.....14
Rys. 1.3. Głowice frezowe z płytkami wymiennymi do obróbki zwrotnic samochodowych..... 14
Rys. 2.1. Teoretyczny przekrój warstwy skrawanej dla toczenia nieswobodnego a) ukośnokątnego, b) prostokątnego.....18
Rys. 2.2. Wskaźniki zużycia ostrza a) wg. PN-ISO 3685, b) propozycja własna..... 19
Rys. 2.3. Typowa krzywa pasma starcia na ostrzu zależna od czasu skrawania według Lorenza [LI 06].....20
Rys. 2.4. Różne postacie przebiegów zużycia w funkcji czasu a), b), c), d), e), f) [GRZ 98], [JEM 02], [JEM 04], [CIC 06].....21
Rys. 2.5. Dynamika elementarnych zjawisk mechanicznych, fizycznych i chemicznych w zależności od stanu termodynamicznego pod wpływem prędkości skrawania według a) Makarova [MAK 76], b) Storcha [STO 09], Jemielniaka [JEM 04]..... 22
Rys. 2.6. Ślady zużycia na powierzchni przyłożenia naroża w 50 - krotnym powiększeniu..... 23
Rys. 2.7. Obraz śladów wytarcia na ostrzu..... 23
Rys. 2.8. Zestawienie śladów wytarcia w rozwinięciu wzdłuż zaokrąglenia naroża ostrza dla różnych czasów skrawania..... 24
Rys. 2.9. Przykładowe zmiany VB_r i parametrów *Rmax* i *Ra*, w funkcji czasu skrawania..... 25
Rys. 2.10. Ślady na a) powierzchni przyłożenia wierzchołka ostrza i b) powierzchni obrobionej..... 25
Rys. 2.11. Model strefy wierzchołka ostrza [STO 89] 26
Rys. 2.12. Składowe teoretycznej nierówności w obszarze zużycia w otoczeniu naroża ostrza.....27
Rys. 2.13. Schematy do obliczenia teoretycznych wysokości nierówności..... 27
Rys. 2.14. Wartość parametru *Ra* i *Rz* chropowatości powierzchni obrobionej w funkcji czasu skrawania..... 28
Rys. 2.15. Złożenie obrazu nierówności na wytarciu na narożu ostrza oraz odpowiednich nierówności na powierzchni obrobionej..... 28
Rys. 2.16. Pomocnicze schematy dla wyznaczenia wysokości nierówności.....29
Rys. 2.17. Czynniki działające na proces frezowania..... 30
Rys. 2.18. Czynniki wpływające na jakość powierzchni obrobionej podczas frezowania.....30
Rys. 2.19. Płytki wymienne z ostrzami a) dwoma i b) ośmioma..... 31
Rys. 2.20. Głowice frezowe z liczbą ostrzy a) 2 i b) 32..... 31
Rys. 2.21. Rozpoczynanie pracy ostrza płytki wymiennej dla a) dodatniego kąta natarcia γ_n, b) ujemnego kąta natarcia γ_n.....32
Rys. 2.22. a) Położenia charakterystycznych punktów ostrza w ruchu głowicy, b) geometria ruchu ostrza..... 33
Rys. 2.23. Rysunek pomocniczy do wyznaczenia kąta styku Ψ z trójkąta $0S_pS_k$ w zależności od średnicy narzędzia wieloostrzowego i szerokości materiału obrabianego..... 34
Rys. 2.24. Modelowa zmiana tworzenia wióra z uwzględnieniem bicia promieniowego [LI 04]..... 36
Rys. 2.25. Zasada promieniowego bicia ostrzy dla czterech różnych ustawień płytek wymiennych w głowicy frezowej [SEE 00]..... 36
Rys. 2.26. Modelowy profil powierzchni obrobionej sześcioma ostrzami po jednym obrocie głowicy frezowej [BAE 01]..... 36
Rys. 2.27. Płytki z powierzchnią dogładzającą stosowane w głowicach frezowych [NAR 01] a)
b) z uwzględnieniem bicia czołowego płytek wymiennych [CIC 06]..... 37
Rys. 2.28. Ustawienie okrągłych płytek wymiennych w głowicy frezowej [FRA 04]..... 38
Rys. 2.29. Model części warstwy skrawanej dla posuwu f_z = 0,15 mm/ostrze.....38
Rys. 2.30. Model części warstwy skrawanej dla posuwu f_z = 0,31 mm/ostrze.....39
Rys. 2.31. Model części warstwy skrawanej dla posuwu f_z = 0,5 mm/ostrze.....39
Rys. 2.32. Cztery grupy elementów w procesie skrawania wpływające na zużycie ostrza [YEN 04].....38
Rys. 2.33. Podział i odmiany zużycia ostrza [STO 01], [CIC 06], [DMO 80].....41
Rys. 2.34. Zużycie a) równomierne i b) nierównomierne powierzchni przyłożenia.....42
Rys. 2.35. Zużycie miejscowe a) powierzchni przyłożenia i b) żłobkowe.....42
Rys. 2.36. Zużycie schodkowe powierzchni natarcia a) i wykruszenie równomierne b).....42
Rys. 2.37. Wykruszenie nierównomierne a) i miejscowe b).....42
Rys. 2.38. Pęknięcia grzebieniowe a) i równoległe b)..... 43
Rys. 2.39. Uszkodzenia katastroficzne a) i złuszczenie b).....43
Rys. 2.40. Odkształcenie plastyczne a),b).....43
Rys. 2.41. Starcie na głównej powierzchni przyłożenia.....44
Rys. 2.42. Zużycie na powierzchni natarcia w formie krateru.....44
Rys. 2.43. Narost materiału obrabianego na ostrzu.....44
Rys. 2.44. Pęknięcia cieplne.....44
Rys. 2.45. Wykruszenia na narożu ostrza..... 44
Rys. 2.46. Zużycie wrębowe..... 44
Rys. 2.47. Plastyczna deformacja naroża ostrza..... 44
Rys. 2.48. Zużycie krytyczne-złamanie krawędzi skrawającej..... 44
Rys. 2.49. Wskaźniki zużycia ostrza frezarskiego na głównej i pomocniczej powierzchni przyłożenia oraz powierzchni dogładzającej b_s..... 45
Rys. 2.50. Wskaźniki zużycia ostrza frezarskiego na głównej i pomocniczej powierzchni przyłożenia.....47
Rys. 2.51. Kształt nierówności powierzchni po frezowaniu dla odwzorowania liniowego.....49
Rys. 2.52. Modele technologicznej warstwy wierzchniej a) strukturalny, b), c) metrologiczny [NOW 91].....51

Rys. 2.53. Typowy przebieg zmiany parametru chropowatości *Ra* w czasie pracy narzędzia....52
Rys. 2.54. Typowe odchylenia od powierzchni nominalnej [BEN 03], [BEN 02], [COL 07], [ŻEB 04]....54
Rys. 2.55. Pomiar chropowatości powierzchni metodą stykową....55
Rys. 2.56. Kształt końcówki pomiarowej....55
Rys. 2.57. a) Obraz nierówności powierzchni b) i po przeskalowaniu do skali 1: 1....55
Rys. 2.58. Modelowy przykład powierzchni po frezowaniu....56
Rys. 2.59. Przykład zapisu profilu powierzchni po frezowaniu w układzie *3D*....56
Rys. 2.60. Obrazy zużycia ostrza, powierzchni obrobionej po frezowaniu i profilu chropowatości dla a) stali 45, b) mosiądzu M059....58
Rys. 2.61. Schemat stanowiska badawczego do rejestracji cyfrowych obrazów powierzchni frezowanych [STO 09], [KAP 08]....59
Rys. 2.62. Obrazy cyfrowe powierzchni po frezowaniu i reprezentacja rozkładu intensywności światła dla kąta oświetlenia $\alpha_E = 30°$ dla a) stali EN C45, b) mosiądzu EN CW612N....60
Rys. 2.63. Widok ogólny stanowiska pomiarowego [ŻUR 09]....61
Rys. 2.64. Metody monitorowania ostrza....62
Rys. 2.65. Stosowanie monitorowania w wytwarzaniu [SZA 04]....63
Rys. 2.66. Obrazy cyfrowe zużycia ostrza na a) powierzchni przyłożenia [KIS 05], b) powierzchni dogładzającej b_s [ŻUR 06 - 1]....64
Rys. 2.67. Zdefiniowanie podstawowych wskaźników zużycia ostrza na obrazie cyfrowym [WAN 06]....64
Rys. 2.68. Rozwój średniego wytarcia *VB* na powierzchni przyłożenia [JAW 01]....66
Rys. 2.69. Krzywe zużycia ostrzy na powierzchni przyłożenia dla a) dwóch [LIU 05], b) czterech ostrzy w głowicy frezowej [RIC 04]....66
Rys. 4.1. Zależności parametrów chropowatości do prędkości posuwu v_f dla frezowania a) stali C45 i b) mosiądzu VW612N..71
Rys. 4.2. Wymiary głowicy frezowej R245 a) i geometria płytki wymiennej z powierzchnią dogładzającą b_s b) [NAR 09]....74
Rys. 4.3. Wymiary głowicy frezowej R390 a) i geometria płytki wymiennej z zaokrąglonym narożem r_ε b) [NAR 09]....75
Rys. 4.4. Zilustrowanie trzech nakładających się fragmentów obrazów cyfrowych i-tego ostrza....78
Rys. 4.5. Połączenie trzech fragmentów obrazów cyfrowych i-tego ostrza....79
Rys. 4.6. Kadrowanie połączonego obrazu cyfrowego i-tego ostrza....79
Rys. 4.7. Horyzontalne odwrócenie obrazu cyfrowego i-tego ostrza....79
Rys. 4.8. Wizualizacja pięciu fragmentów obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej dla i-tej drogi skrawania L_s....80
Rys. 4.9. Połączenie pięciu fragmentów obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej....80
Rys. 4.10. Kadrowanie połączonych pięciu fragmentów obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej....80
Rys. 4.11. Horyzontalne odwrócenie obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej....81
Rys. 5.1. Schemat ideowy a) i widok ogólny stanowiska pomiarowego do zużycia ostrza b)....83
Rys. 5.2. Schemat ideowy a) i widok ogólny stanowiska pomiarowego do powierzchni obrobionej b)....83
Rys. 5.3. Stanowisko do modyfikacji geometrii ostrza a), b) i widok strefy procesu modyfikacji ostrza c), d)....84
Rys. 5.4. Przykład pomiaru bicia czołowego płytek wymiennych w głowicy frezowej....84
Rys. 5.5. Widok ogólny stanowiska pomiarowego a) płytek wymiennych b),c),g),f) oraz powierzchni obrobionej e),d)....85
Rys. 5.6. Widok ogólny stanowiska do modyfikacji geometrii ostrza....85
Rys. 5.7. Widok ogólny stanowiska do pomiaru bicia czołowego ostrzy w głowicy frezowej....85
Rys. 5.8. Pomiar bicia okresowego przesunięcia a) osiowego, b) promieniowego....86
Rys. 5.9. Wyniki powtarzalność mocowania uchwytu i głowicy frezowej na bicie czołowe płytek wymiennych....87
Rys. 5.10. Wymiary parametrów granicznych w definiowaniu dokładności płytek wymiennych....88
Rys. 5.11. Wielkości geometryczne charakteryzujące wykorzystywane w badaniach płytki wymienne: a) z powierzchnią dogładzającą b_s, b) z zaokrąglonym narożem r_ε....89
Rys. 5.12. Rzeczywiste podstawowe wymiary geometryczne płytki wymiennej a) z powierzchnią dogładzającą b_s, b) z zaokrąglonym narożem r_ε....89
Rys. 5.13. Wyniki pomiarów długości krawędzi dogładzającej b_s dla 8 płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s....90
Rys. 5.14. Wyniki pomiarów czynnej krawędzi skrawającej l_a dla 8 płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s....90
Rys. 5.15. Wyniki pomiarów promienia zaokrąglenia naroża r_ε dla 8 płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s....91
Rys. 5.16. Wyniki pomiarów całkowitej długości płytki wymiennej $l = iC$ dla 8 płytek wymiennych z powierzchnią dogładzającą b_s....91
Rys. 5.17. Wyniki pomiarów czynnej krawędzi skrawającej l_a dla 6 płytek wymiennych z zaokrąglonym narożem r_ε....92
Rys. 5.18. Wyniki pomiarów całkowitej długości płytki wymiennej $l=iC$ dla 6 płytek wymiennych z zaokrąglonym narożem r_ε....92
Rys. 5.19. Wyniki pomiarów promienia zaokrąglenia naroża r_ε, dla 6 płytek wymiennych z zaokrąglonym narożem r_ε....93
Rys. 5.20. Pomiar bicia a) powierzchni dna b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R245....94
Rys. 5.21. Wyniki bicia powierzchni dna gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R245....95
Rys. 5.22. Pomiar bicia a) zewnętrznej powierzchni ustawczej b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R245....95
Rys. 5.23. Wyniki bicia zewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R245....96
Rys. 5.24. Pomiar bicia a) wewnętrznej powierzchni ustawczej b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R245....96
Rys. 5.25. Wyniki bicia wewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R245....97
Rys. 5.26. Pomiar bicia a) powierzchni natarcia płytki podporowej b) w głowicy frezowej R245....97
Rys. 5.27. Wyniki bicia powierzchni natarcia płytki podporowej w głowicy frezowej R245....98
Rys. 5.28. Pomiar bicia czołowego a) na powierzchni dogładzającej b_s płytki wymiennej b) w głowicy frezowej R245....98
Rys. 5.29. Bicie czołowe ostrzy w głowicy frezowej R245....99
Rys. 5.30. Pomiar bicia a) powierzchni dna gniazda b) płytki wymiennej w głowicy frezowej R390....99

Rys. 5.31. Wyniki bicia powierzchni dna gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R390..... 100
Rys. 5.32. Pomiar bicia a) zewnętrznej powierzchni ustawczej b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R390.....100
Rys. 5.33. Wyniki bicia zewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R390..... 101
Rys. 5.34. Pomiar bicia a) wewnętrznej powierzchni ustawczej b) gniazda płytki wymiennej w głowicy frezowej R390.....101
Rys. 5.35. Wyniki bicia wewnętrznej powierzchni ustawczej gniazd płytek wymiennych w głowicy frezowej R390..... 102
Rys. 5.36. Pomiar bicia czołowego a) na narożu płytki wymiennej b) w głowicy frezowej R390..... 102
Rys. 5.37. Bicie czołowe ostrzy w głowicy frezowej R390..... 103
Rys. 5.38. Bicie czołowe płytek wymiennych w głowicy frezowej R245 dla prędkości posuwu a) v_f=355 mm/min., b) v_f=710 mm/min., c) v_f=1120 mm/min.....104
Rys. 5.39. Zużycie ostrza nr 3 po 307 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z= 0,04 mm/ostrze.....107
Rys. 5.40. Zużycie ostrza nr 6 po 1813 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,04 mm/ostrze.....107
Rys. 5.41. Zużycie ostrza nr 2 po 2311 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze.....108
Rys. 5.42. Zużycie ostrza nr 3 po 2311 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze.....108
Rys. 5.43. Zużycie ostrza nr 4 po 7553 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze.....109
Rys. 5.44. Zużycie ostrza nr 2 po 787 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze.....109
Rys. 5.45. Zużycie ostrza nr 1 po 787 metrach drogi frezowania głowicą frezową R245 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze.....110
Rys. 5.46. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min.....111
Rys. 5.47. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min.....112
Rys. 5.48. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min.....113
Rys. 5.49. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 682 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min.....114
Rys. 5.50. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 1189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min.....114
Rys. 5.51. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 1568 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f = 355 mm/min.....115
Rys. 5.52. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 1813 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min.....115
Rys. 5.53. Przebieg zmian parametrów chropowatości powierzchni obrobionej dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu a) v_f=355 mm/min, b) v_f=710 mm/min, c) v_f=1120 mm/min.....116
Rys. 5.54. Obraz cyfrowy powierzchni po 1155 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min.....116
Rys. 5.55. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 3446 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min.....117
Rys. 5.56. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 5320 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min..... 117
Rys. 5.57. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 7553 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min..... 117
Rys. 5.58. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 180 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min.....117
Rys. 5.59. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 503 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min.....118
Rys. 5.60. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 787 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min.....118
Rys. 5.61. Bicie czołowe płytek wymiennych w głowicy frezowej R390 dla prędkości posuwu a) v_f=355 mm/min, b) v_f=710 mm/min, c) v_f=1120 mm/min.....120
Rys. 5.62. Zużycie ostrza nr 7 po 345 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,04 mm/ostrze.....122
Rys. 5.63. Zużycie ostrza nr 1 po 123 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze.....122
Rys. 5.64. Zużycie ostrza nr 5 po 123 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze.....122
Rys. 5.65. Zużycie ostrza nr 7 po 181 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,08 mm/ostrze.....122
Rys. 5.66. Zużycie ostrza nr 1 po 285 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze.....123

Rys. 5.67. Zużycie ostrza nr 3 po 1129 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze....123
Rys. 5.68. Zużycie ostrza nr 7 po 1837 metrach drogi frezowania głowicą frezową R390 z posuwem na ostrze f_z = 0,125 mm/ostrze....123
Rys. 5.69. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min....125
Rys. 5.70. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min....126
Rys. 5.71. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających płytek wymiennych oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min....127
Rys. 5.72. Przebieg zmian parametrów chropowatości powierzchni obrobionej dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu a) v_f=355 mm/min., b) v_f=710 mm/min., c) v_f=1120 mm/min....129
Rys. 5.73. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 180 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min....129
Rys. 5.74. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 345 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=355 mm/min....129
Rys. 5.75. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 123 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=710 mm/min....129
Rys. 5.76. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 181 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuw v_f=710 mm/min....130
Rys. 5.77. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 285 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min....130
Rys. 5.78. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 736 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min....130
Rys. 5.79. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 1837 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390 z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min....130
Rys. 5.80. Geometryczne wyznaczenie zależności skrócenia ostrza *KE* w układzie ostrze – przedmiot obrabiany....132
Rys. 5.81. Widok pomocniczej powierzchni przyłożenia ostrza a) z powierzchnią dogładzającej b_s i b) z zaokrąglonym narożem r_ε po modyfikacji....132
Rys. 5.82. Postać modyfikacji dla płytki z powierzchnią dogładzającą b_s 133
Rys. 5.83. Postać modyfikacji dla płytki z narożem zaokrąglonym r_ε 134
Rys. 5.84. Bicie czołowe płytek wymiennych przed modyfikacją ostrza w głowicy frezowej R245 dla prędkości posuwu a) v_f=355 mm/min., b) v_f=710 mm/min., c) v_f=1120 mm/min....136
Rys. 5.85. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min....144
Rys. 5.86. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min....144
Rys. 5.87. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min....145
Rys. 5.88. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min....145
Rys. 5.89. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 315 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min....146
Rys. 5.90. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 630 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min....146
Rys. 5.91. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 946 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min....146
Rys. 5.92. Przebieg zmian parametrów chropowatości powierzchni obrobionej po modyfikacji ostrza dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu a) v_f=355 mm/min., b) v_f=710 mm/min., c) v_f=1120 mm/min....147
Rys. 5.93. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min....147
Rys. 5.94. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 315 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min....148
Rys. 5.95. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 100 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min....148
Rys. 5.96. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 200 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min....148
Rys. 5.97. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 260 metrach skrawania dla głowicy frezowej R245mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min....148
Rys. 5.98. Bicie czołowe płytek wymiennych przed modyfikacją ostrza w głowicy frezowej R390 dla prędkości posuwu a) v_f=355 mm/min., b) v_f=710 mm/min., c) v_f=1120 mm/min....150

Rys. 5.99. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min 156
Rys. 5.100. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min 157
Rys. 5.101. Wpływ drogi skrawania L_s na a) krzywe zużycia powierzchni dogładzających b_s płytek wymiennych po modyfikacji ostrzy oraz b) ich udział procentowy dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min 158
Rys. 5.102. Przebieg zmian parametrów chropowatości powierzchni obrobionej po modyfikacji ostrza dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu a) v_f=355 mm/min., b) v_f=710 mm/min., c) v_f=1120 mm/min 160
Rys. 5.103. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 126 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min 160
Rys. 5.104. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min 160
Rys. 5.105. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 315 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=355 mm/min 160
Rys. 5.106. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 95 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min 161
Rys. 5.107. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 189 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min 161
Rys. 5.108. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 315 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=710 mm/min 161
Rys. 5.109. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 100 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min 161
Rys. 5.110. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 200 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min 161
Rys. 5.111. Obraz cyfrowy powierzchni obrobionej po 300 metrach skrawania dla głowicy frezowej R390mod z prędkością posuwu v_f=1120 mm/min 162

SPIS TABLIC

Tablica 1. Obrazy cyfrowe powierzchni obrobionych po frezowaniu płytkami wymiennymi R245-12 T3 M-PM 4030……71
Tablica 2. Obrazy cyfrowe zużycia ostrza dla płytek wymiennych R245-12 T3 M-PM 4030……..71
Tablica 3. Obrazy cyfrowe powierzchni obrobionych po frezowaniu płytkami wymiennymi R245-12 T3 E-AL H10……72
Tablica 4. Obrazy cyfrowe zużycia ostrzy płytkami wymiennymi R245-12 T3 E-AL H10…… 72
Tablica 5. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….... 186
Tablica 6. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min……187
Tablica 7. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min…… 188
Tablica 8. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min…… 189
Tablica 9. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min…… 190
Tablica 10. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 191
Tablica 11. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 192
Tablica 12. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 193
Tablica 13. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 194
Tablica 14. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 196
Tablica 15. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 198
Tablica 16. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 200
Tablica 17. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 202
Tablica 18. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 204
Tablica 19. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 206
Tablica 20. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 208
Tablica 21. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 210
Tablica 22. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 211
Tablica 23. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 212
Tablica 24. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 213
Tablica 25. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 214
Tablica 26. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 215
Tablica 27. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 216
Tablica 28. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 217
Tablica 29. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 219
Tablica 30. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 220
Tablica 31. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 221
Tablica 32. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 222
Tablica 33. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 223
Tablica 34. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 224
Tablica 35. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 225
Tablica 36. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min…….. 226
Tablica 37. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 227
Tablica 38. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 228
Tablica 39. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 229
Tablica 40. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 230
Tablica 41. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 231
Tablica 42. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 232
Tablica 43. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 233
Tablica 44. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min…….. 234
Tablica 45. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 235
Tablica 46. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 236
Tablica 47. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 237
Tablica 48. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 238
Tablica 49. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 239
Tablica 50. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 240
Tablica 51. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 241
Tablica 52. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min…… 242
Tablica 53. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 244
Tablica 54. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 245
Tablica 55. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 246
Tablica 56. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 247
Tablica 57. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 248
Tablica 58. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min…….. 138 i 249
Tablica 59. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 250
Tablica 60. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 251
Tablica 61. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 252
Tablica 62. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 253
Tablica 63. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 254

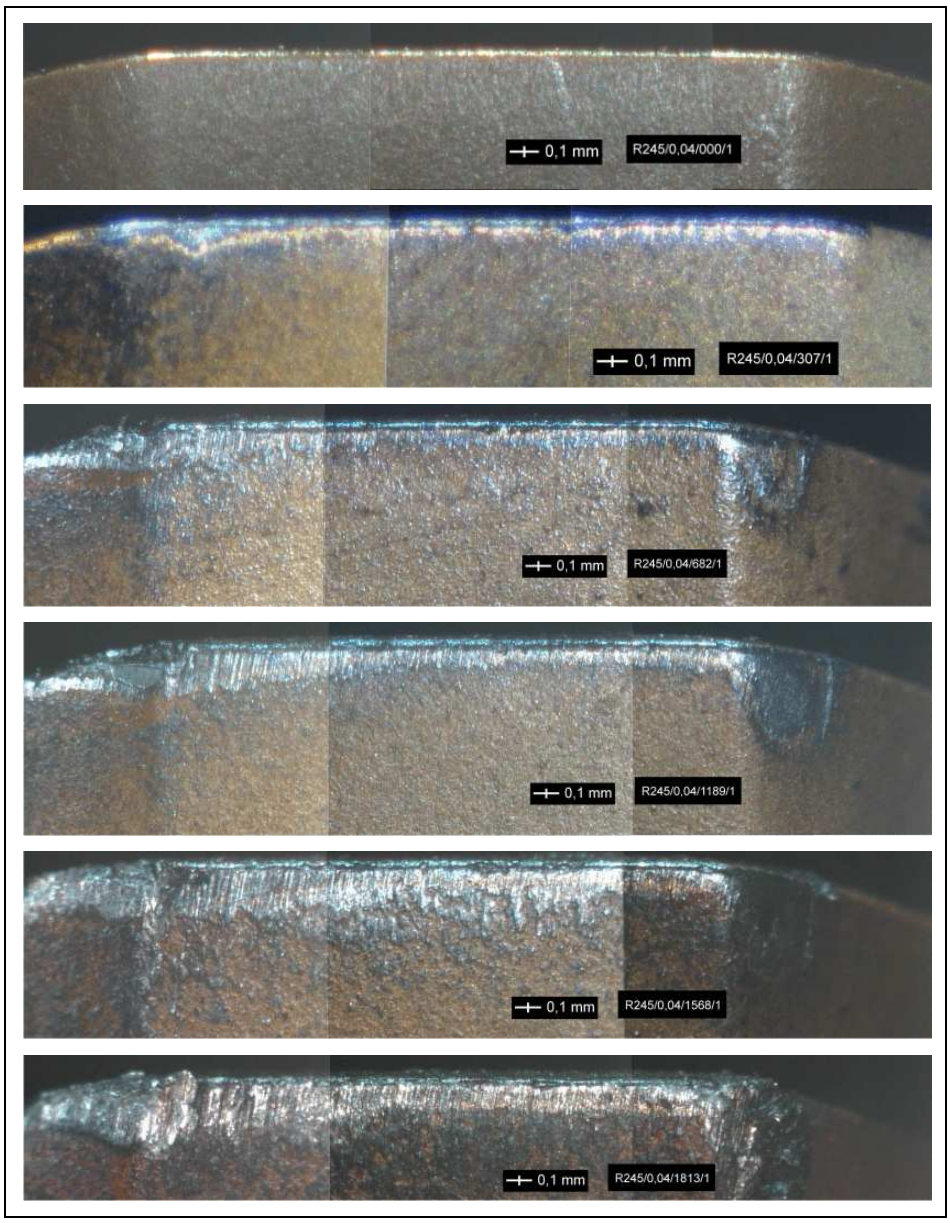
Tablica 64. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 255
Tablica 65. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min…….. 140 i 256
Tablica 66. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 257
Tablica 67. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 258
Tablica 68. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 259
Tablica 69. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 260
Tablica 70. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 261
Tablica 71. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 262
Tablica 72. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 263
Tablica 73. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 264
Tablica 74. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min…… 141 i 265
Tablica 75. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 266
Tablica 76. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 267
Tablica 77. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 269
Tablica 78. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 270
Tablica 79. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 271
Tablica 80. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 272
Tablica 81. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min…….. 152 i 273
Tablica 82. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 274
Tablica 83. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 275
Tablica 84. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 355 mm/min……... 276
Tablica 85. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 277
Tablica 86. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 278
Tablica 87. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 279
Tablica 88. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 280
Tablica 89. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 281
Tablica 90. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 282
Tablica 91. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min…….. 153 i 283
Tablica 92. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 710 mm/min……... 284
Tablica 93. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 285
Tablica 94. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 286
Tablica 95. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 287
Tablica 96. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 288
Tablica 97. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 289
Tablica 98. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 290
Tablica 99. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min……. 291
Tablica 100. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min….. 154 i 292

Załącznik nr 1

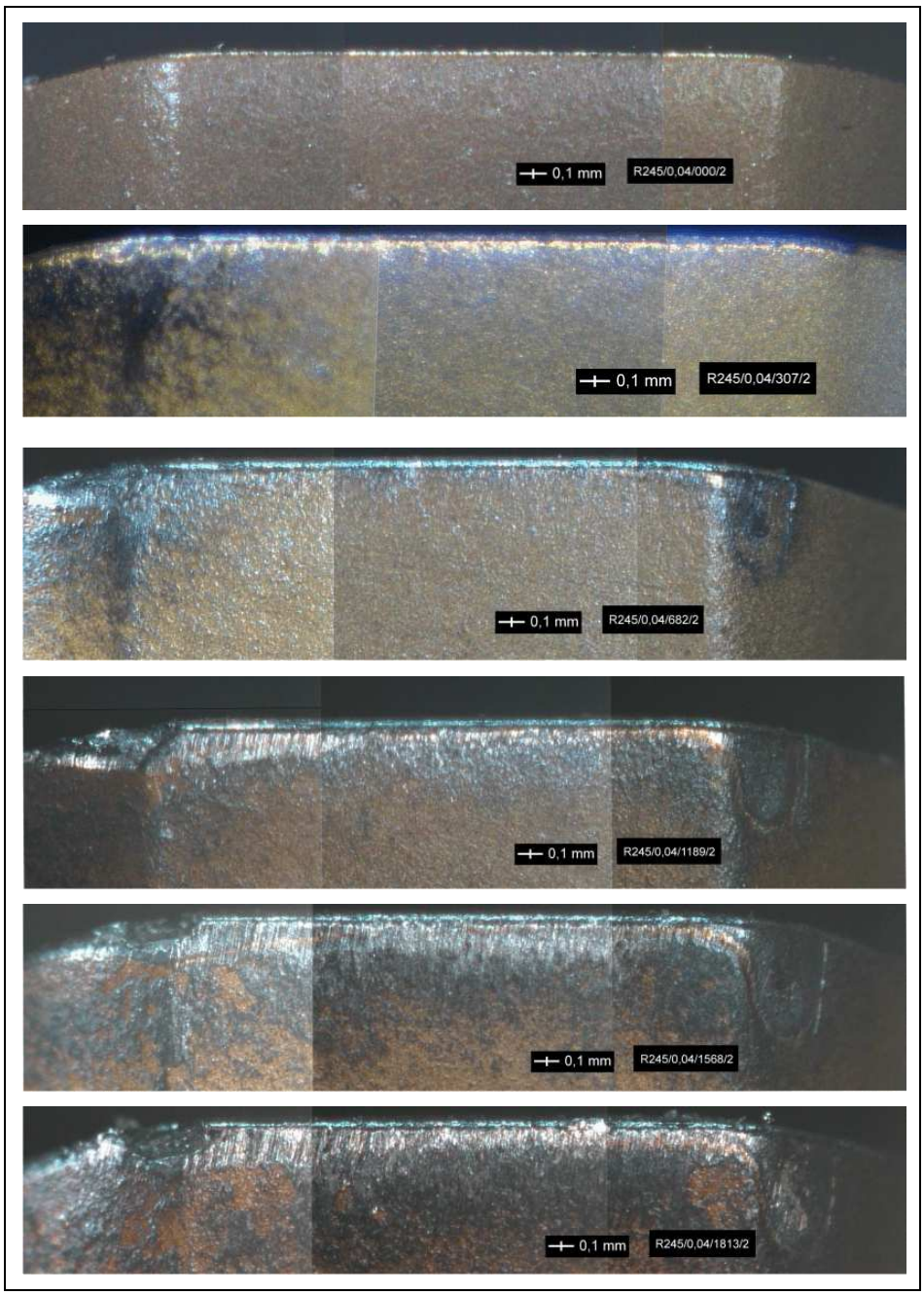
Zużycie ostrzy dla głowicy frezowej R245

Tablice 5 - 28

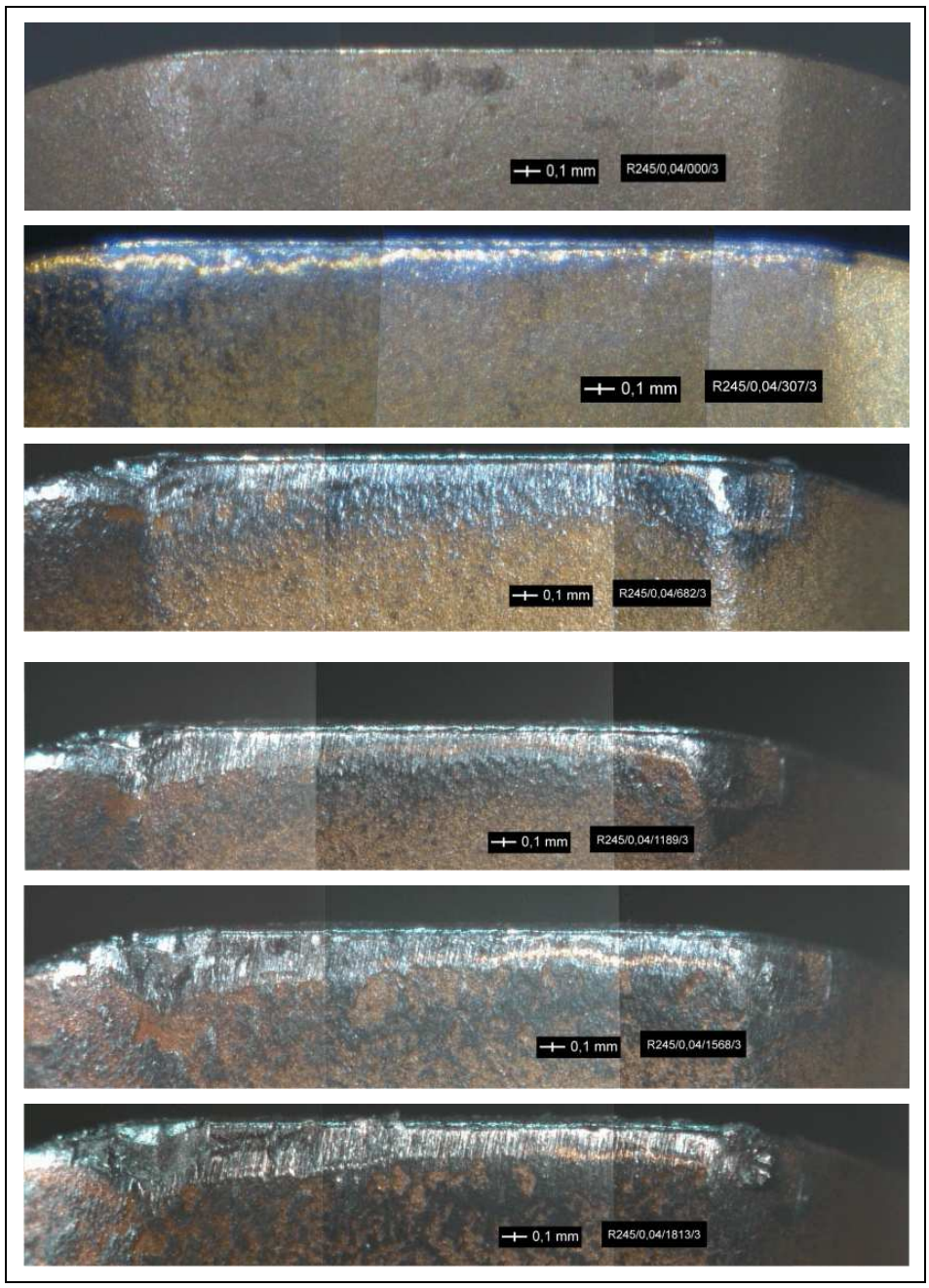
Tablica 5. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



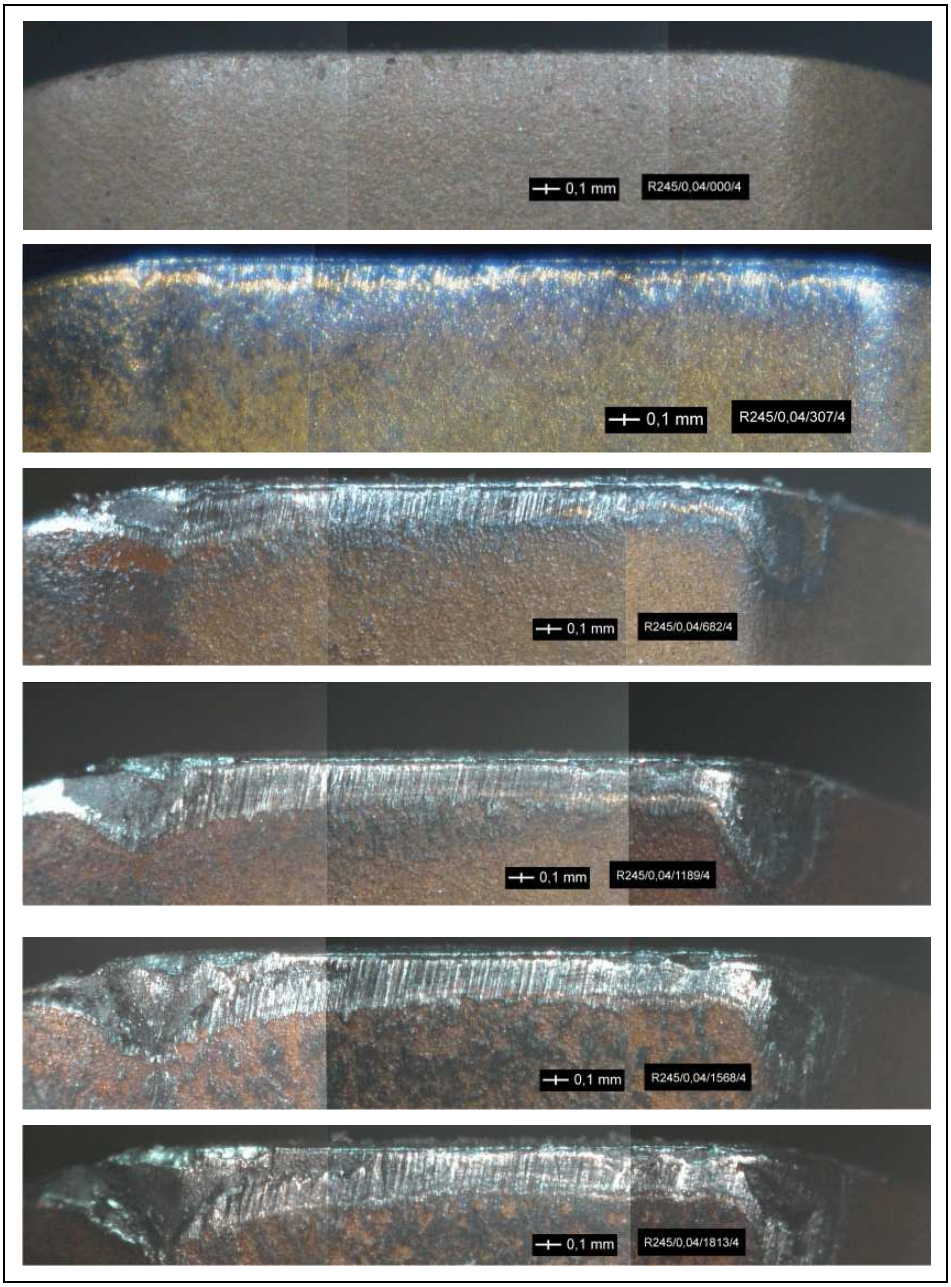
Tablica 6. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



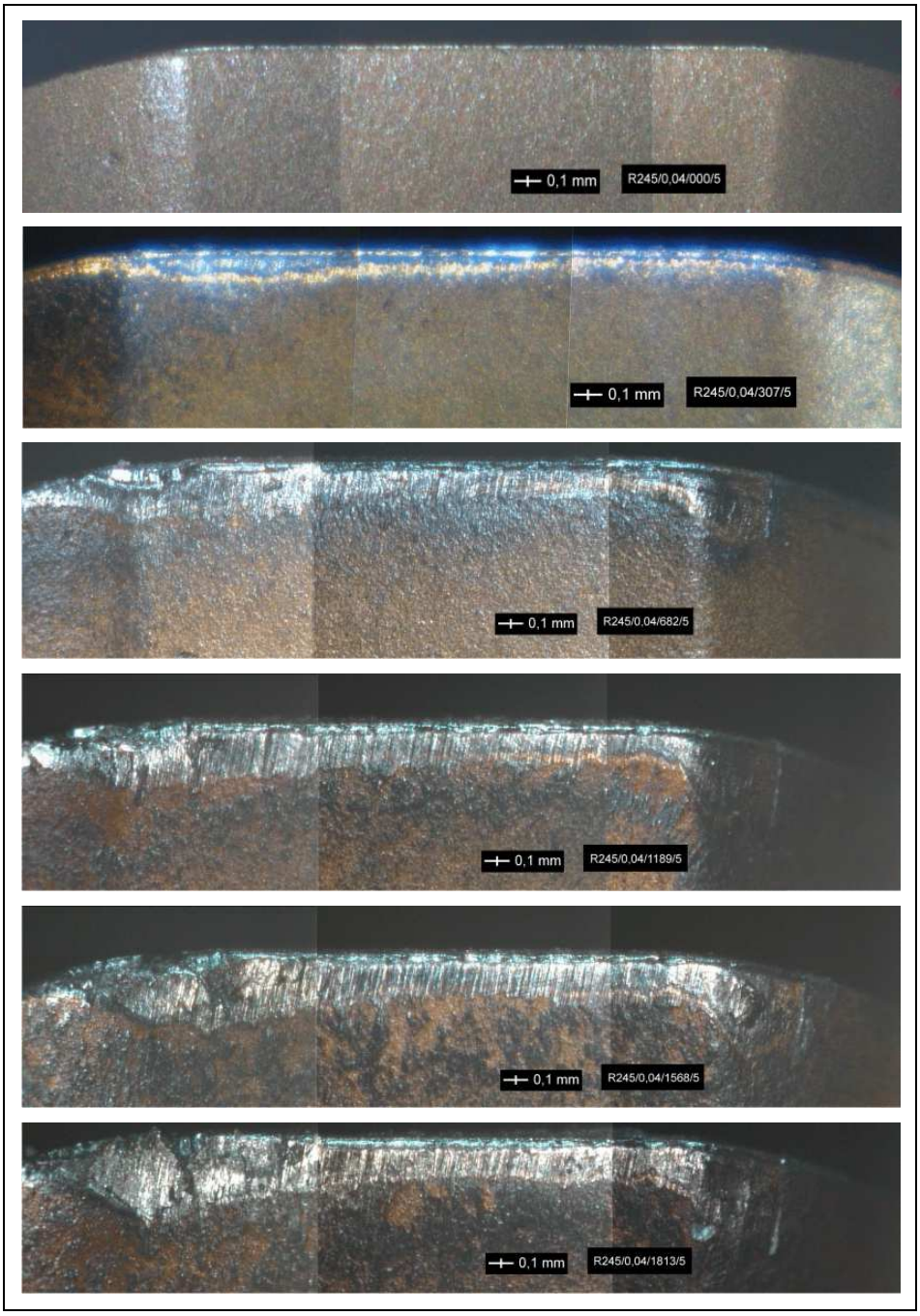
Tablica 7. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



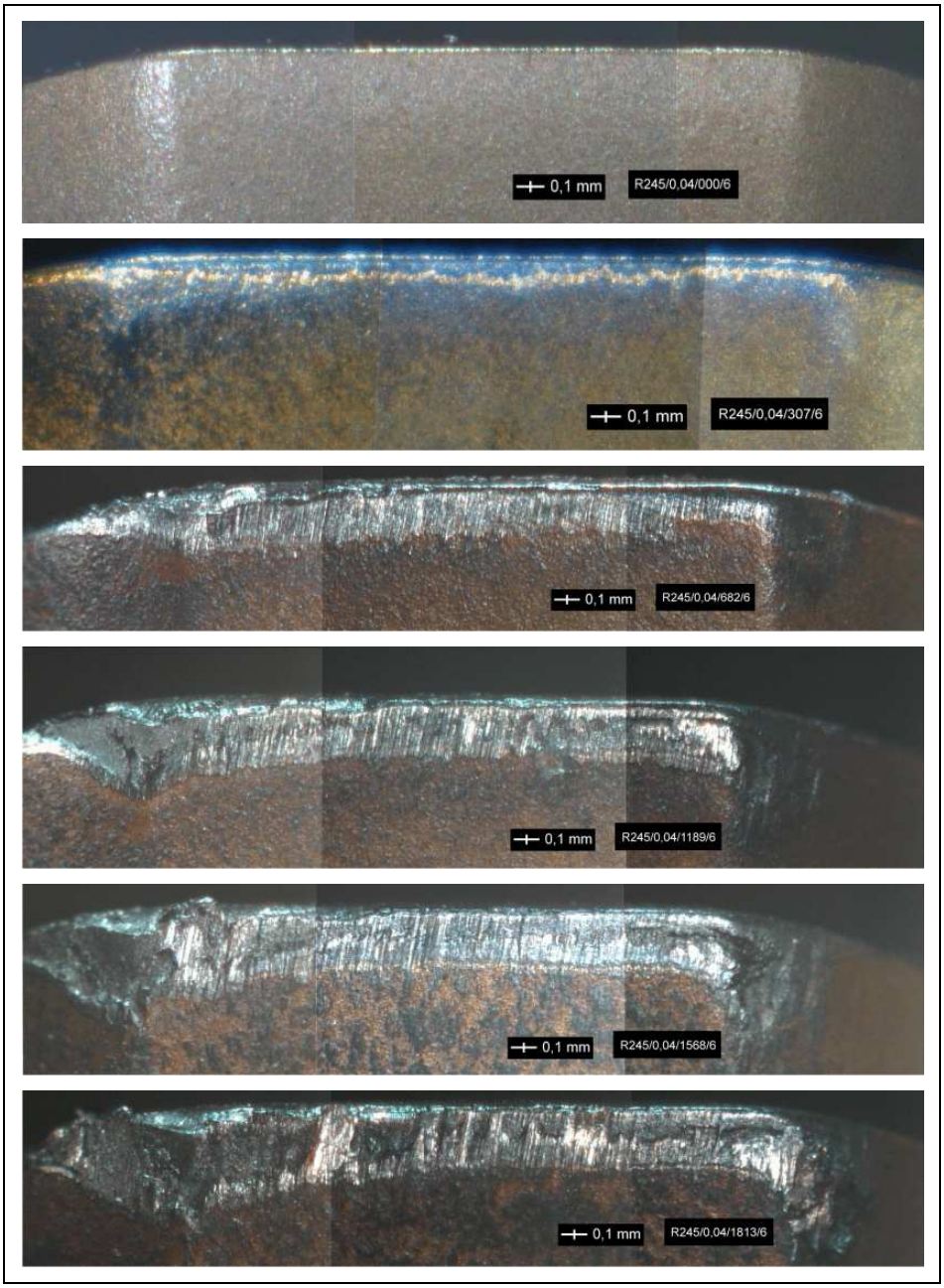
Tablica 8. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



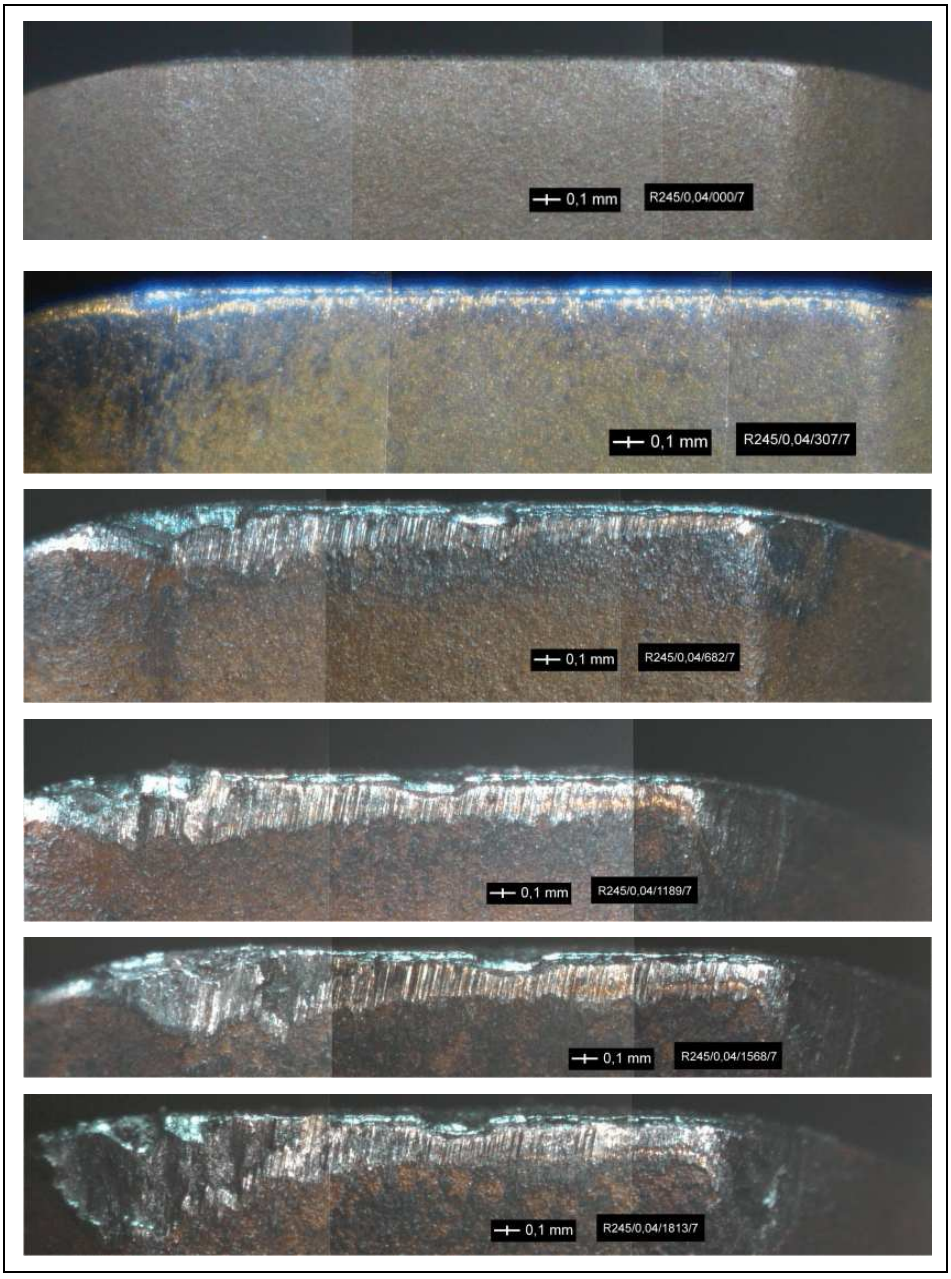
Tablica 9. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



Tablica 10. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min.

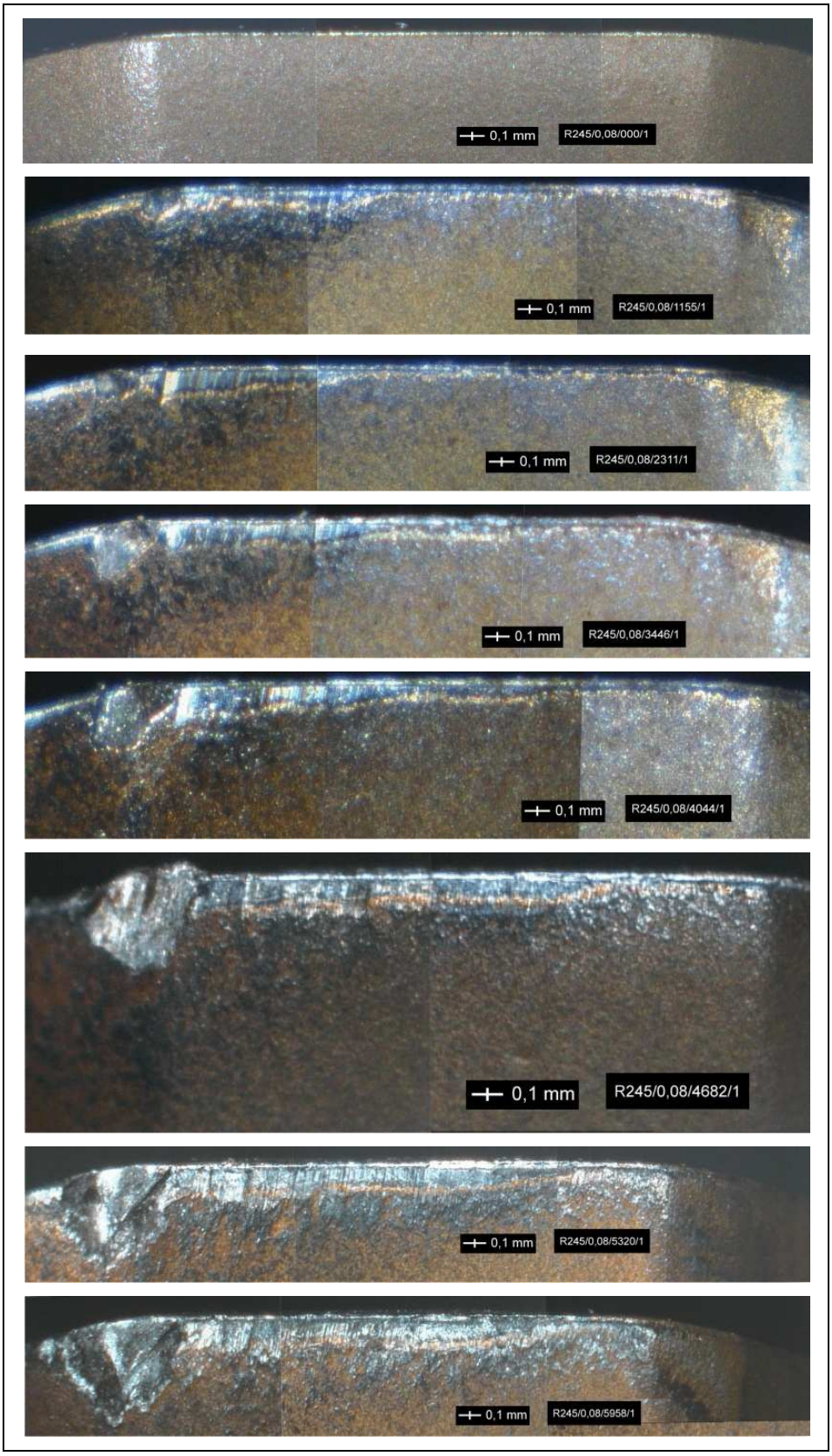


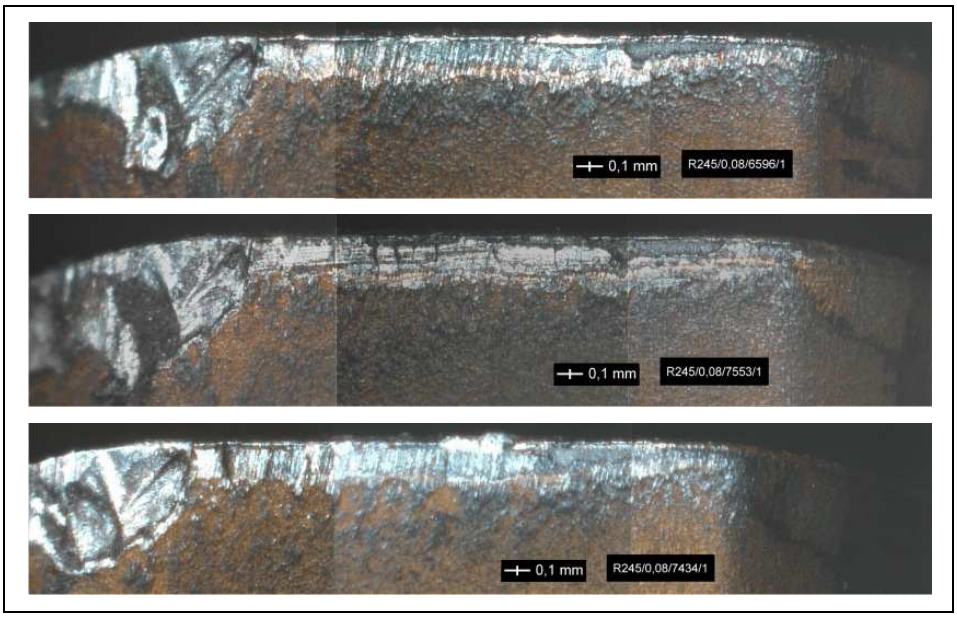
Tablica 11. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



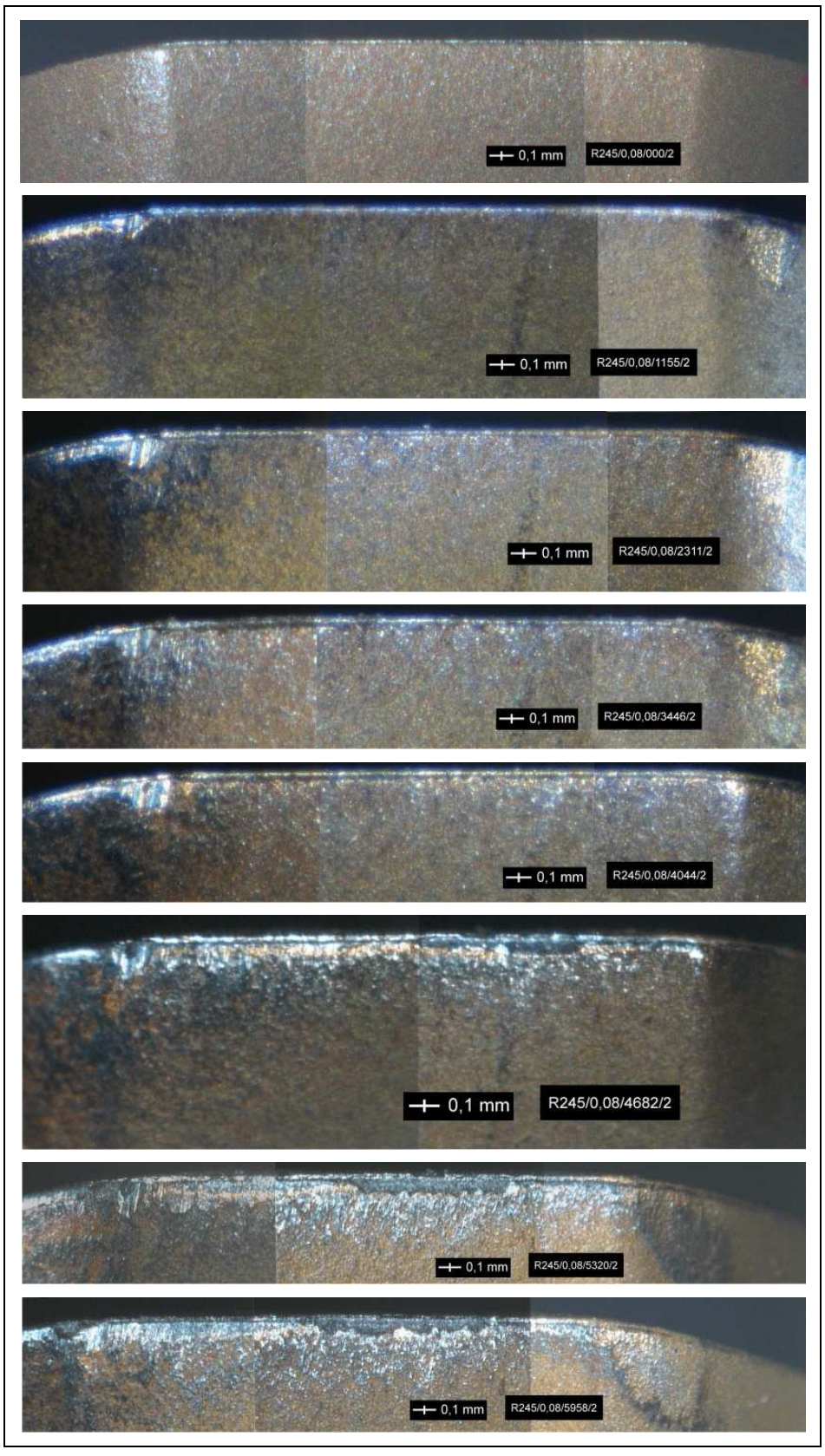
Tablica 12. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 355 mm/min.

Tablica 13. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



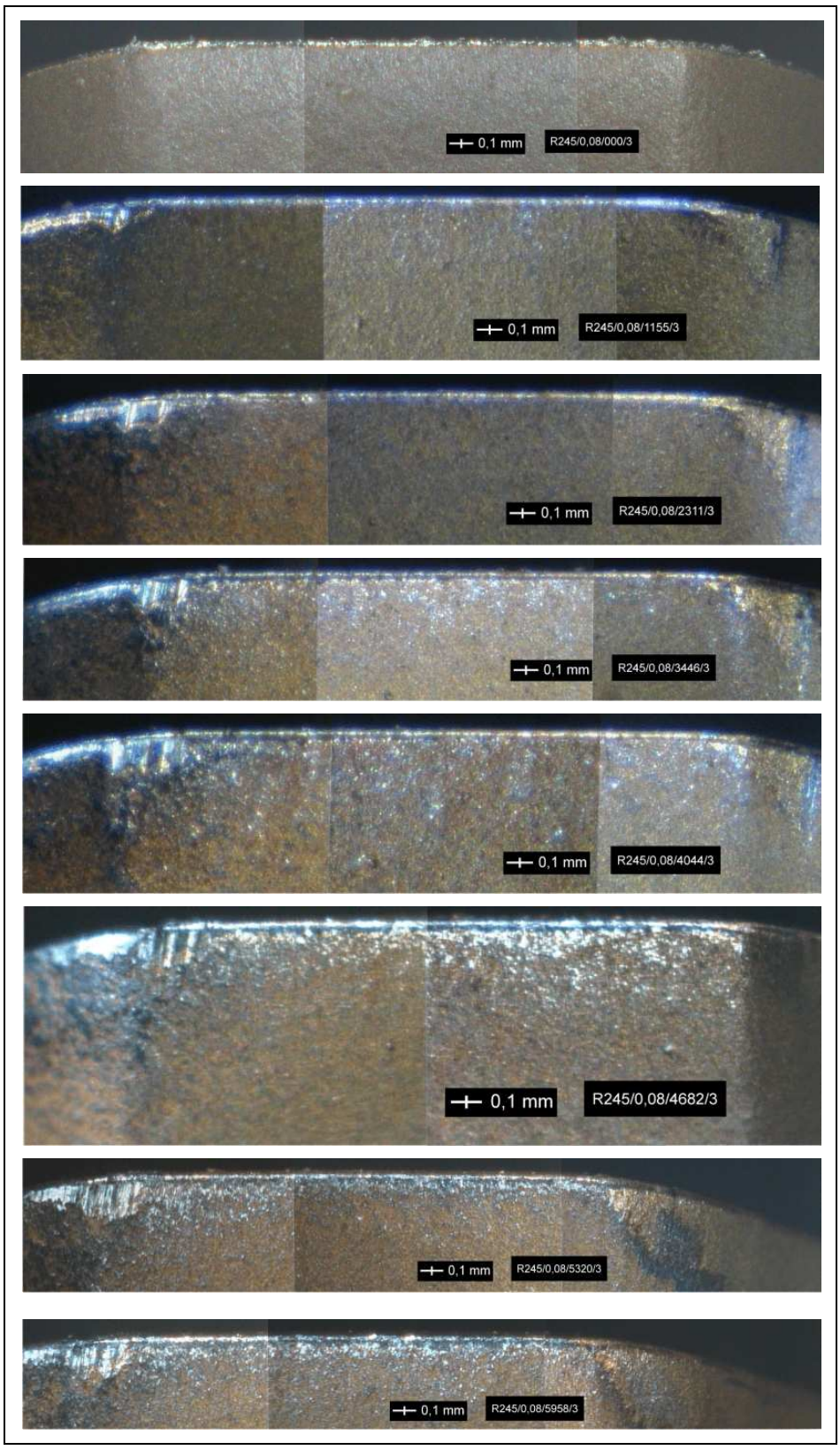

0,1 mm
R245/0.08/6596/1
0,1 mm
R245/0.08/7553/1
0,1 mm
R245/0,08/7434/1

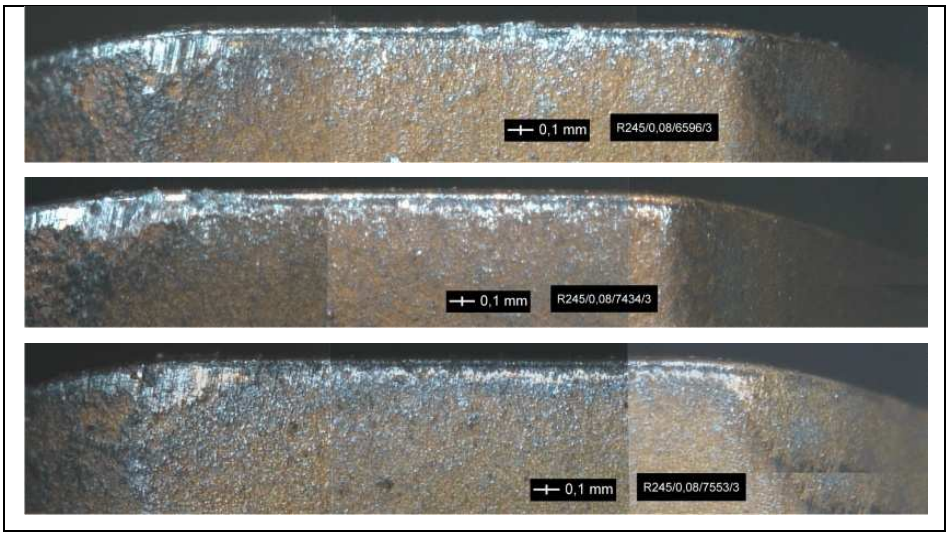
Tablica 14. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



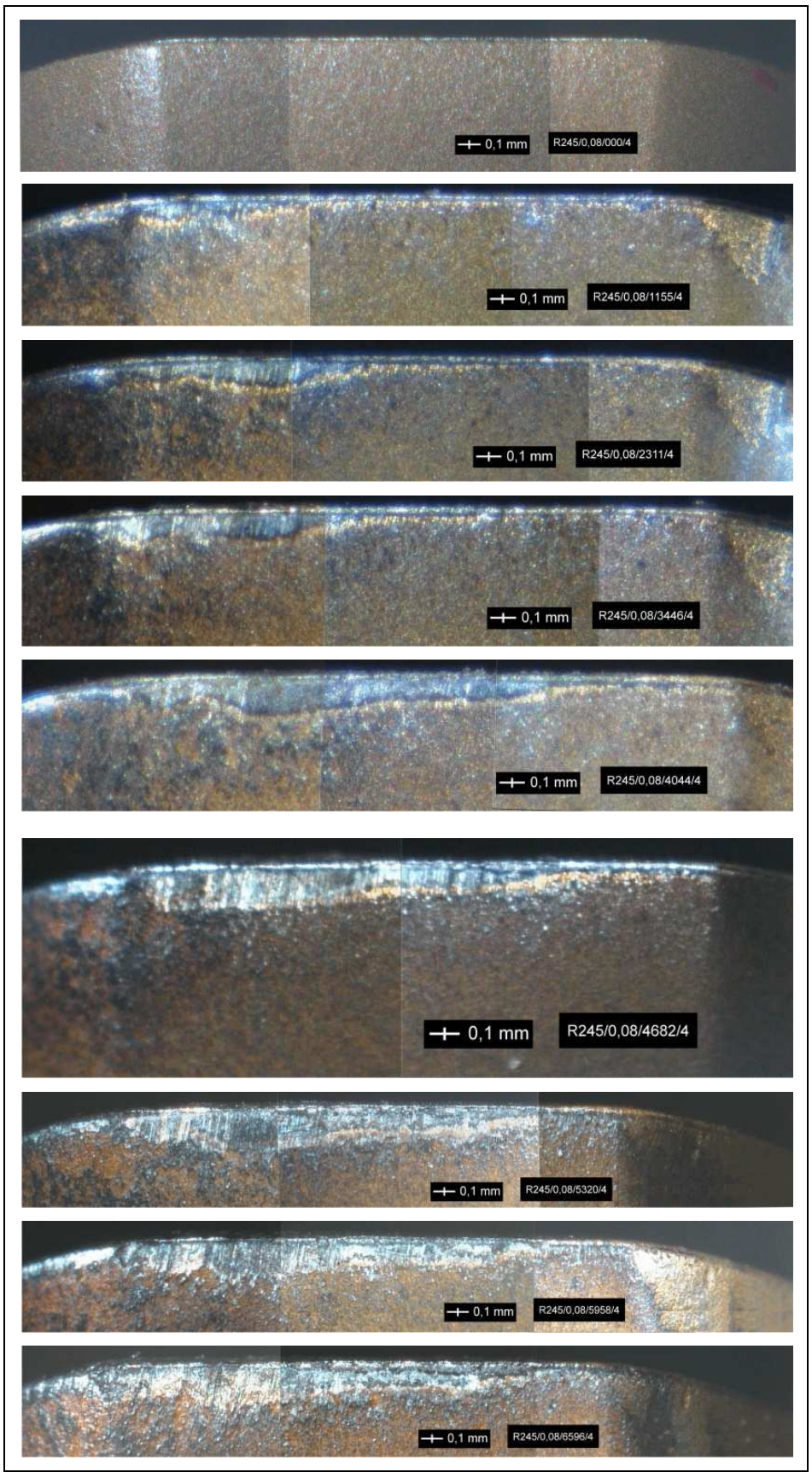
0,1 mm
R245/0,08/6596/2
0,1 mm
R245/0,08/7434/2
0,1 mm
R245/0,08/7553/2

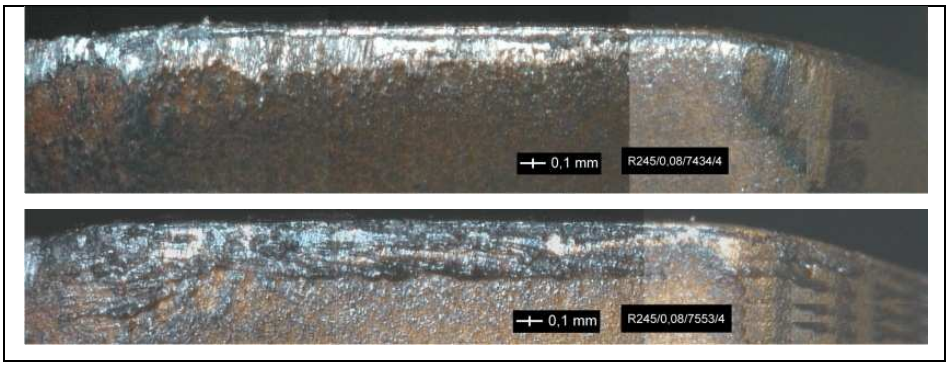
Tablica 15. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



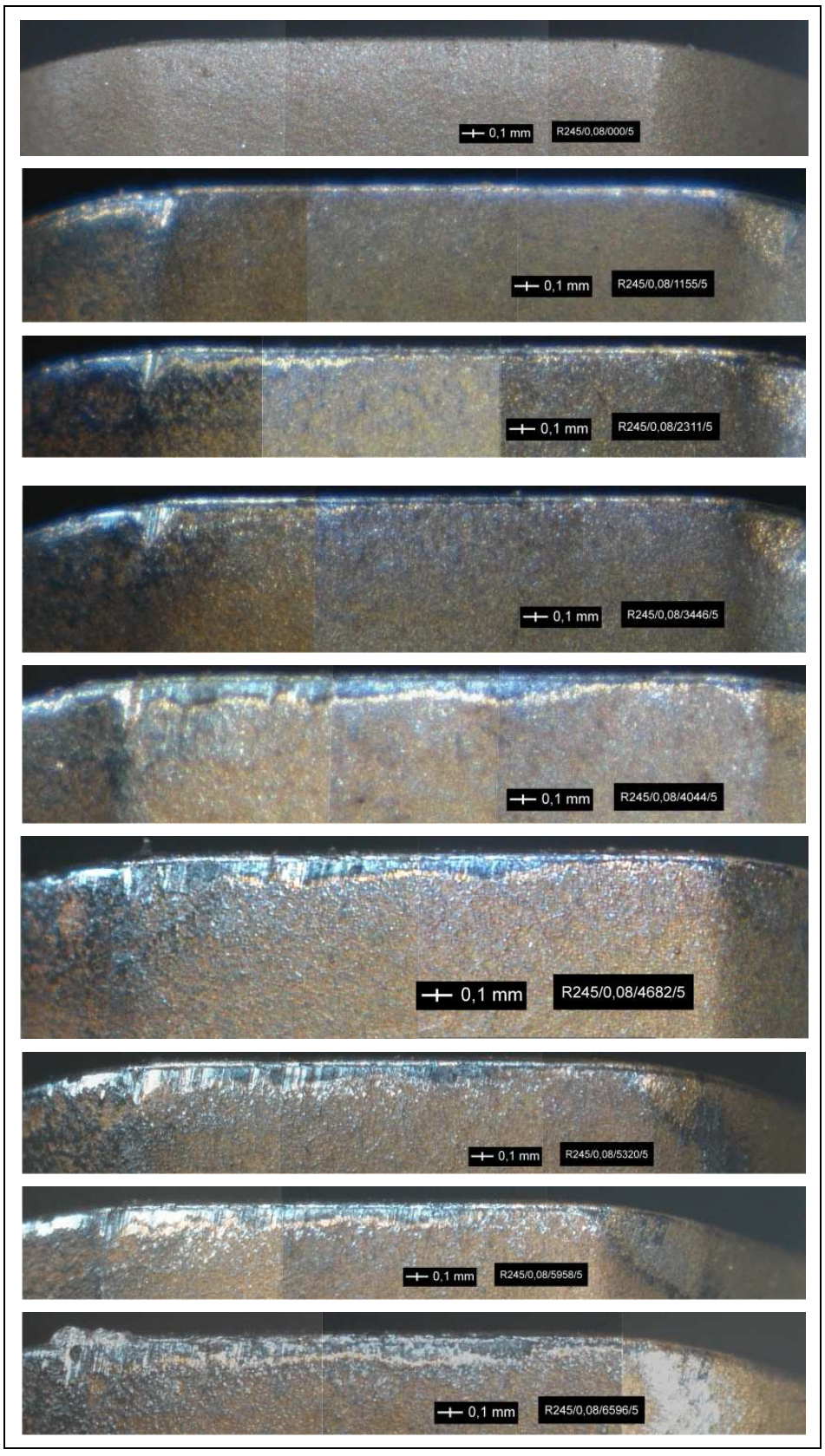

0,1 mm
R245/0,08/6596/3
0,1 mm
R245/0,08/7434/3
0,1 mm
R245/0,08/7553/3

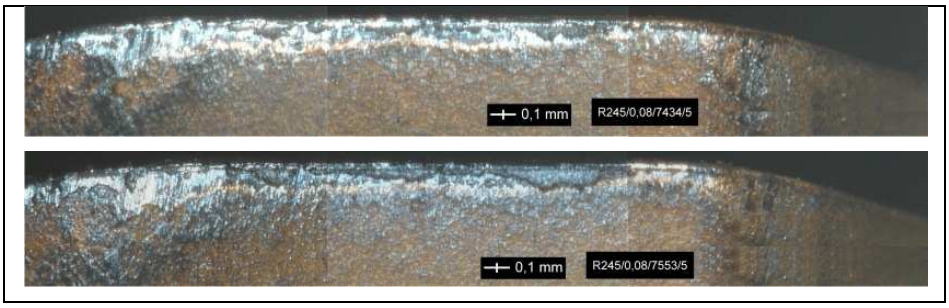
Tablica 16. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



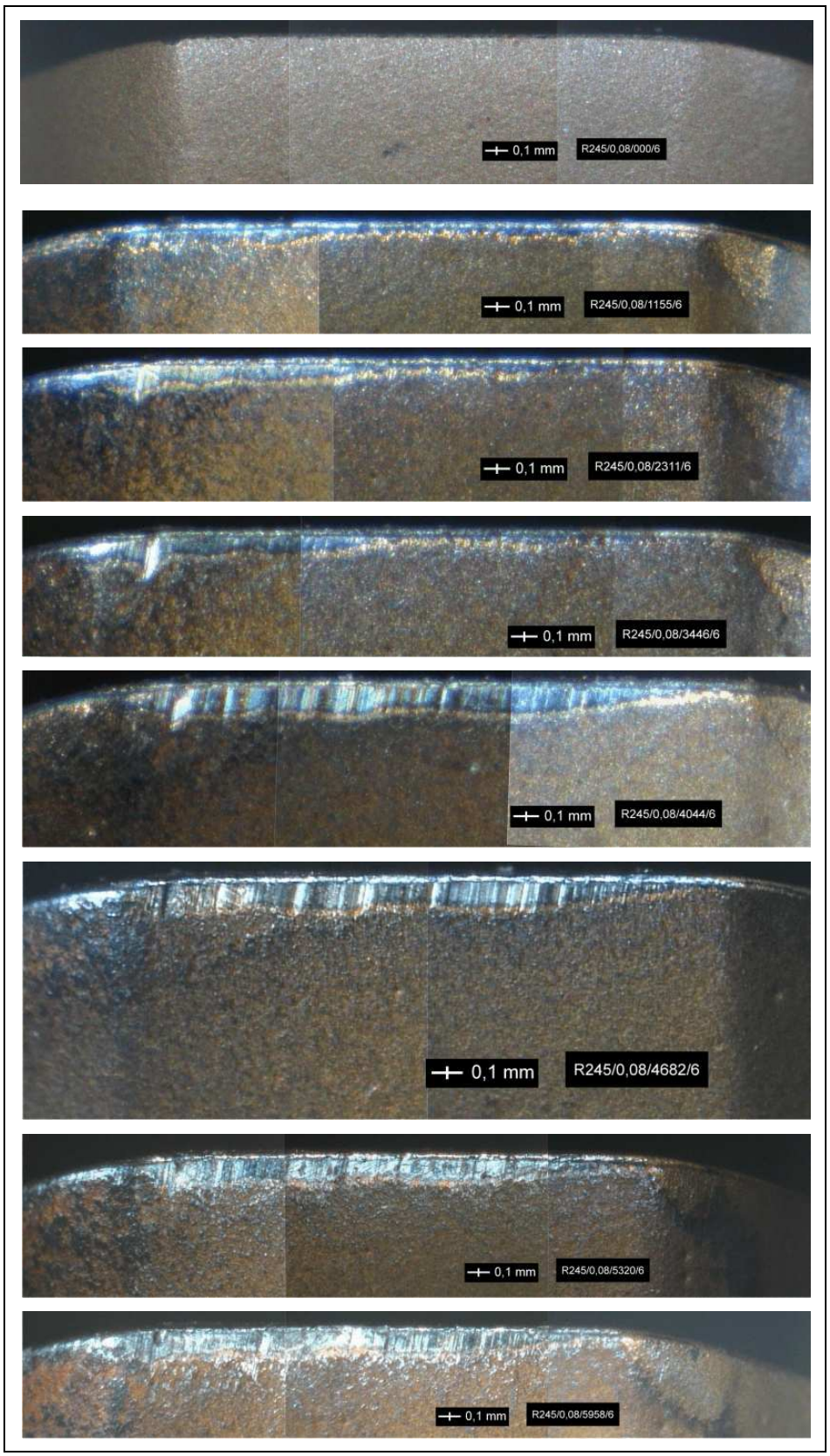

0,1 mm
R245/0,08/7434/4
0,1 mm
R245/0,08/7553/4

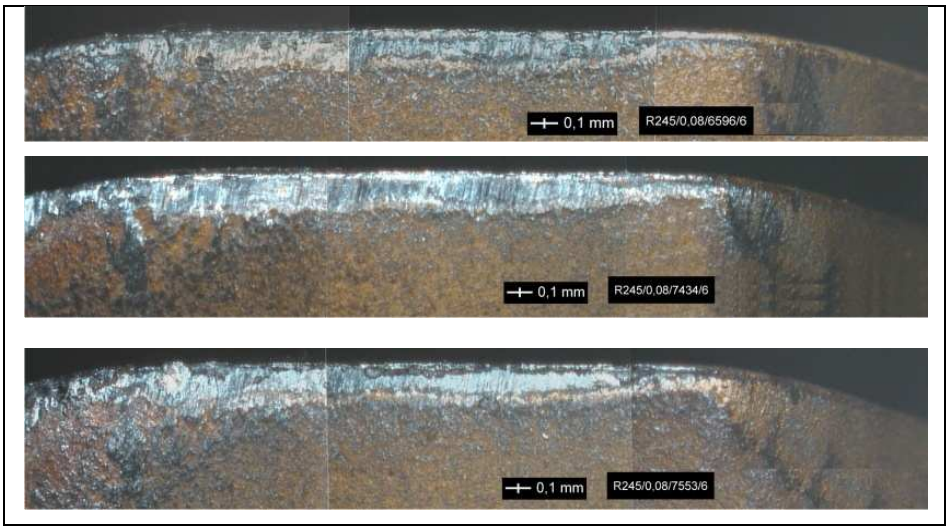
Tablica 17. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



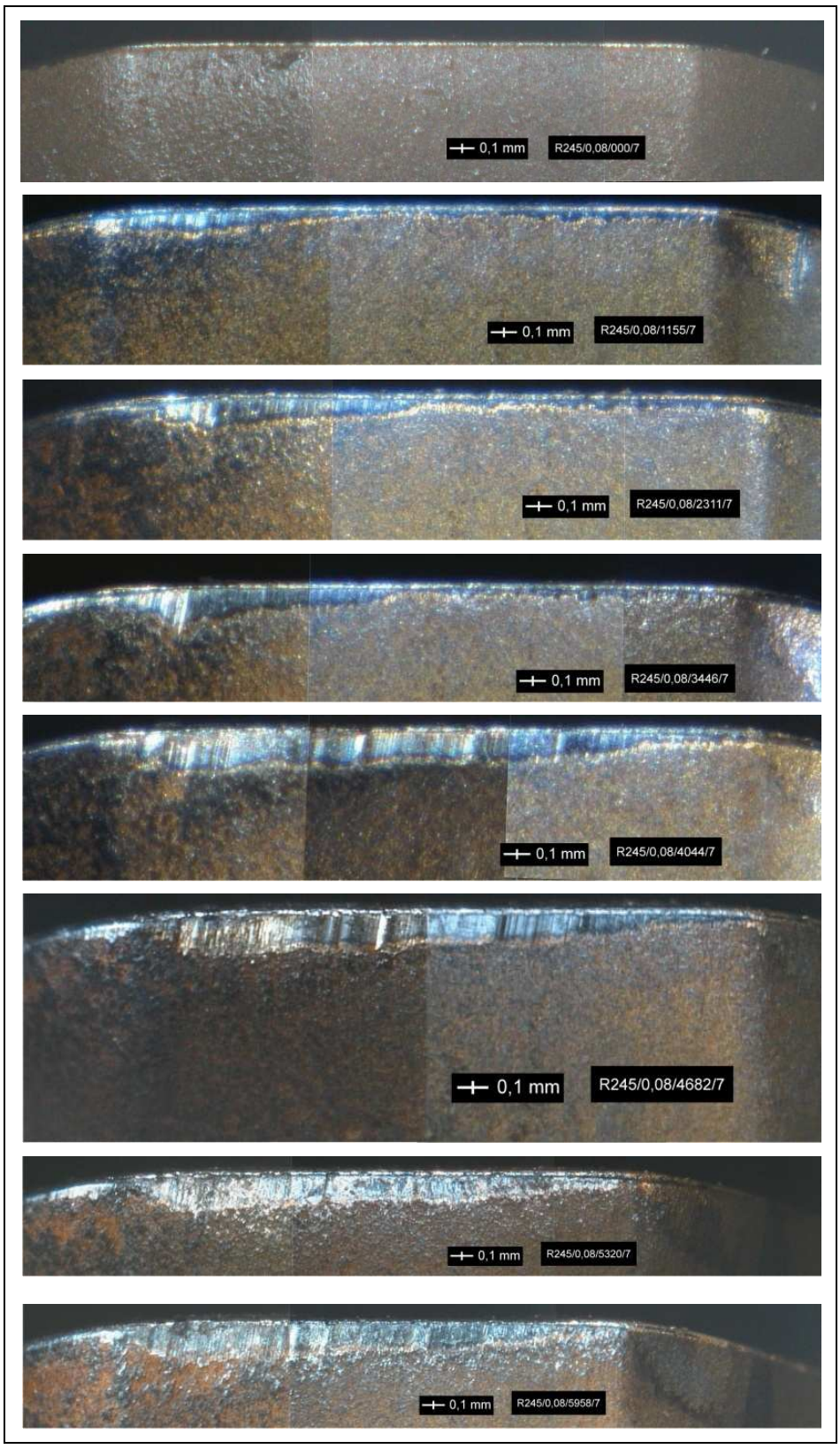

0,1 mm
R245/0,08/7434/5
0,1 mm
R245/0,08/7553/5

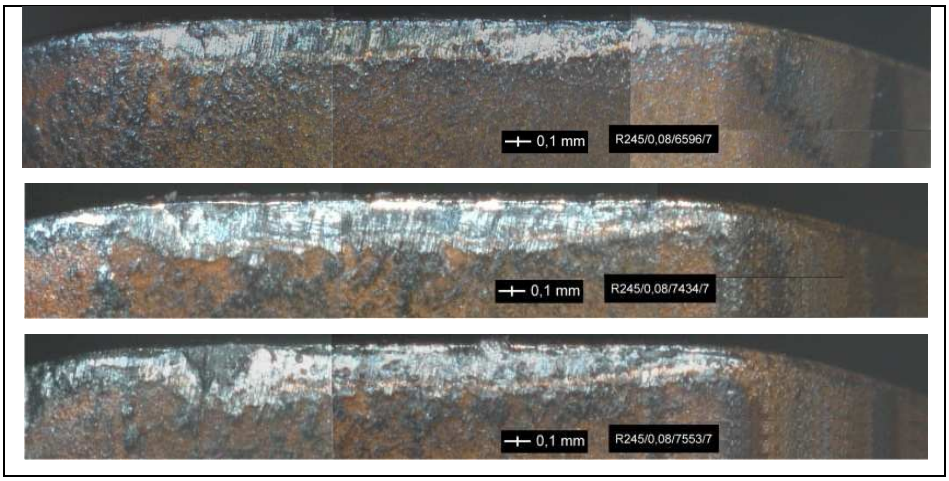
Tablica 18. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



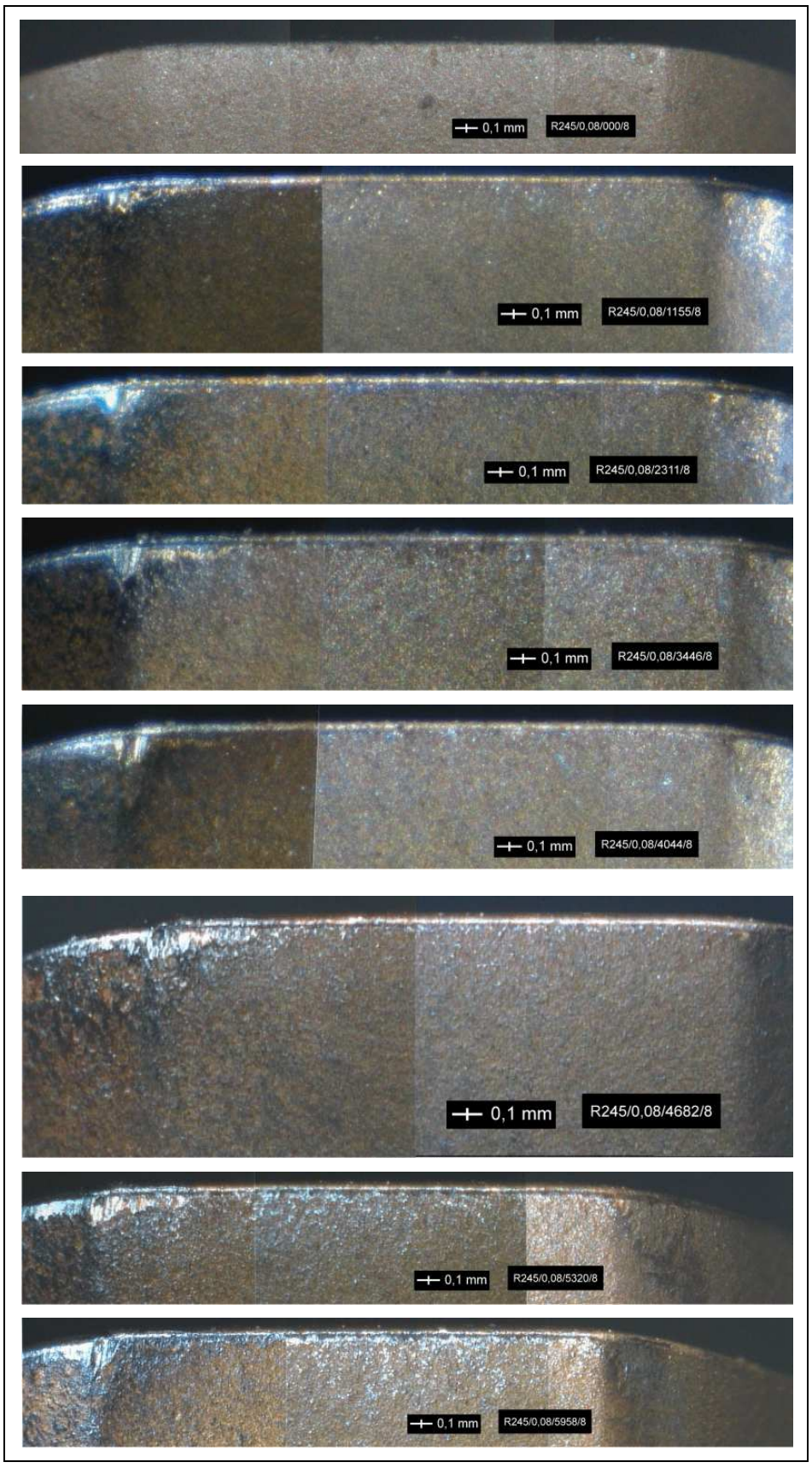

0,1 mm
R245/0.08/6596/6
0,1 mm
R245/0.08/7434/6
0,1 mm
R245/0.08/7553/6

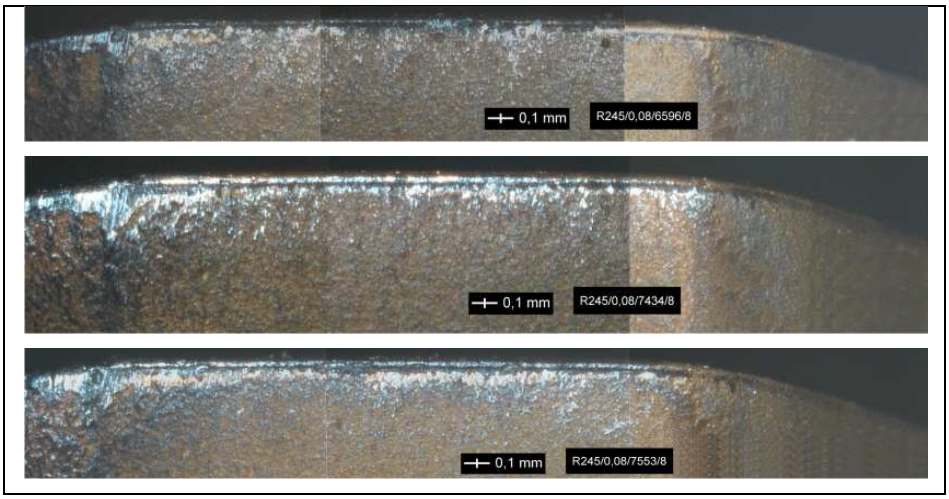
Tablica 19. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



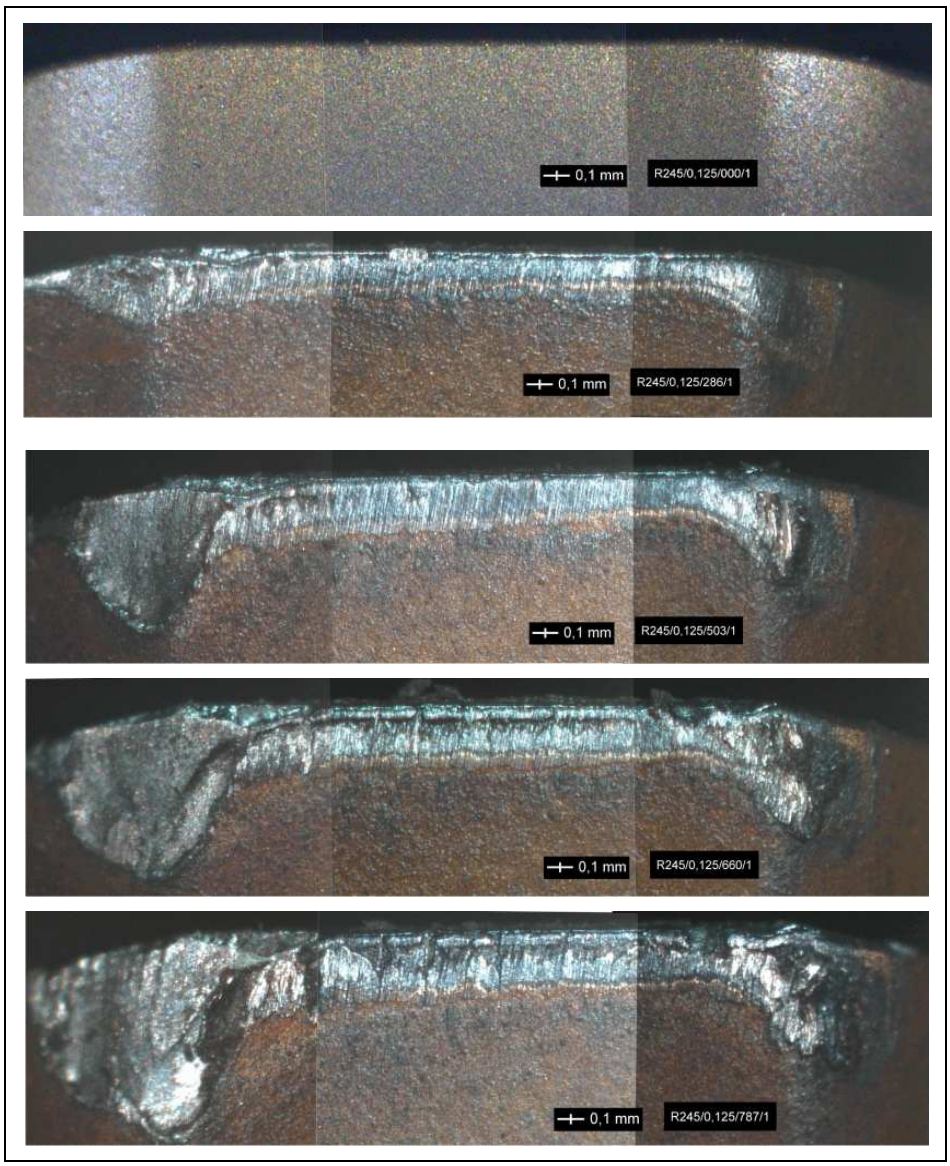

0,1 mm
R245/0,08/6596/7
0,1 mm
R245/0,08/7434/7
0,1 mm
R245/0,08/7553/7

Tablica 20. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 710 mm/min.

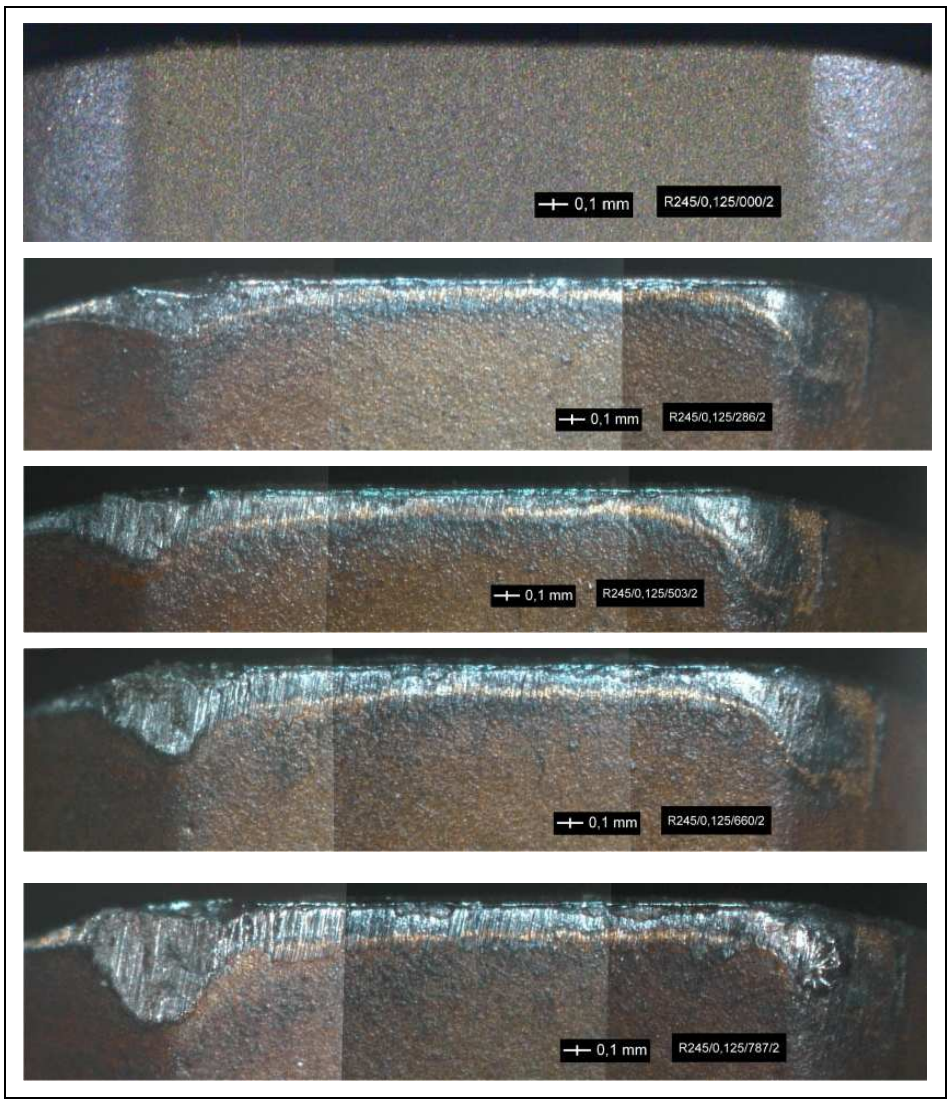



0,1 mm
R245/0,08/6596/8
0,1 mm
R245/0,08/7434/8
0,1 mm
R245/0,08/7553/8

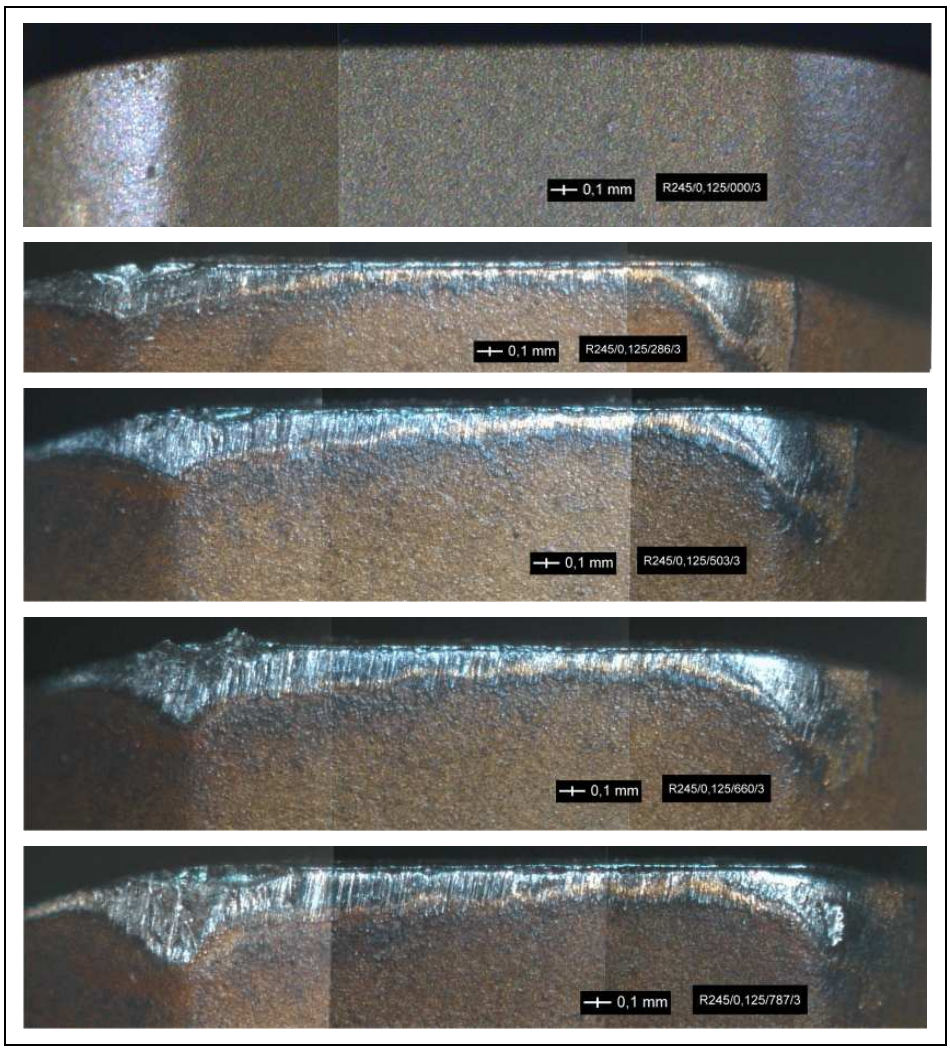
Tablica 21. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



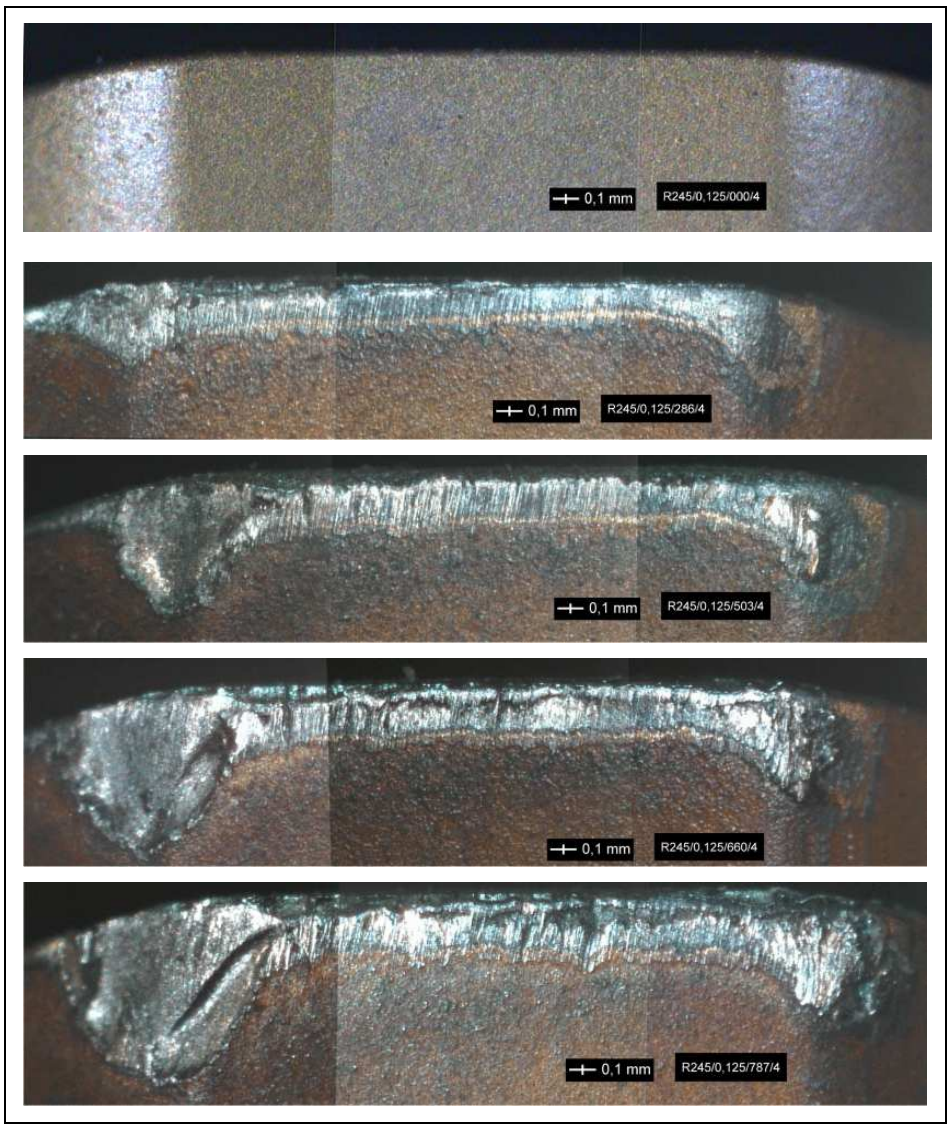
Tablica 22. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



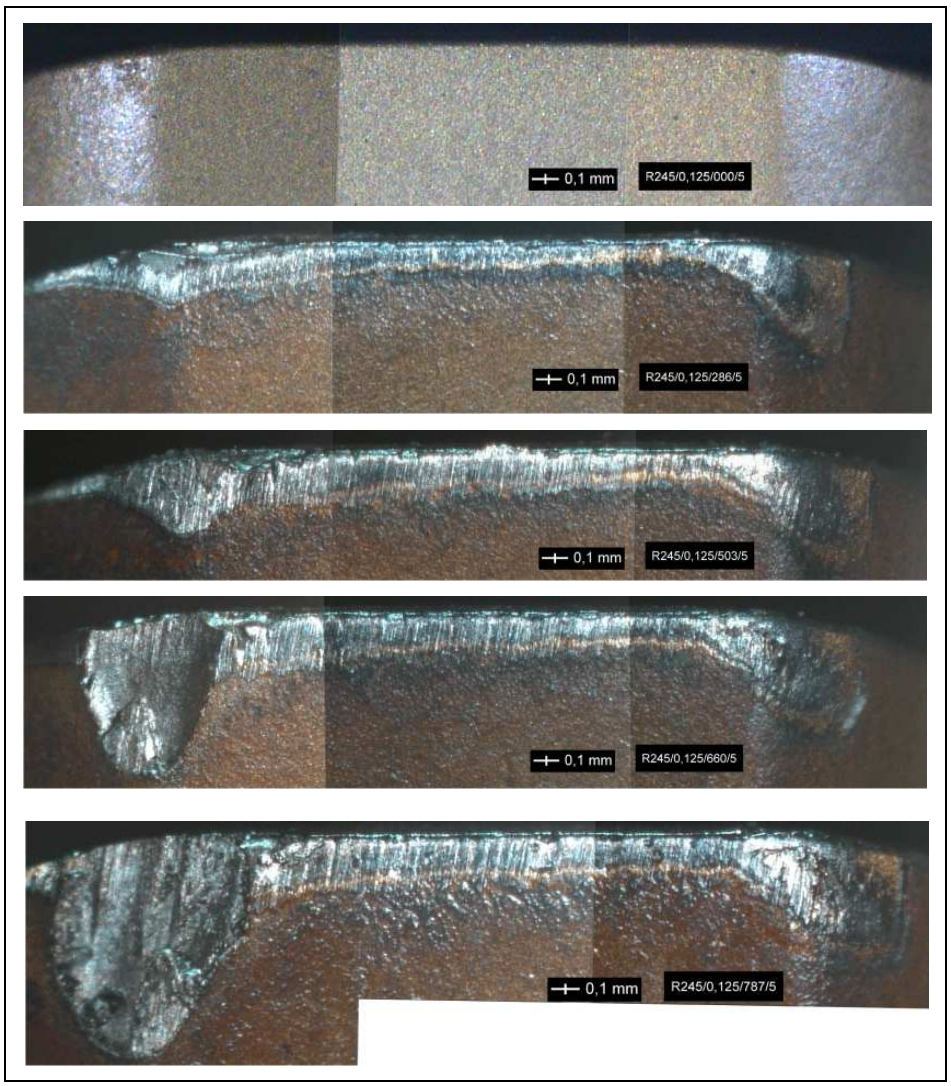
Tablica 23. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



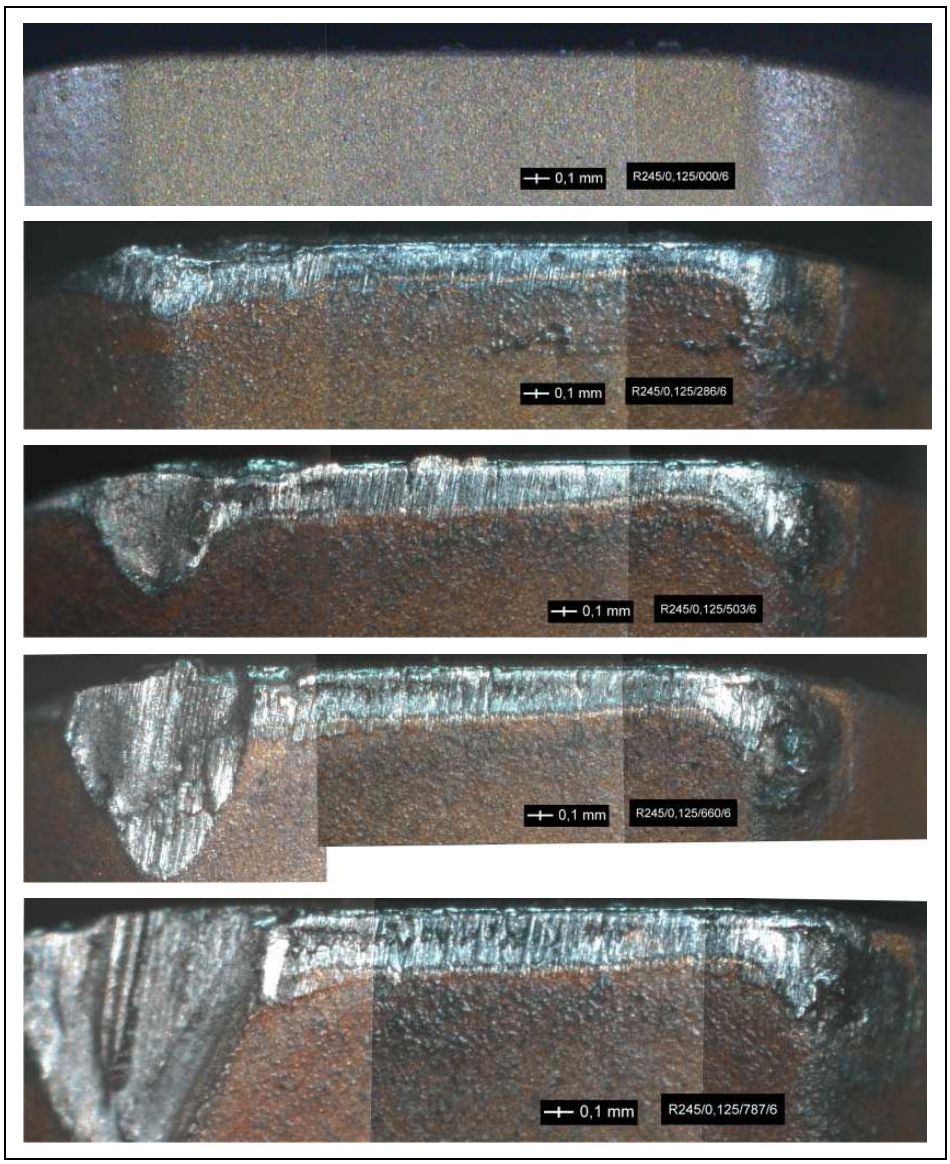
Tablica 24. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



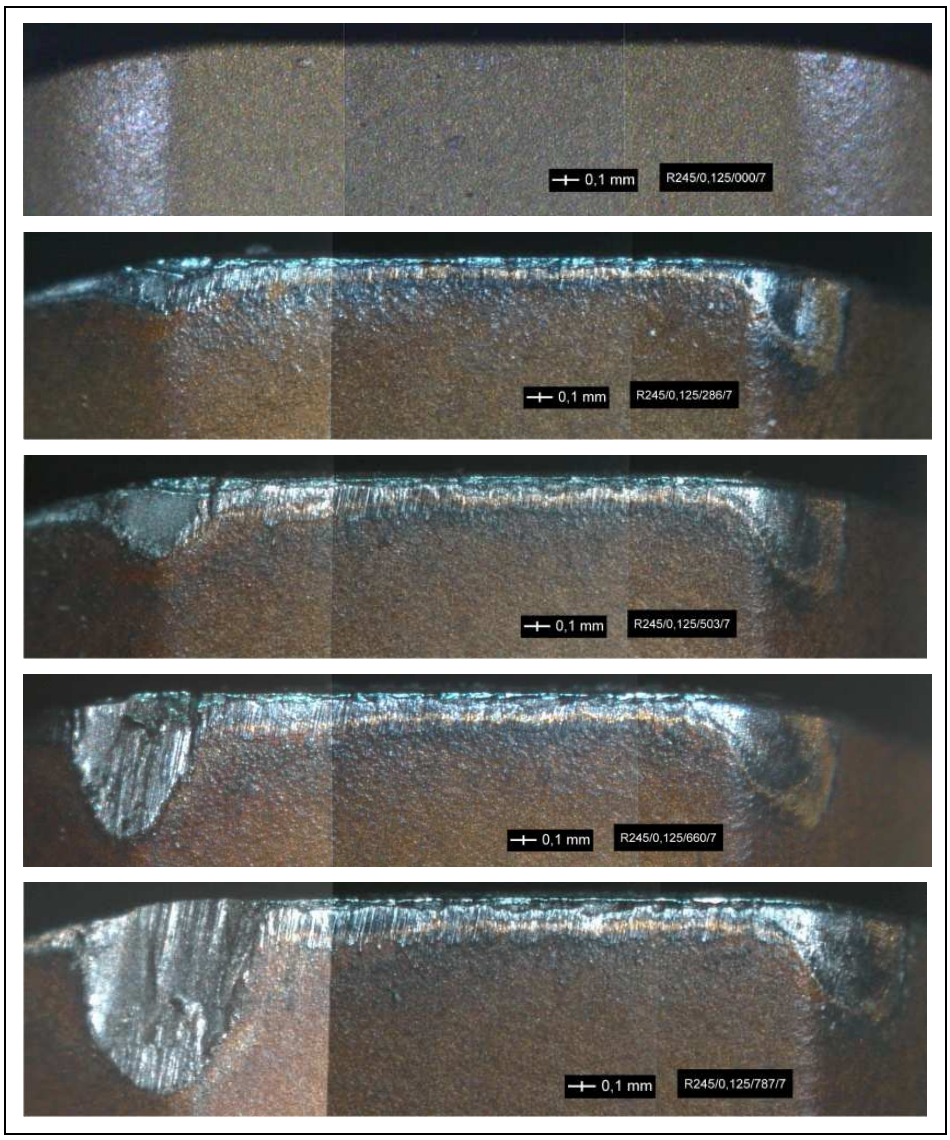
Tablica 25. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



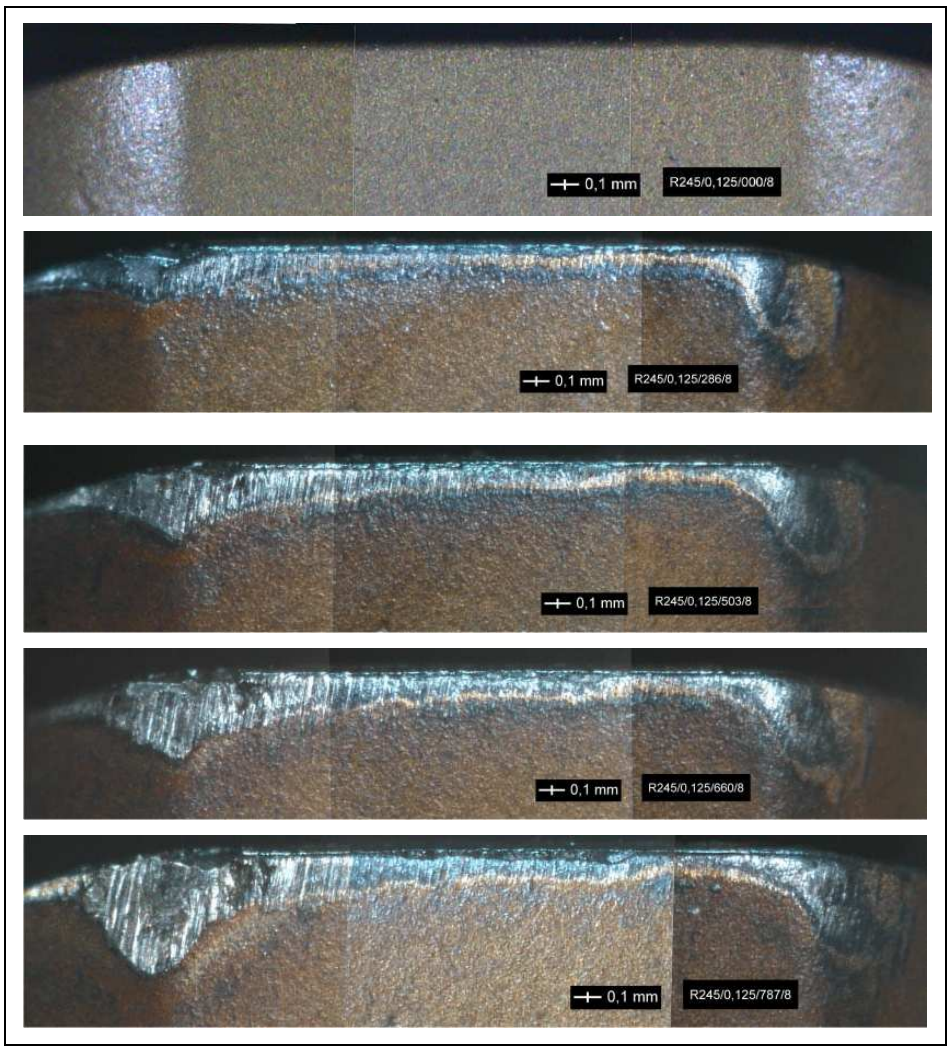
Tablica 26. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



Tablica 27. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



Tablica 28. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.

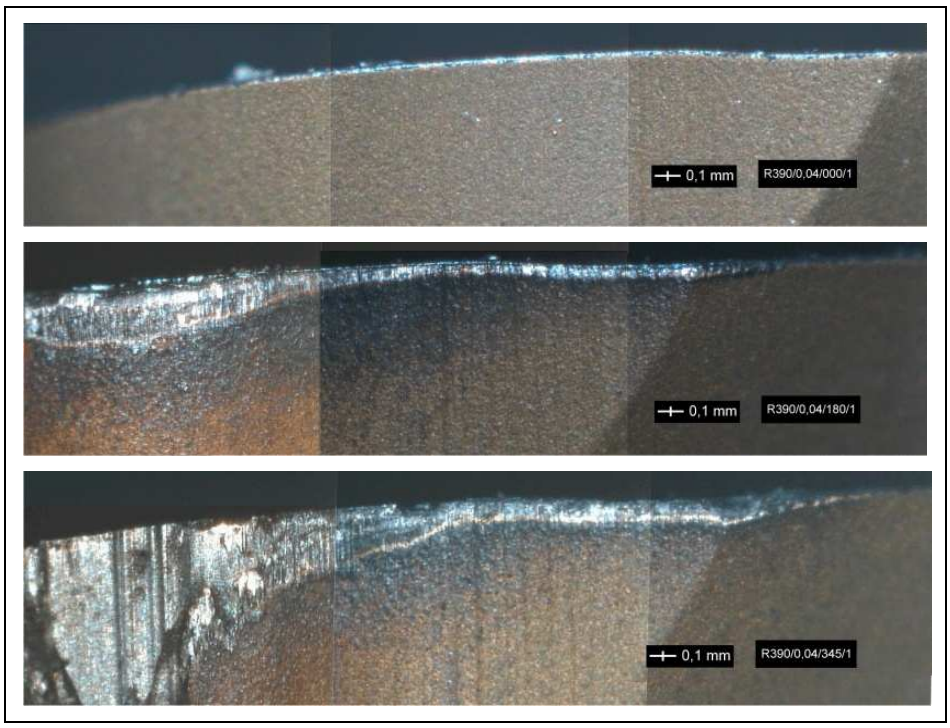


Załącznik nr 2

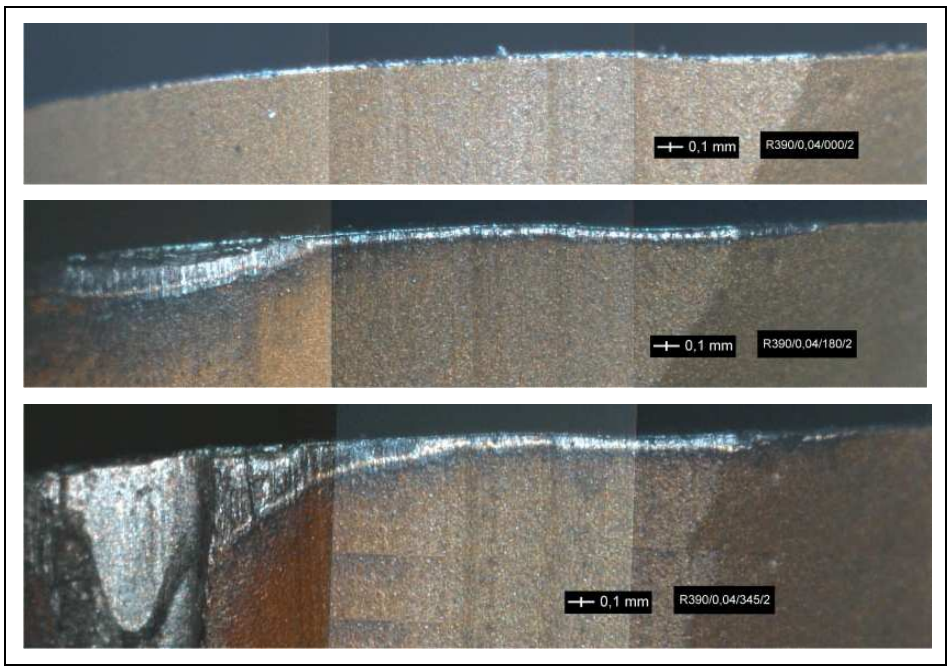
Zużycie ostrzy dla głowicy frezowej R390

Tablice 29 - 52

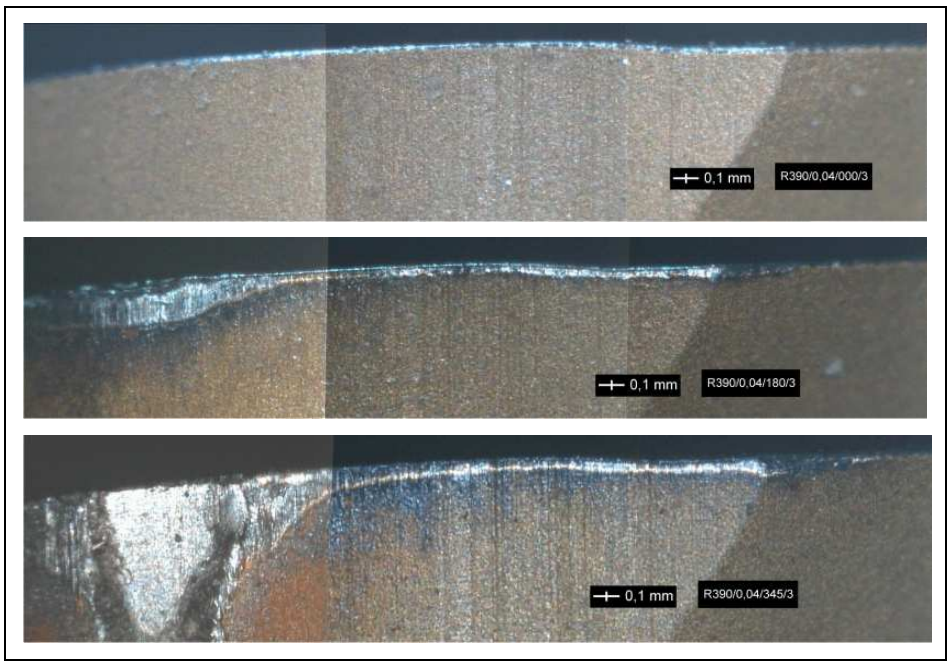
Tablica 29. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



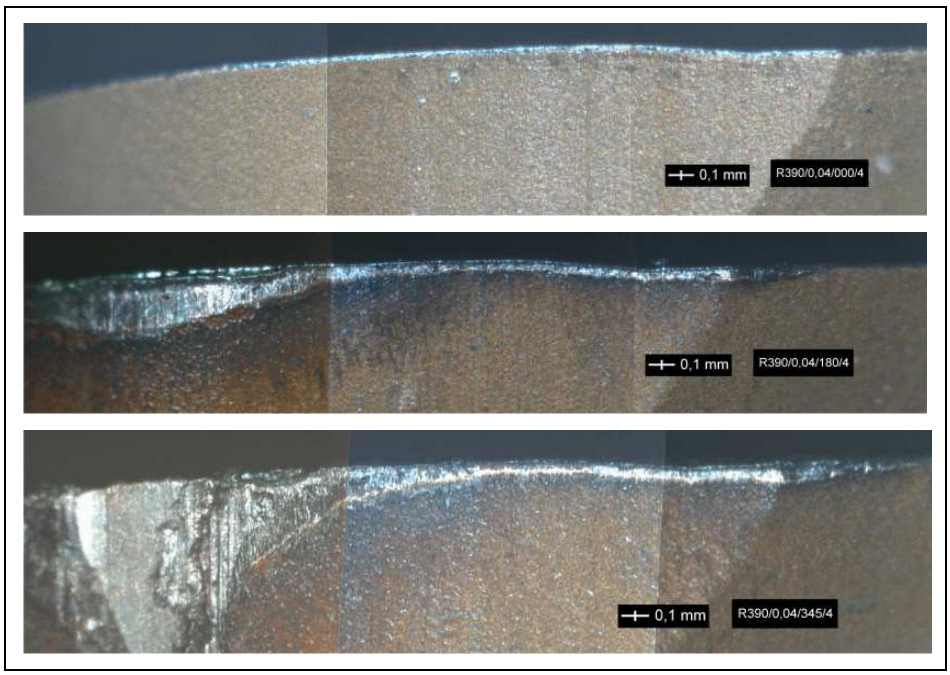
Tablica 30. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



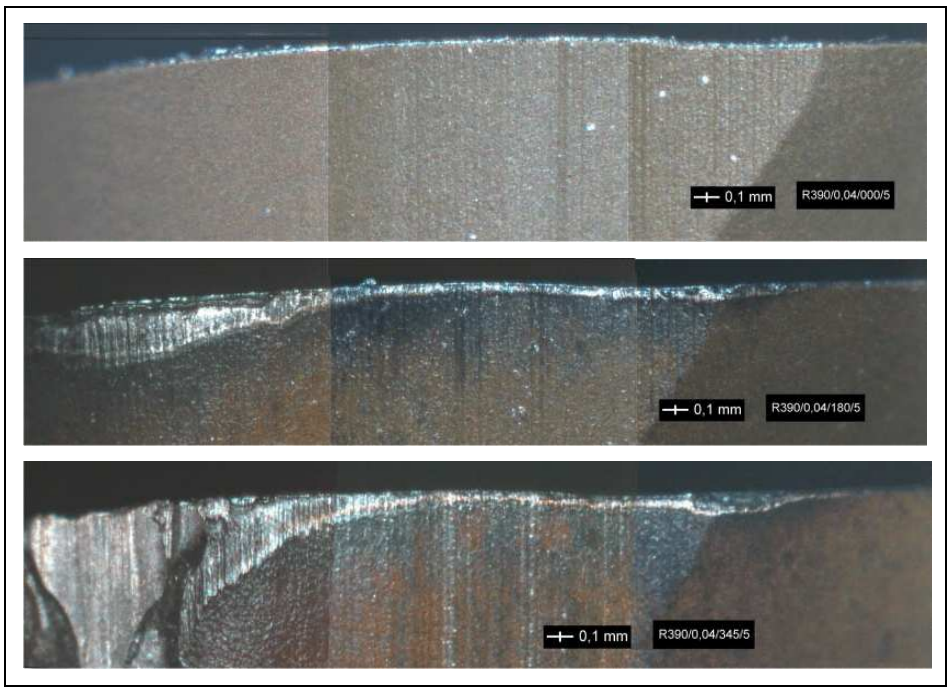
Tablica 31. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



Tablica 32. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min.

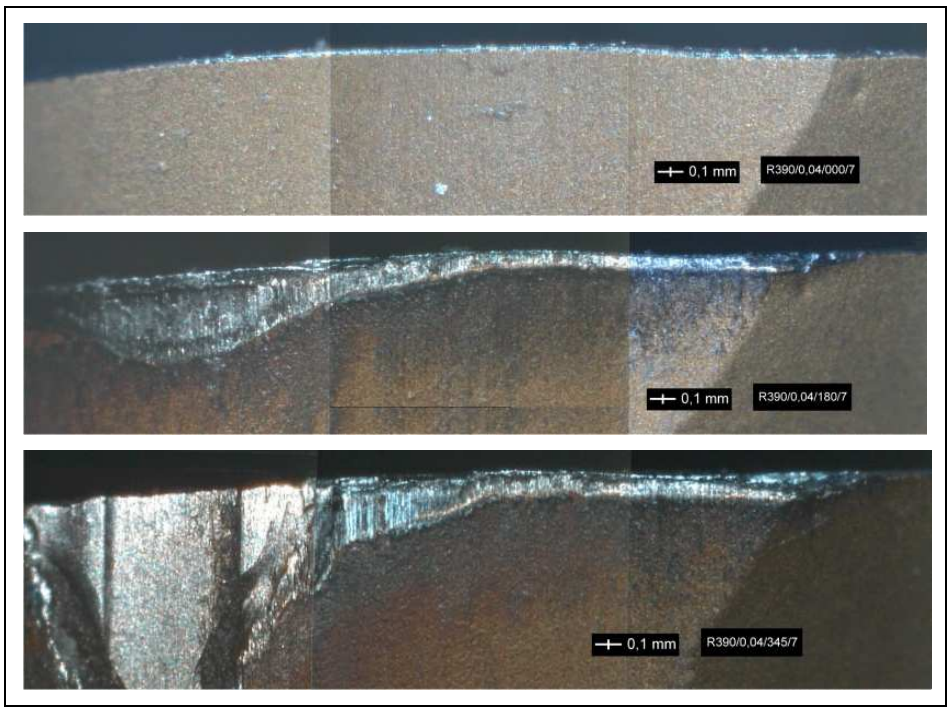


Tablica 33. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min.

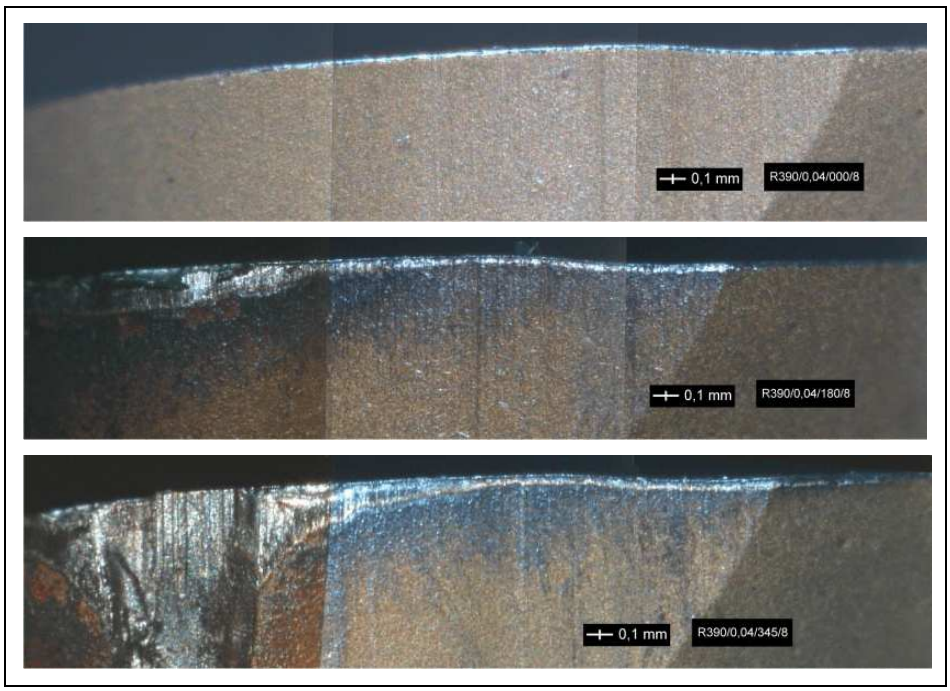


Tablica 34. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min.

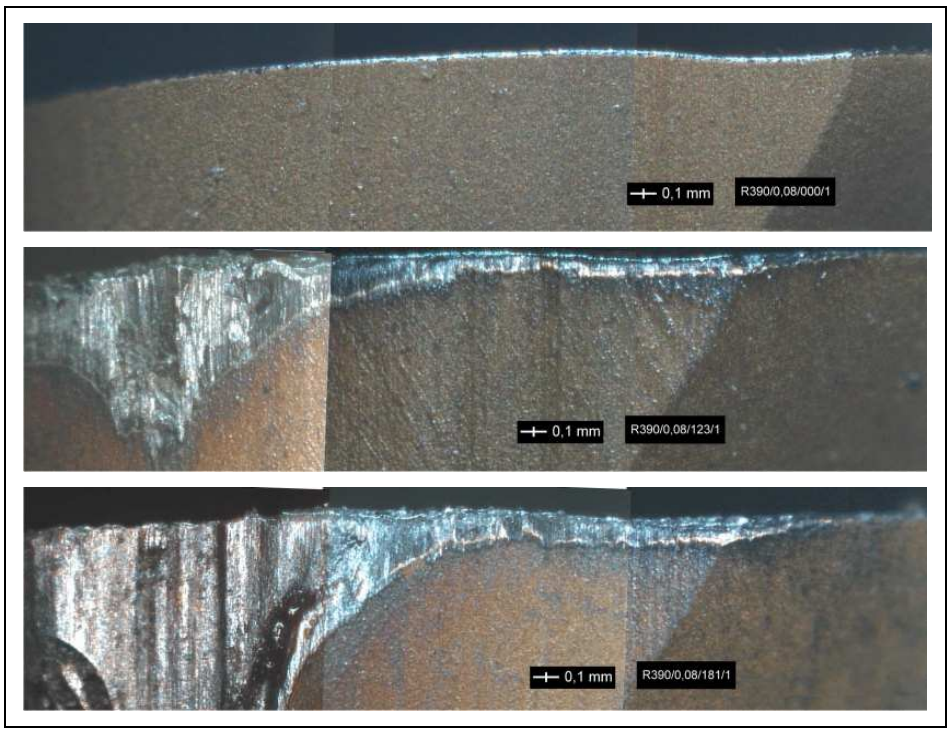
Tablica 35. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



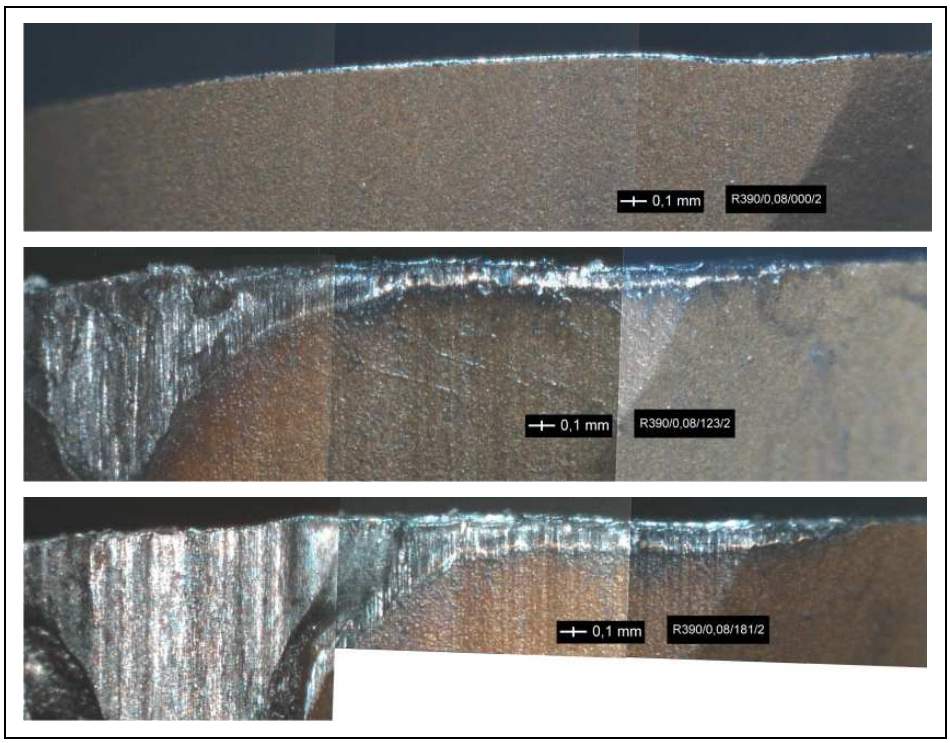
Tablica 36. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 355 mm/min.



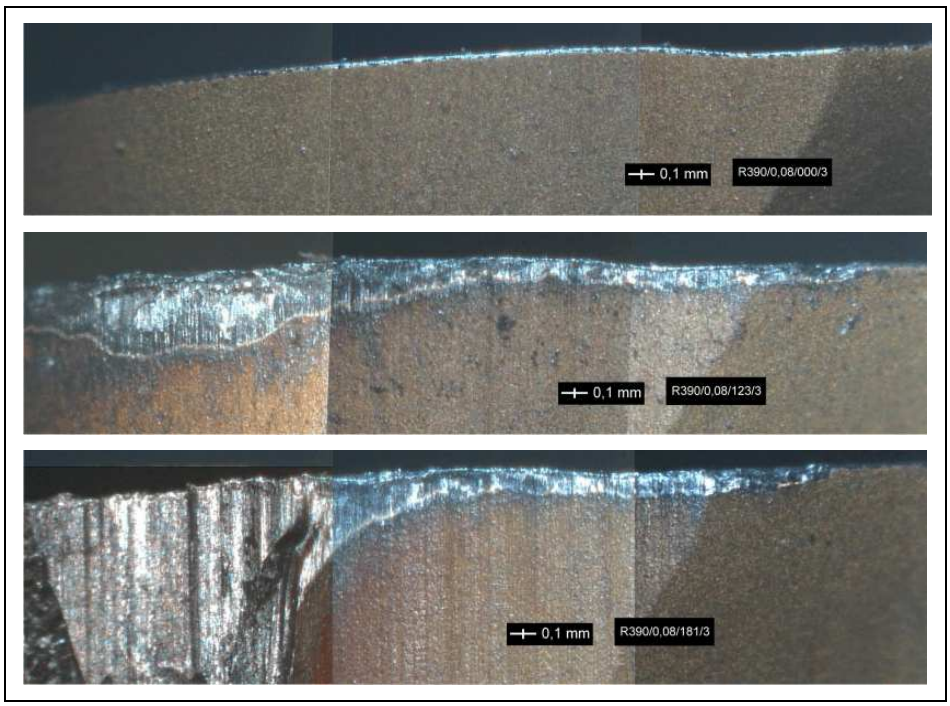
Tablica 37. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



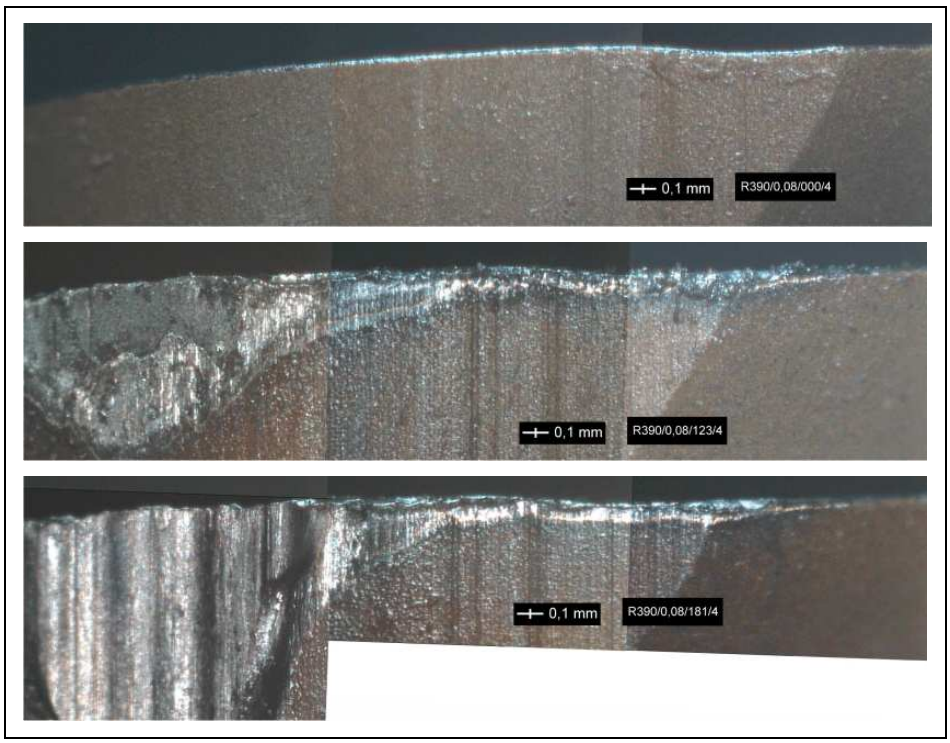
Tablica 38. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



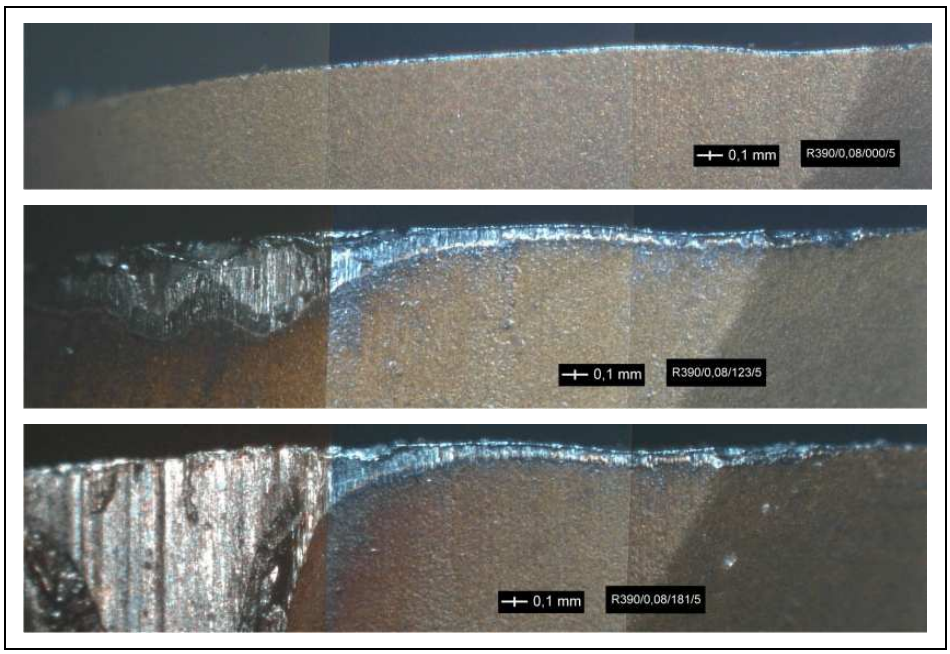
Tablica 39. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



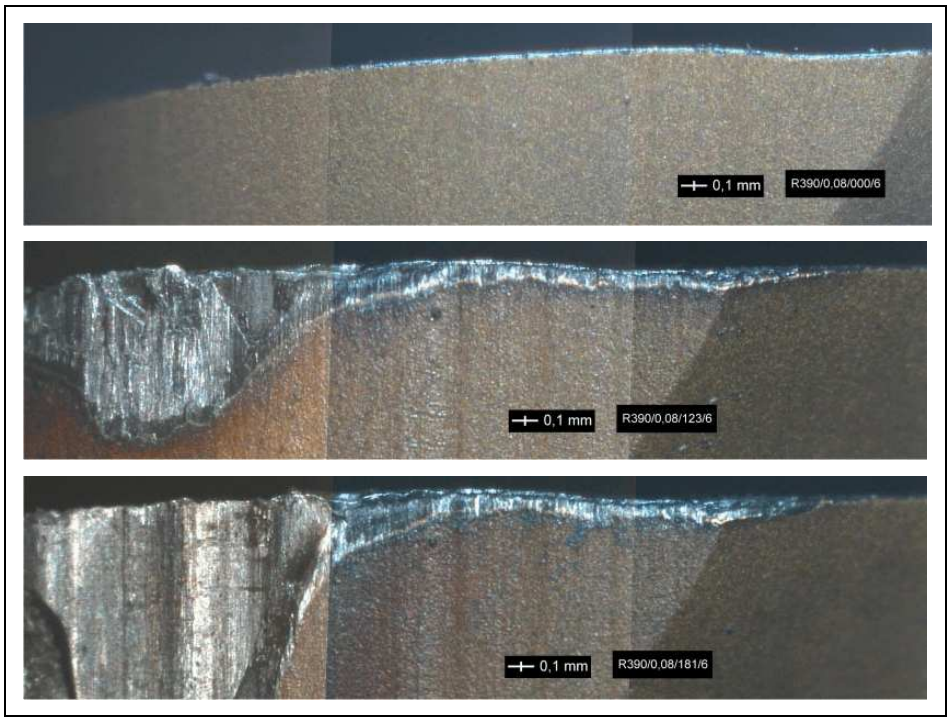
Tablica 40. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



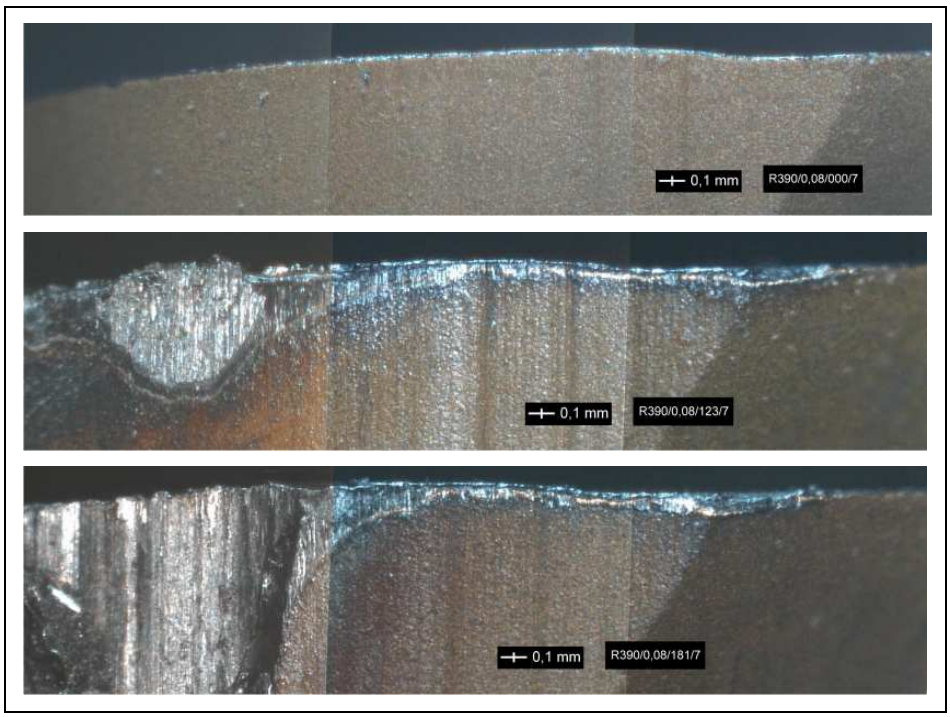
Tablica 41. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



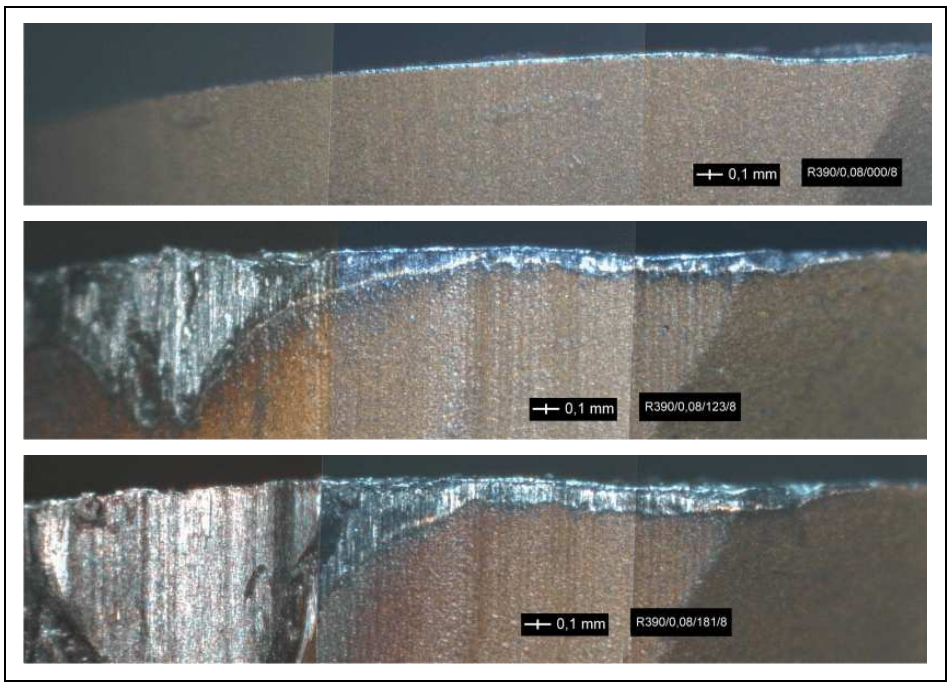
Tablica 42. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



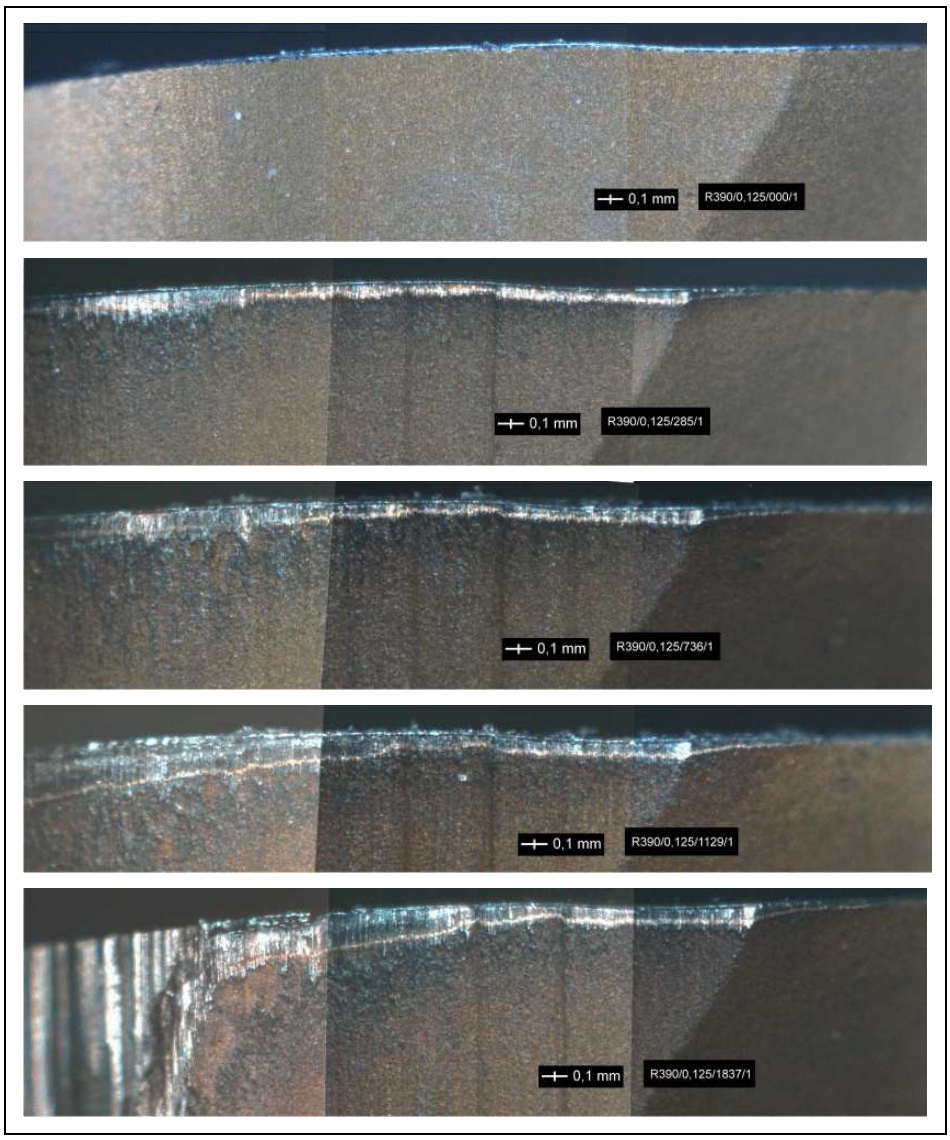
Tablica 43. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



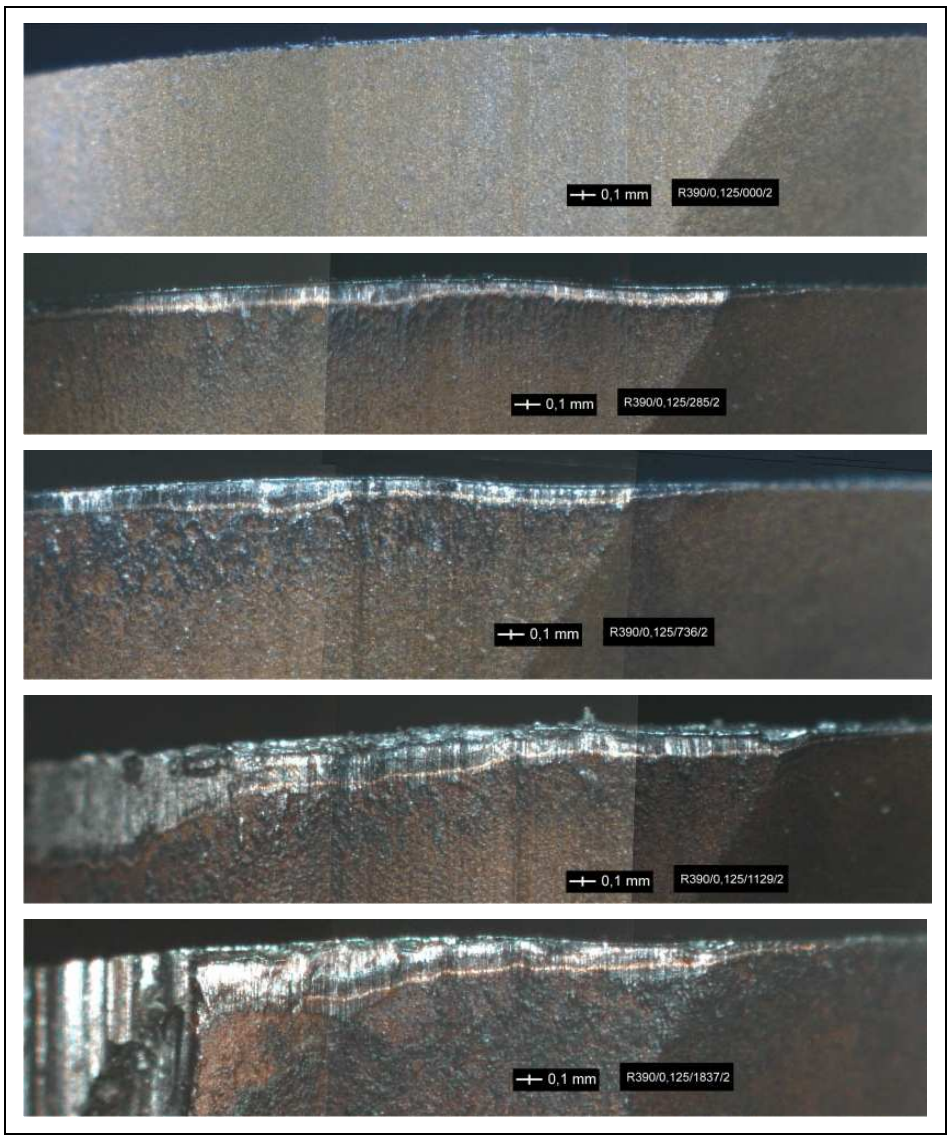
Tablica 44. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 710 mm/min.



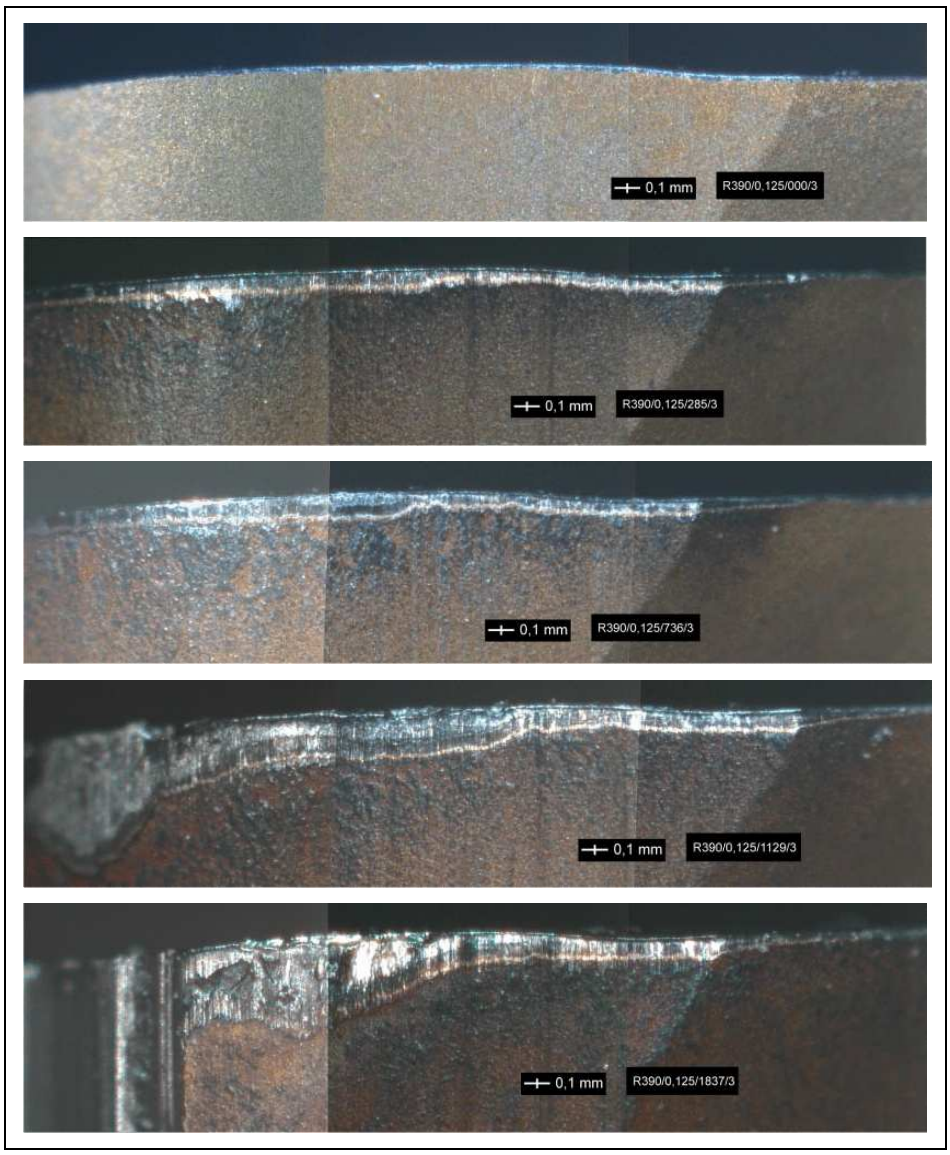
Tablica 45. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



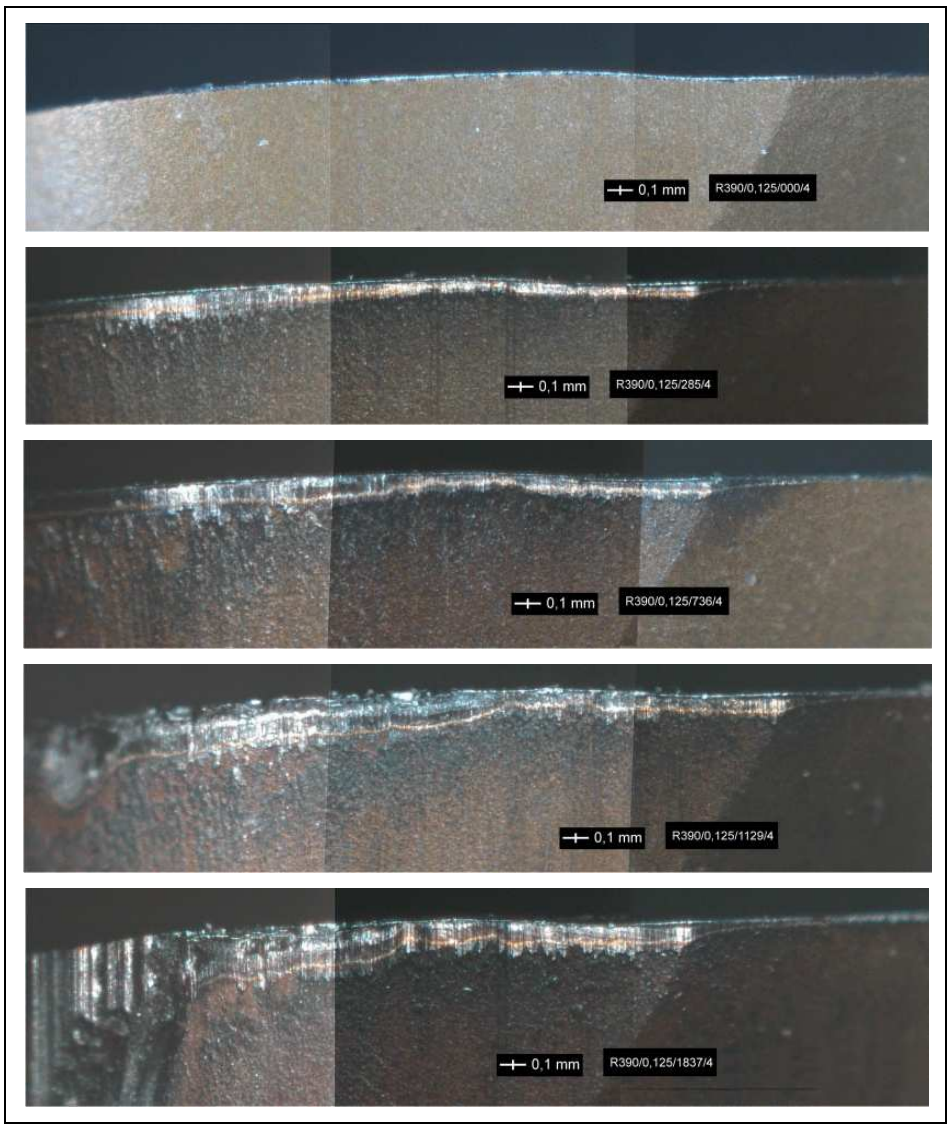
Tablica 46. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



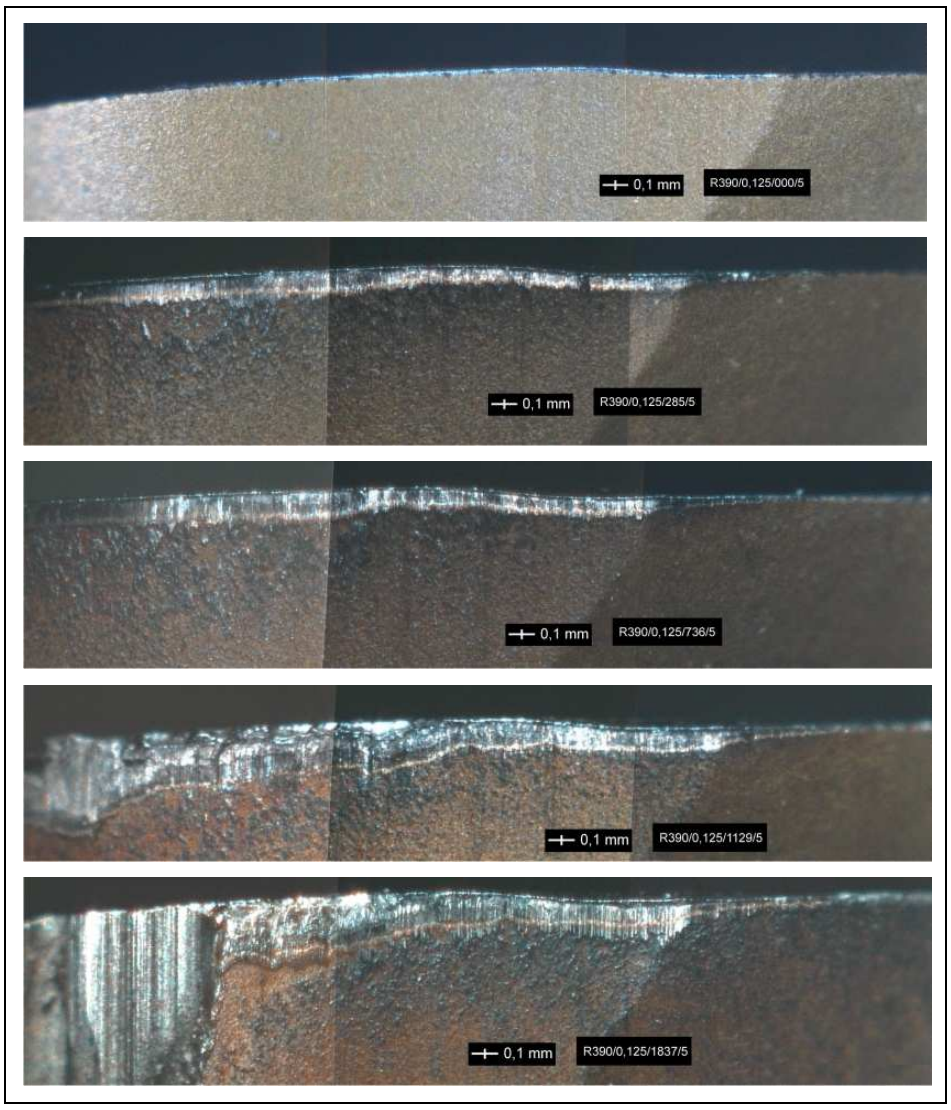
Tablica 47. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



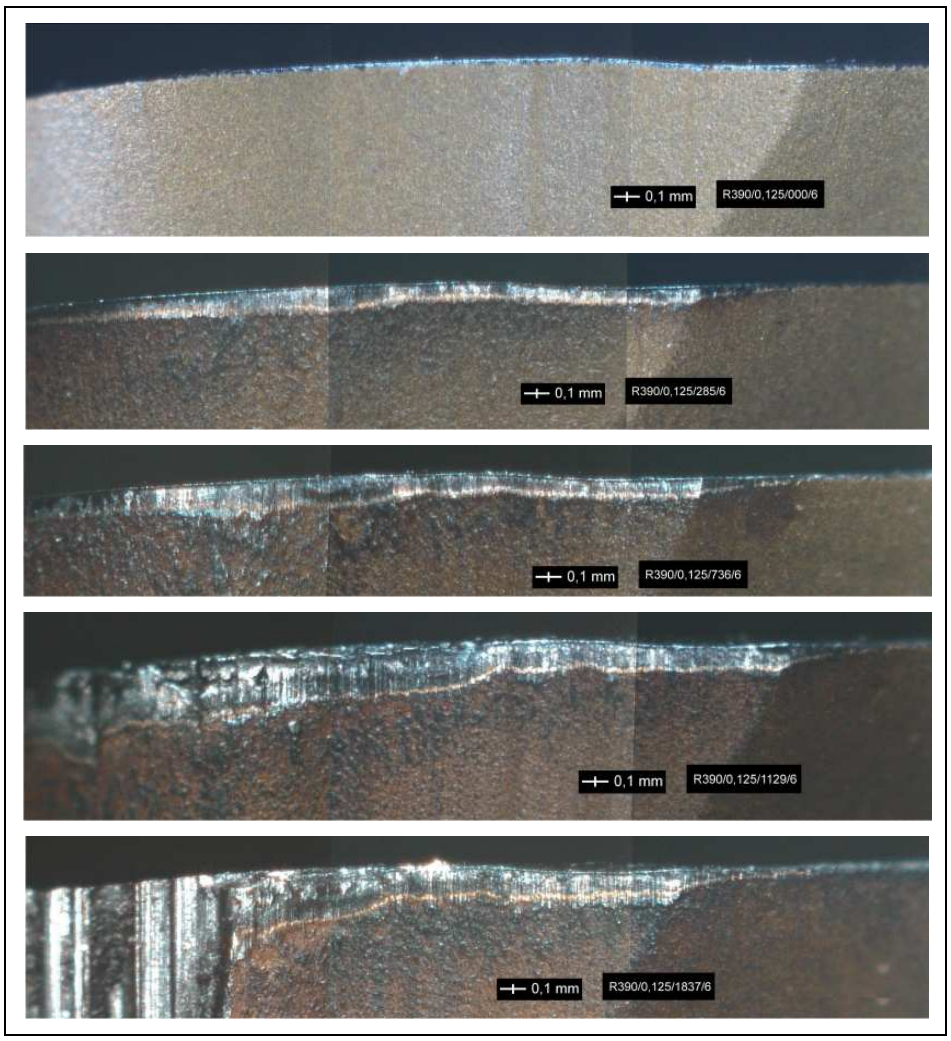
Tablica 48. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



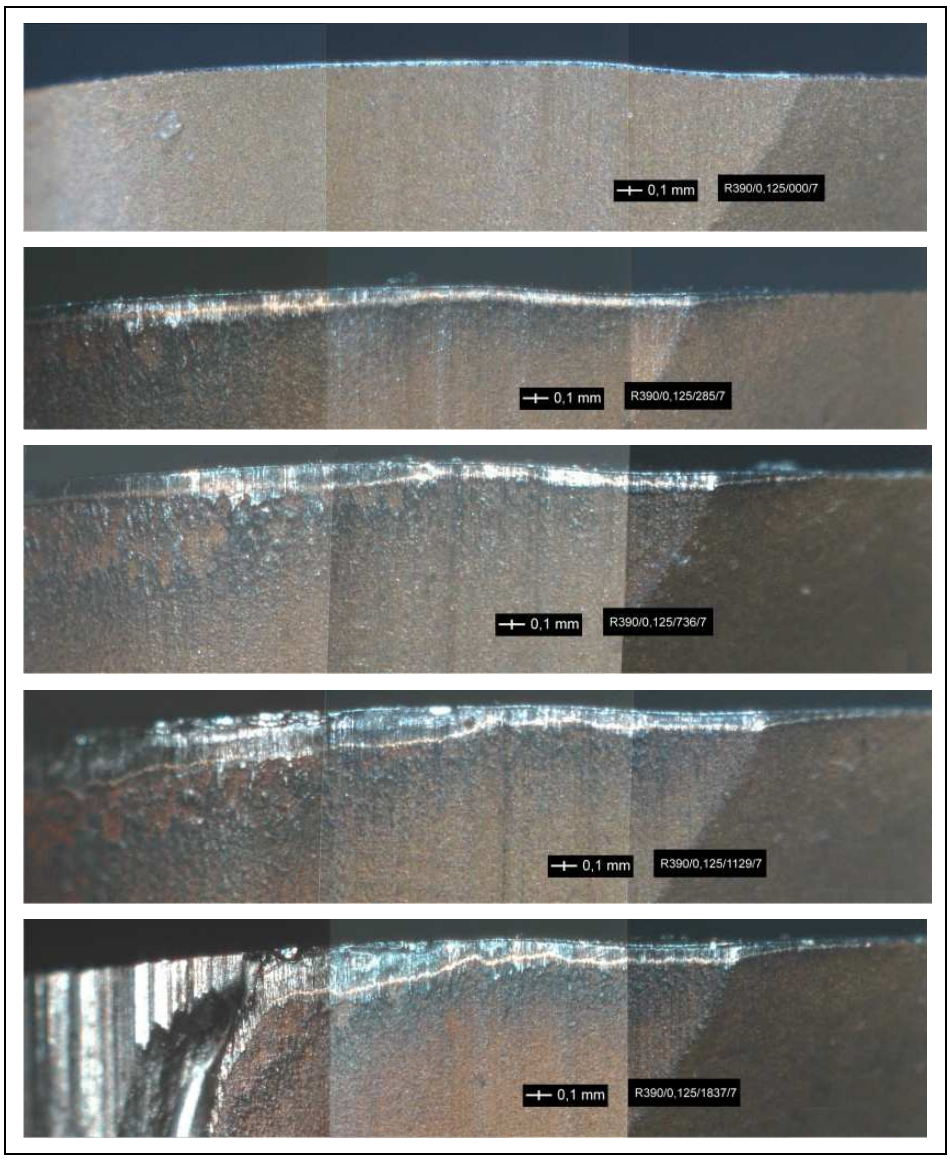
Tablica 49. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



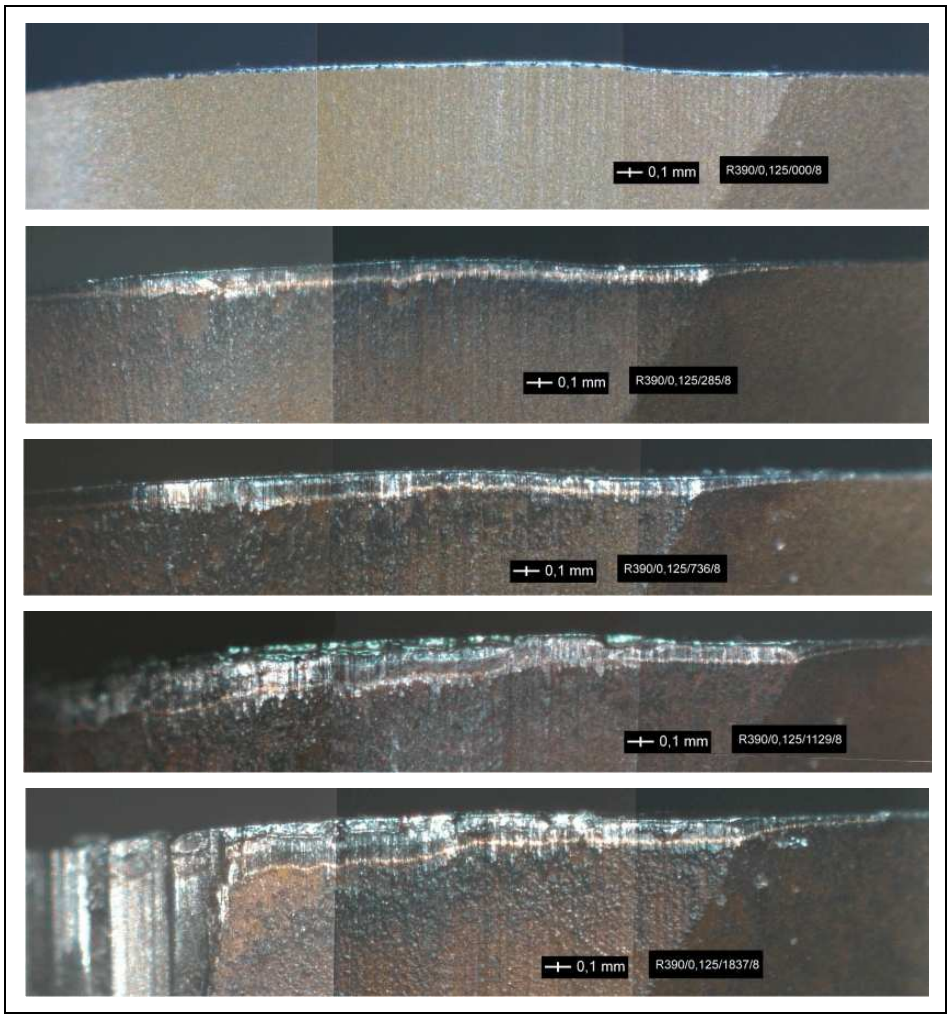
Tablica 50. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



Tablica 51. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.



Tablica 52. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390 dla posuwu v_f = 1120 mm/min.

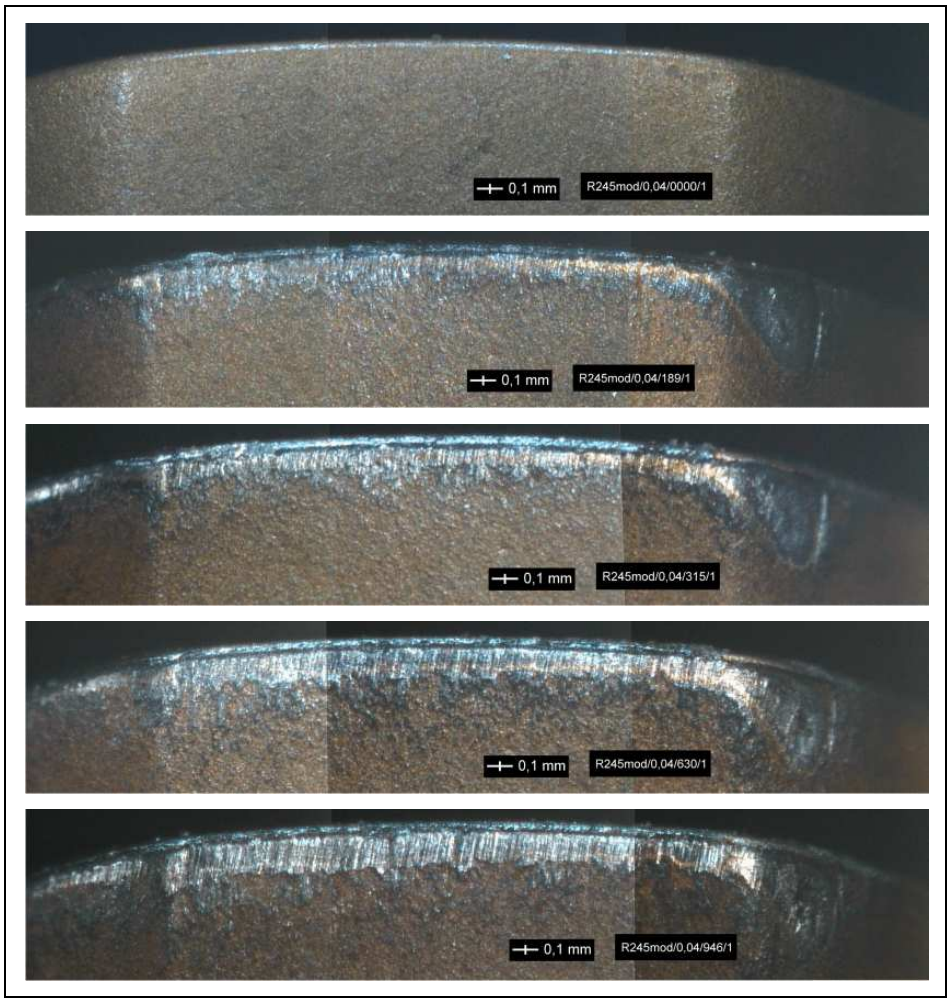


Załącznik nr 3

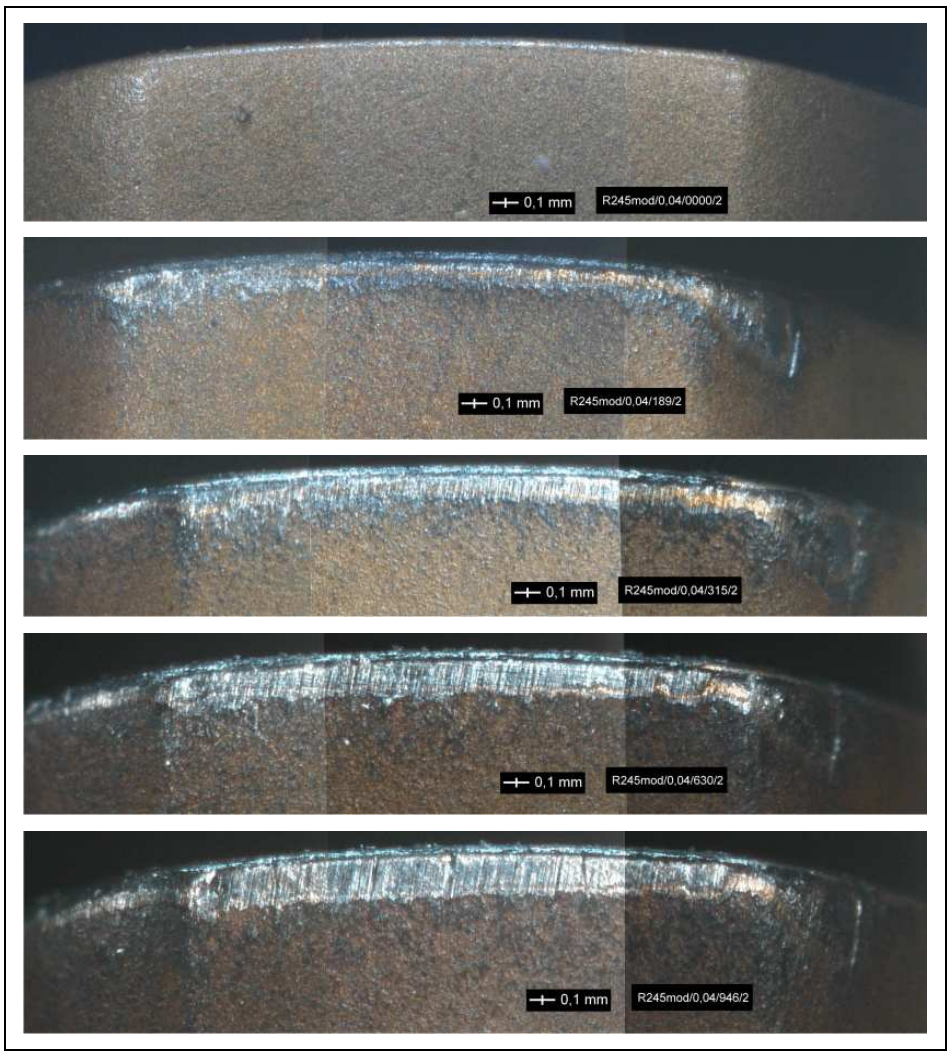
Zużycie ostrzy dla głowicy frezowej R245mod

Tablice 53 - 76

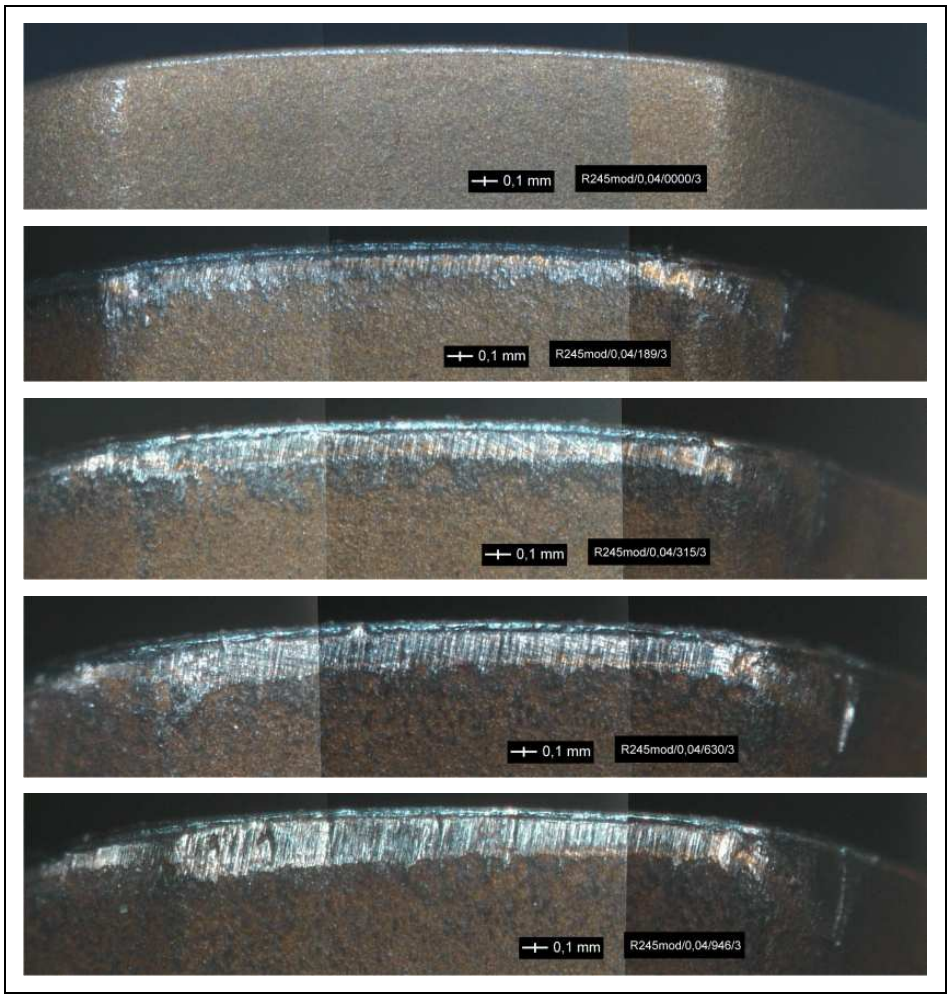
Tablica 53. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



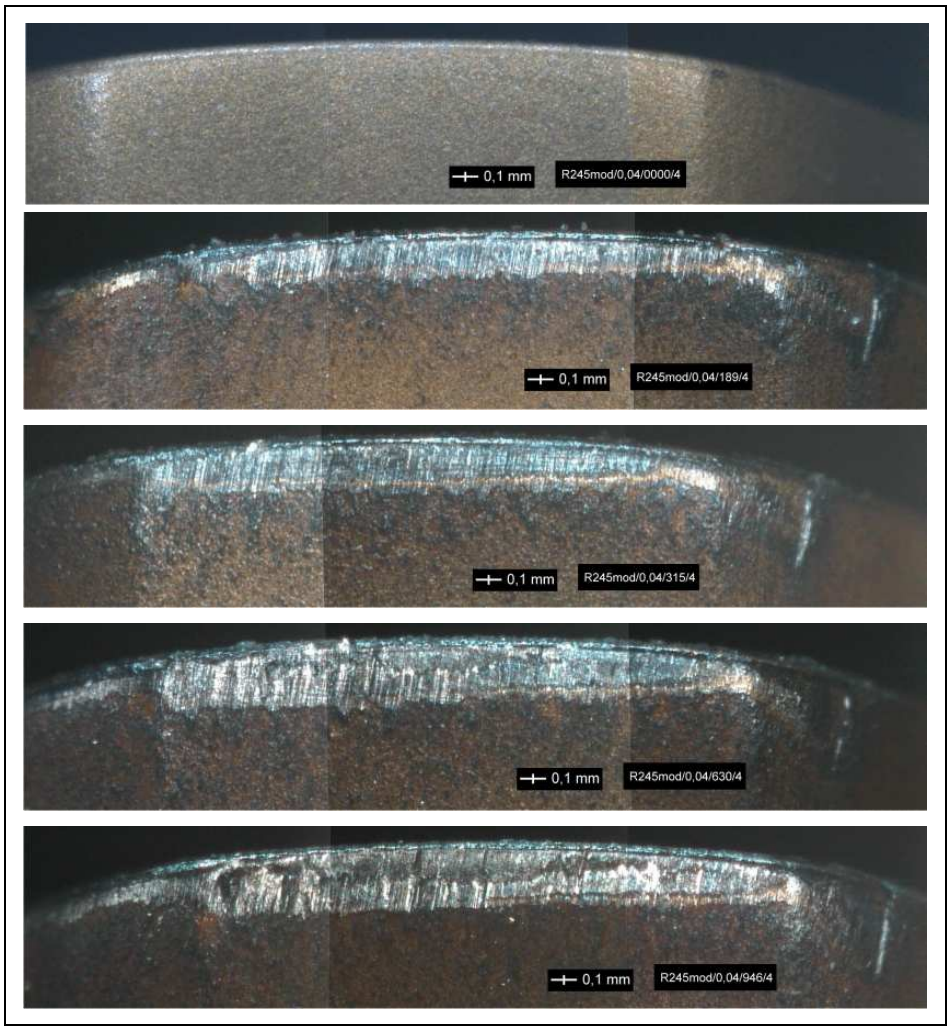
Tablica 54. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



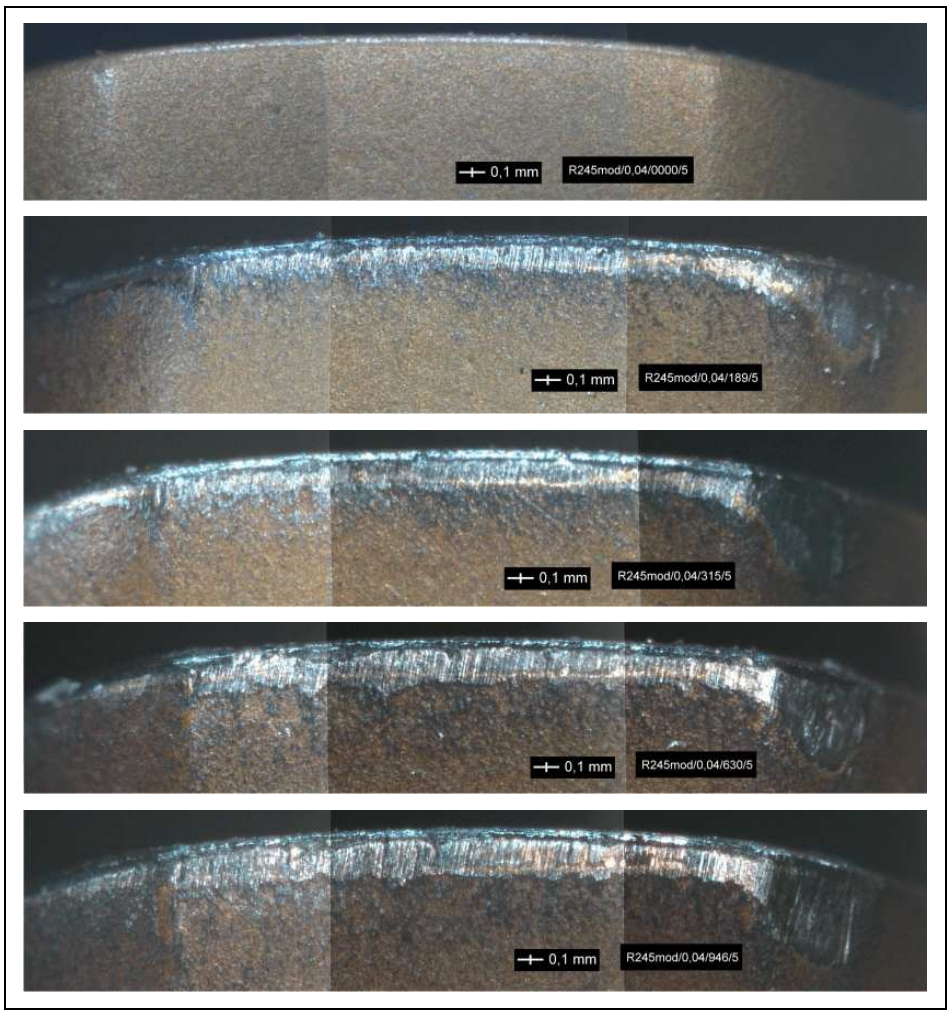
Tablica 55. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



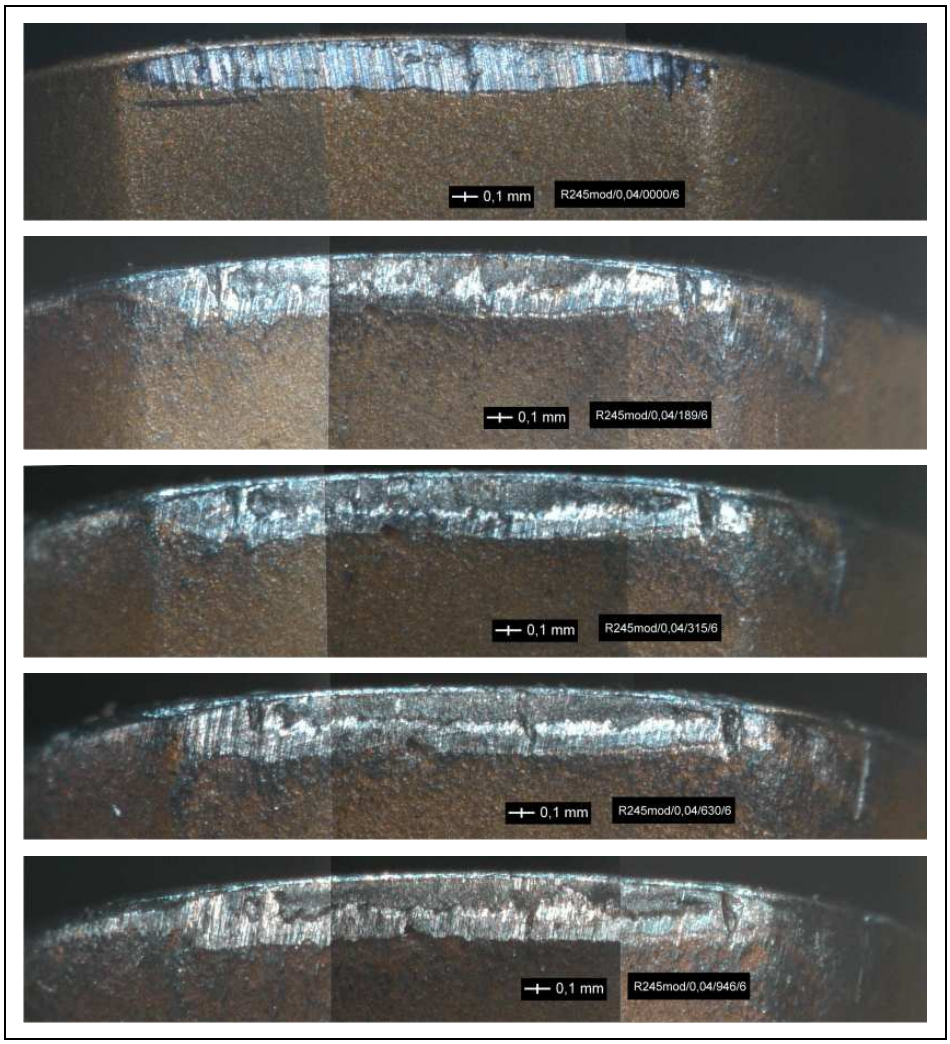
Tablica 56. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



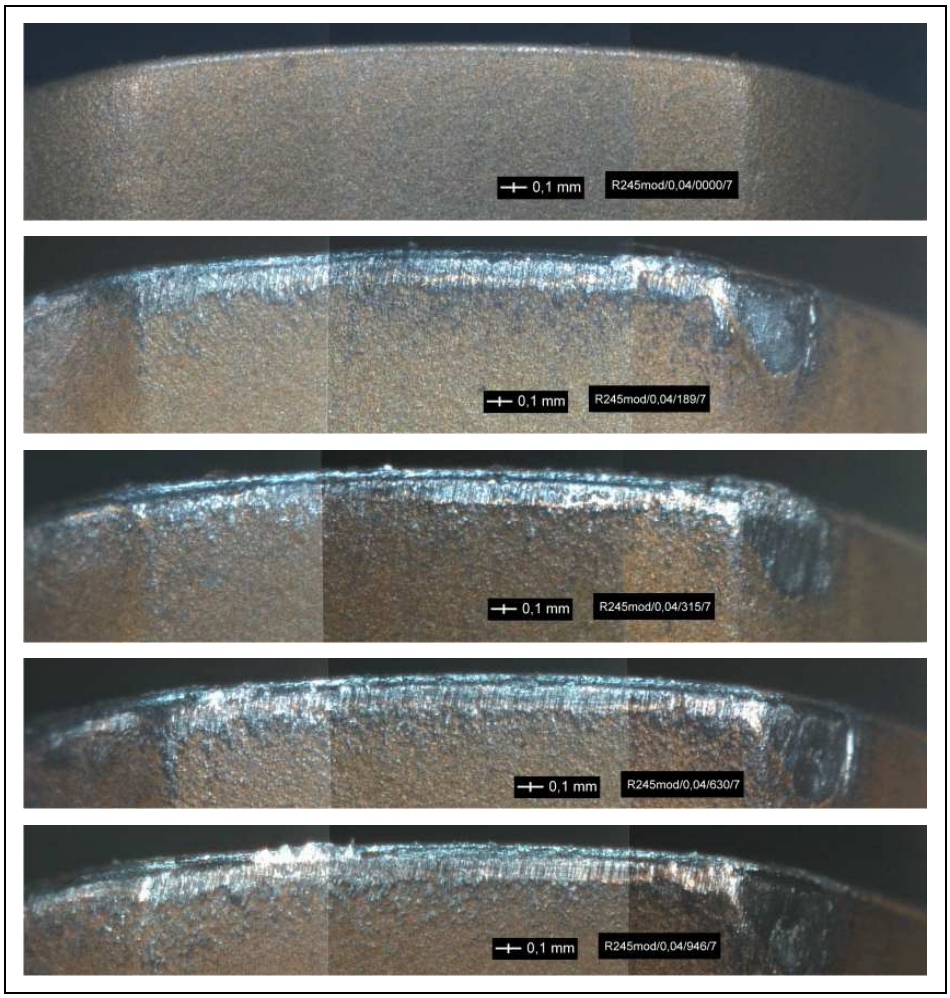
Tablica 57. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



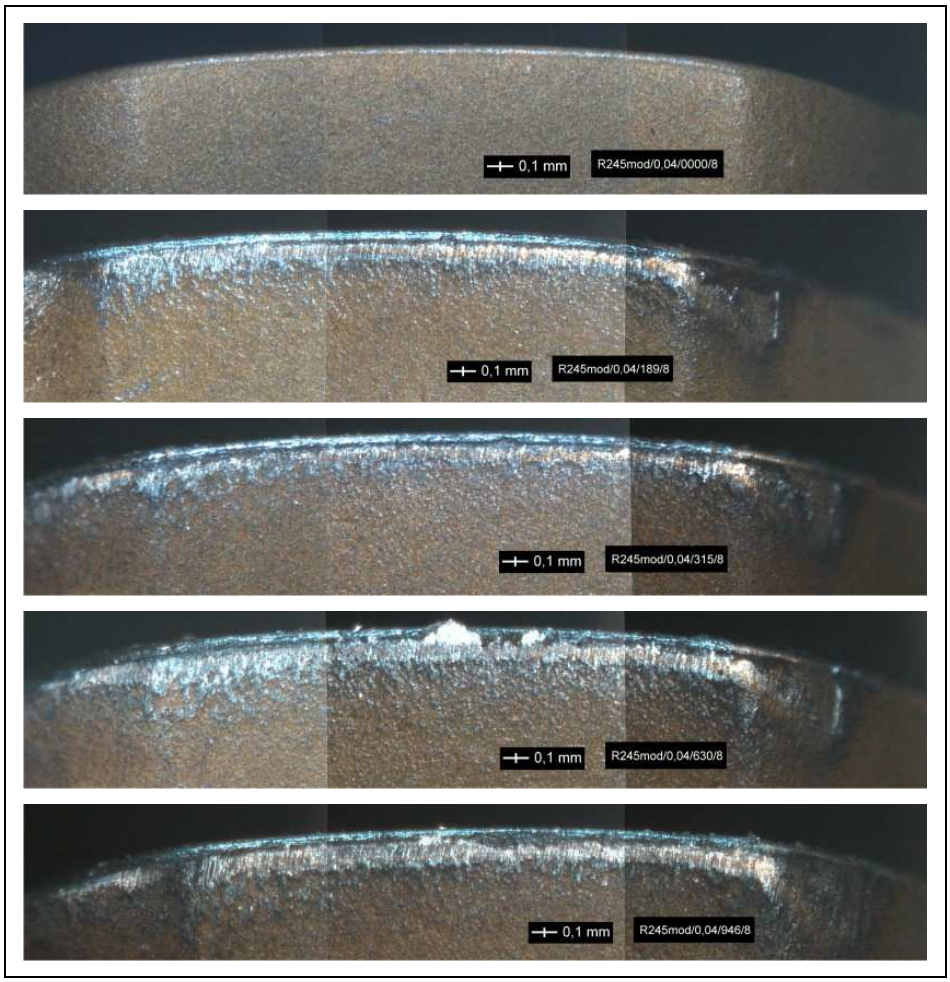
Tablica 58. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



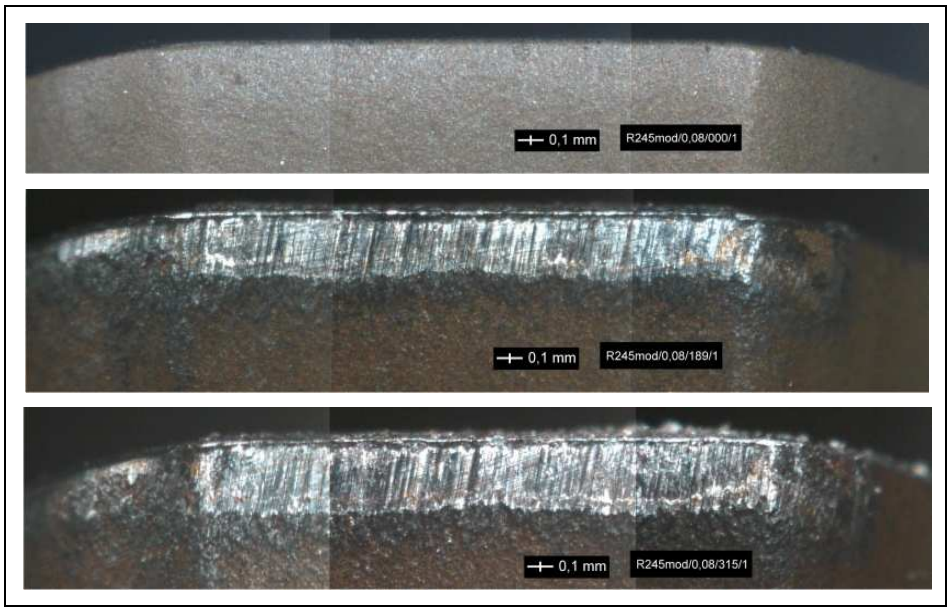
Tablica 59. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



Tablica 60. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



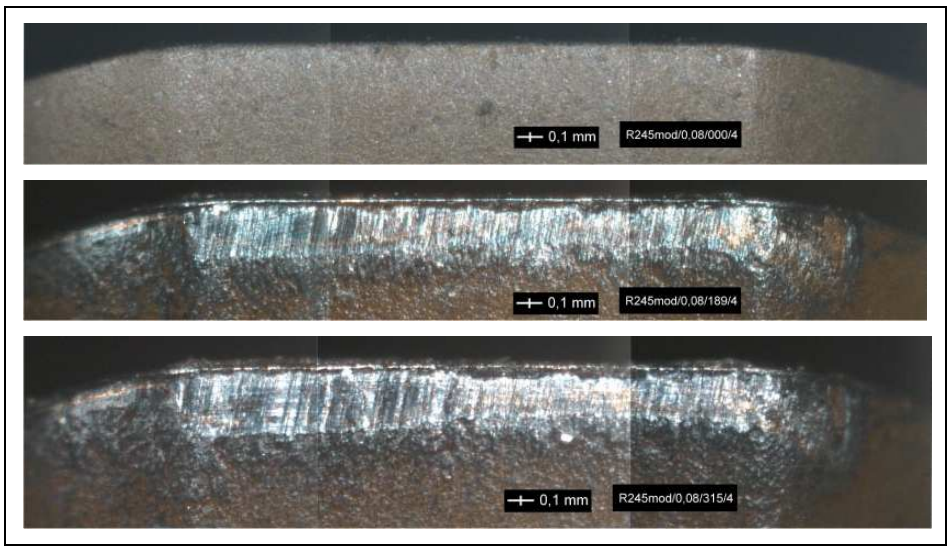
Tablica 61. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



Tablica 62. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.

Tablica 63. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.

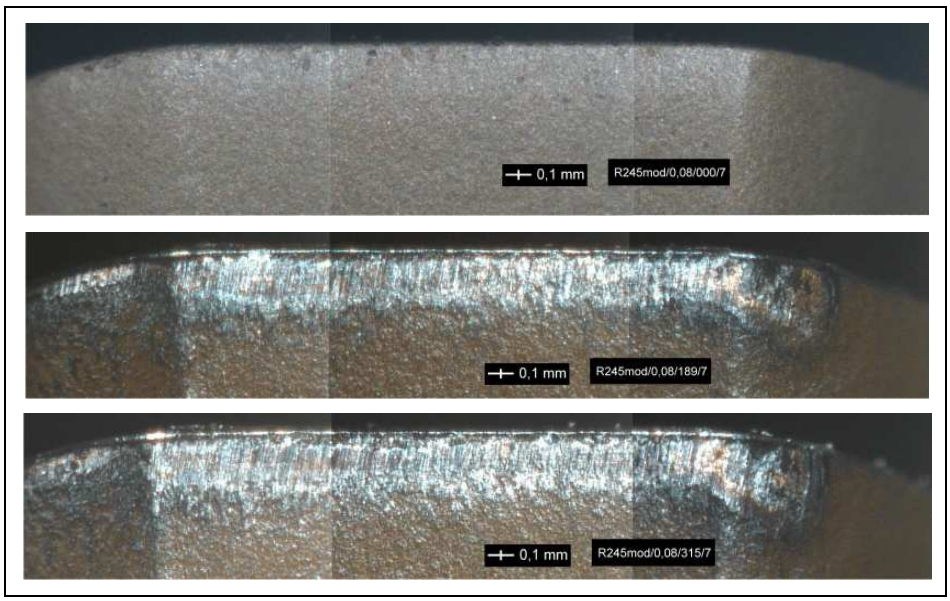
Tablica 64. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



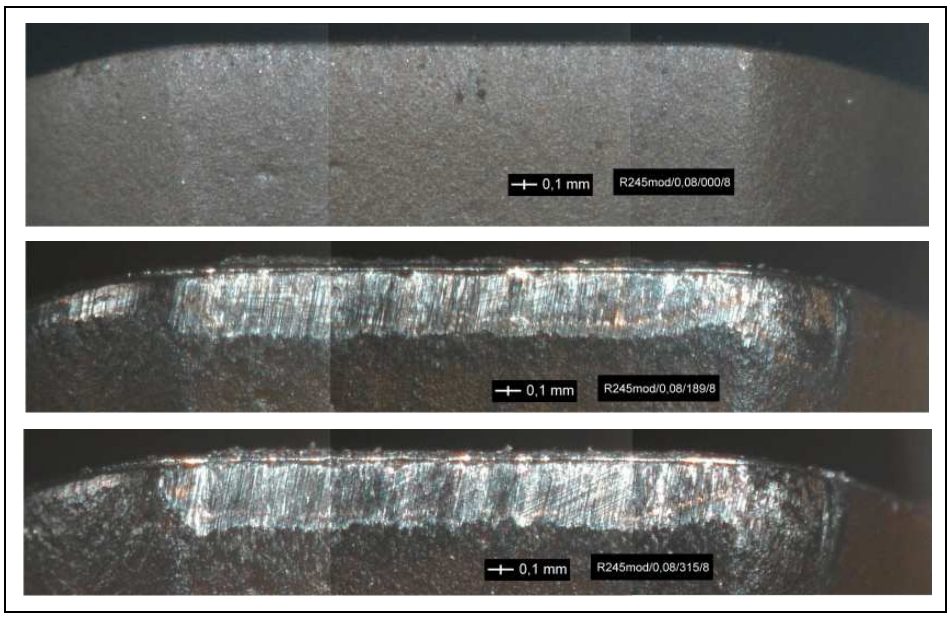
Tablica 65. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.

Tablica 66. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.

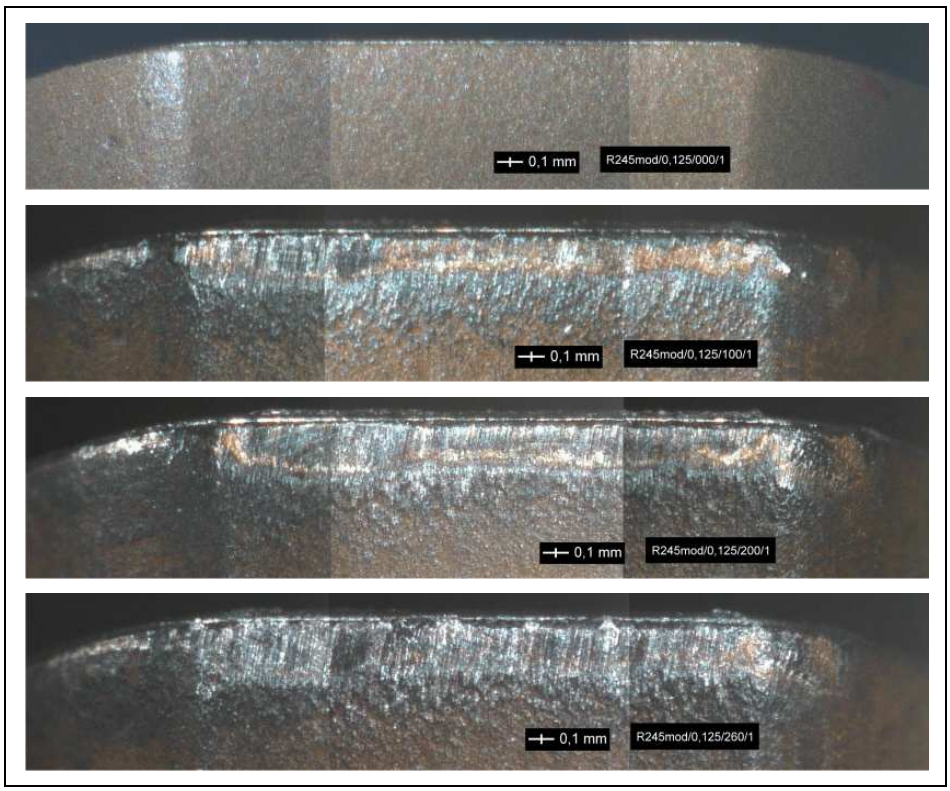
Tablica 67. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



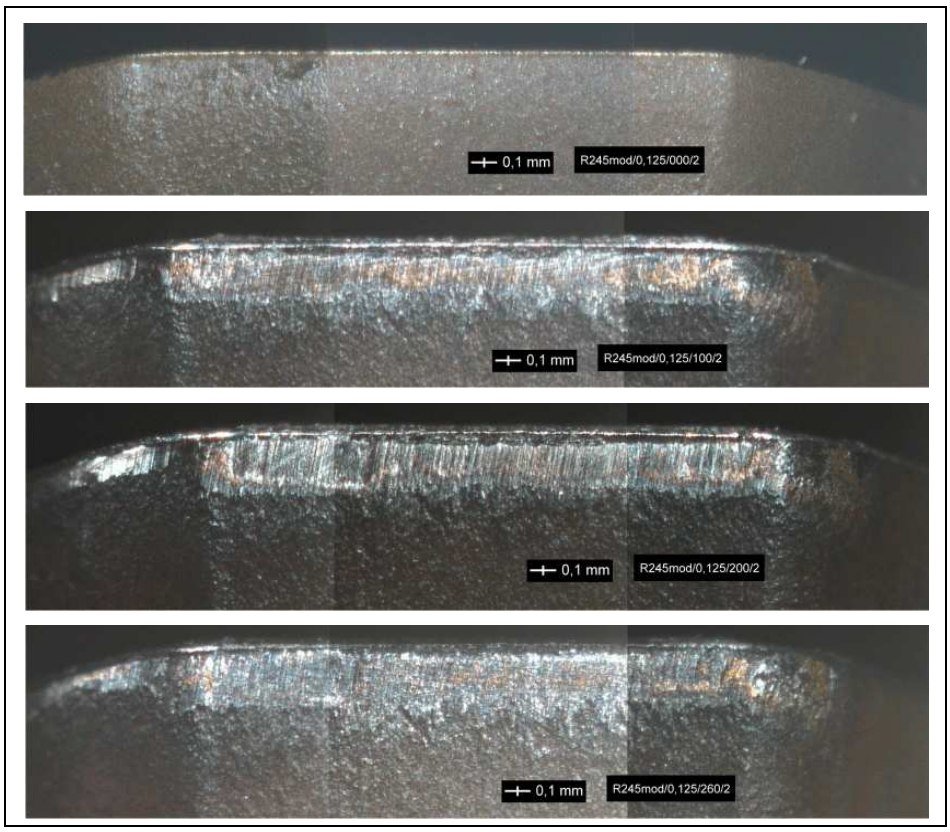
Tablica 68. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



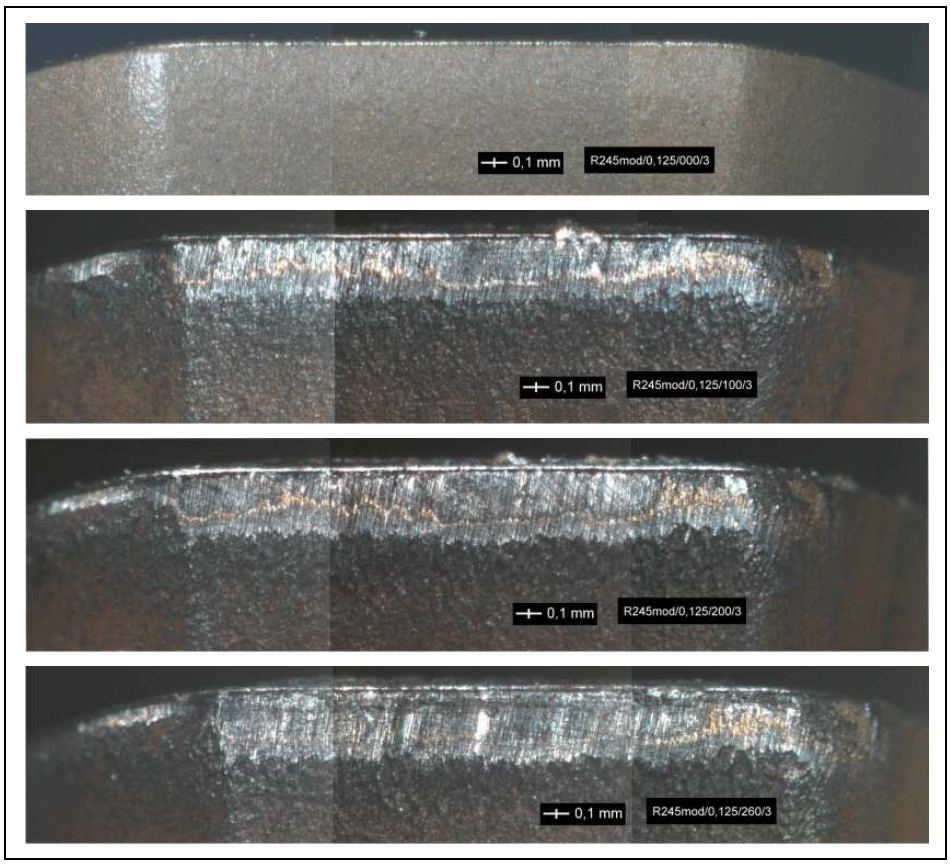
Tablica 69. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



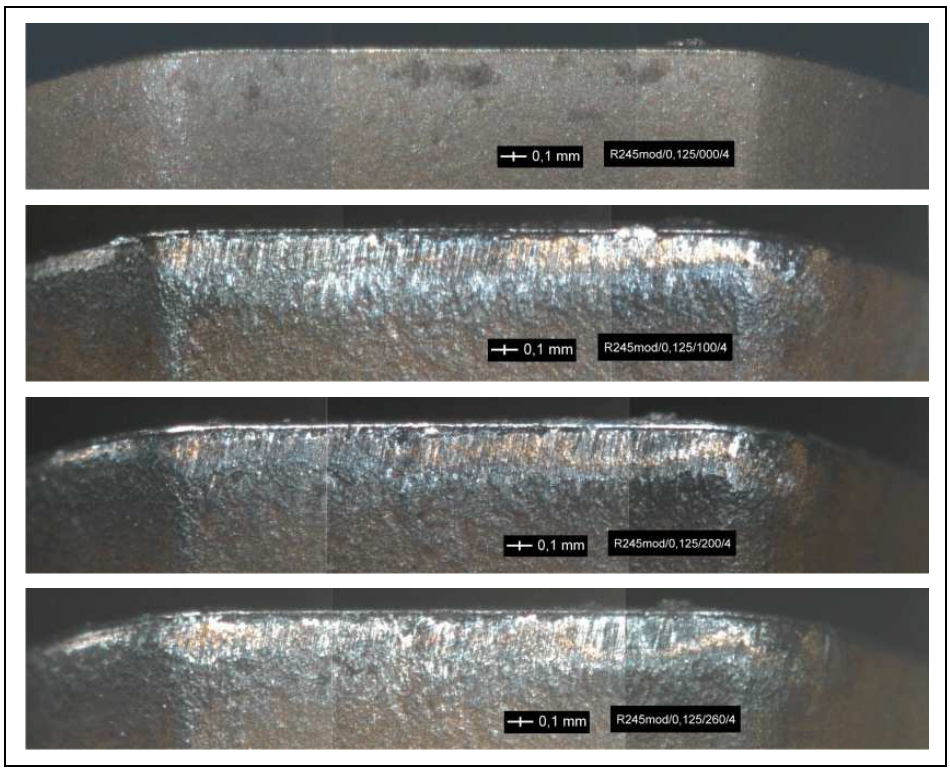
Tablica 70. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



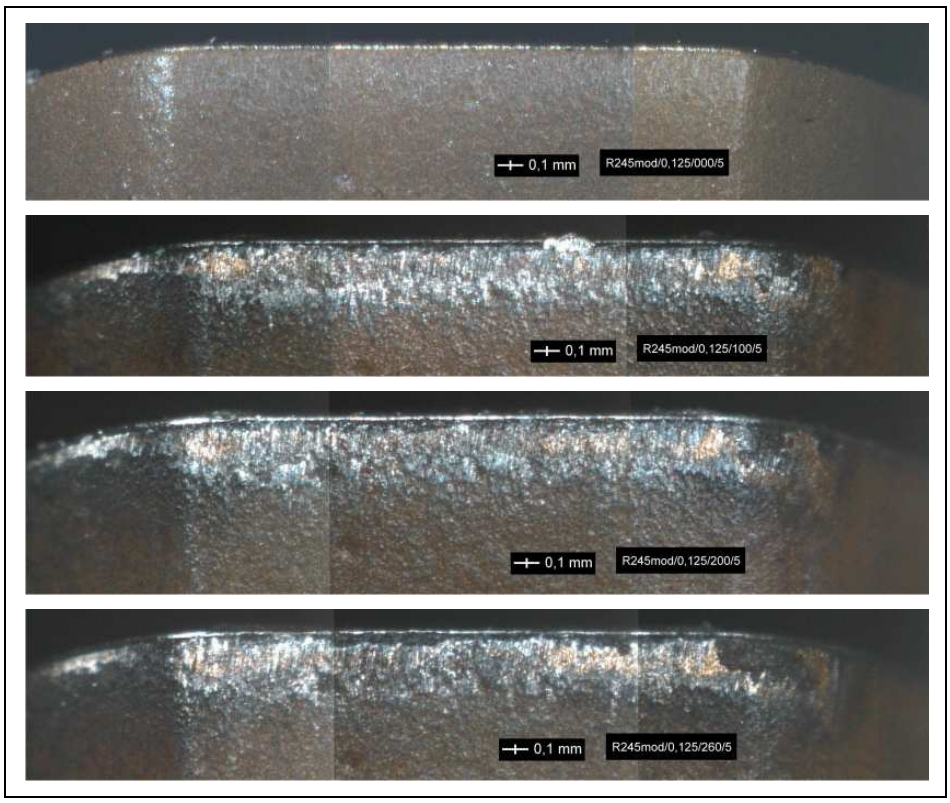
Tablica 71. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



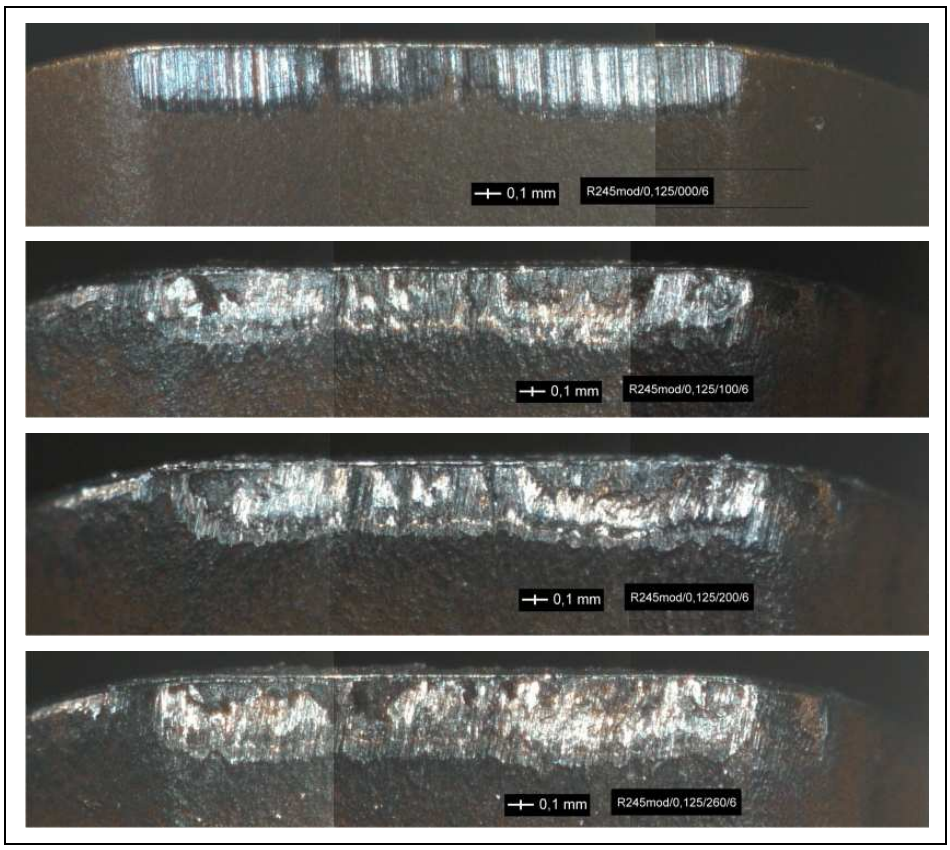
Tablica 72. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



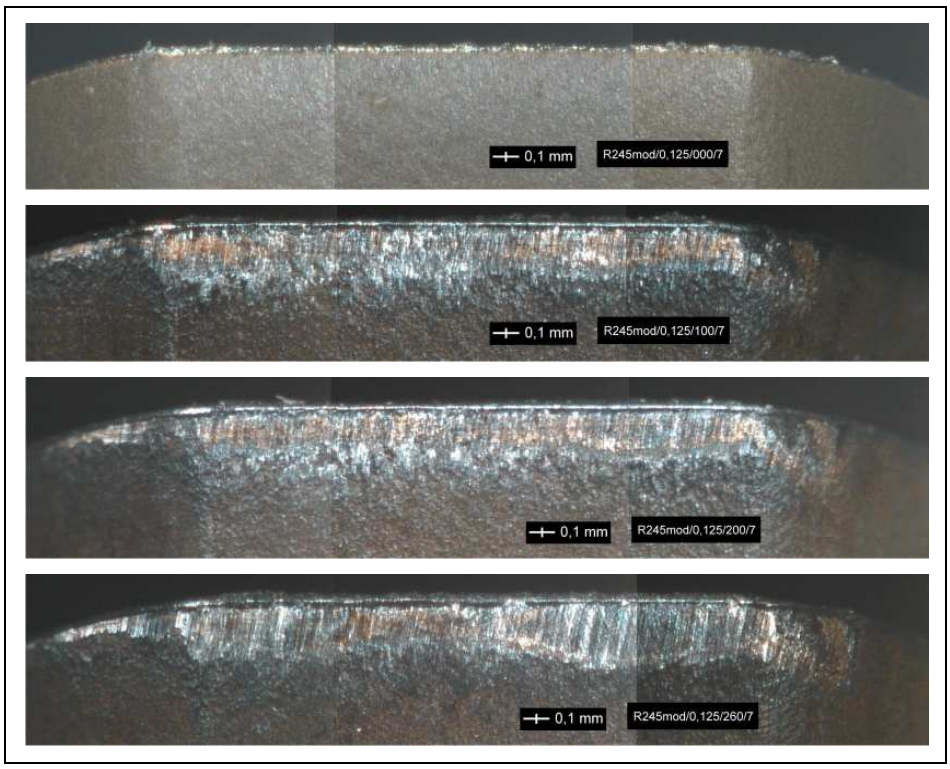
Tablica 73. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



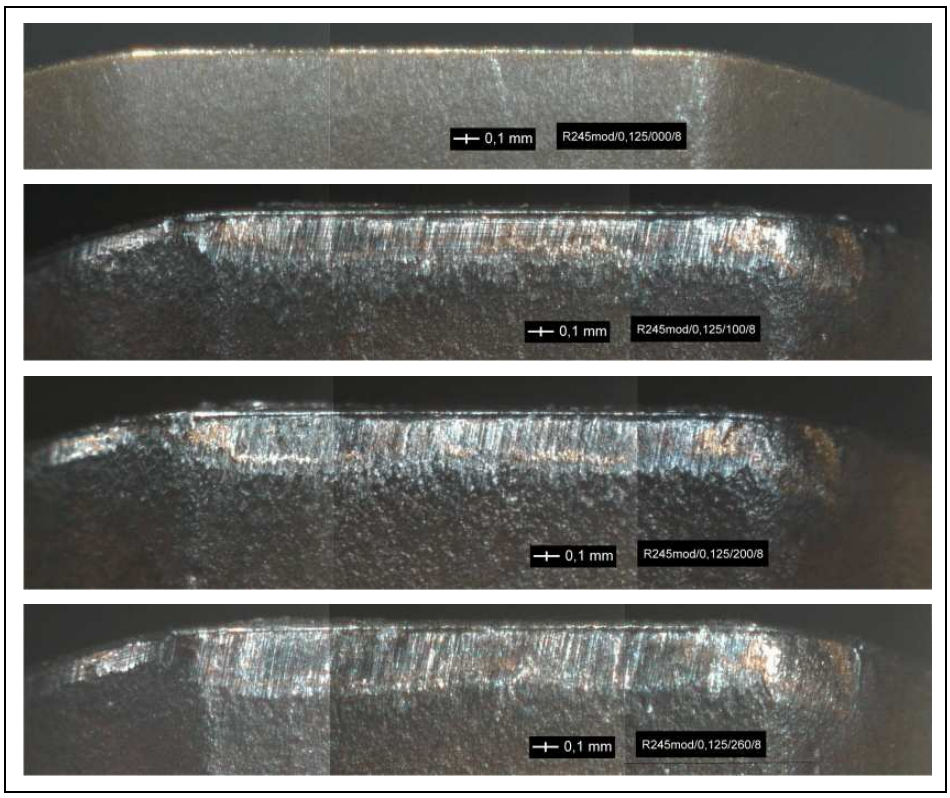
Tablica 74. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



Tablica 75. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



Tablica 76. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R245mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.

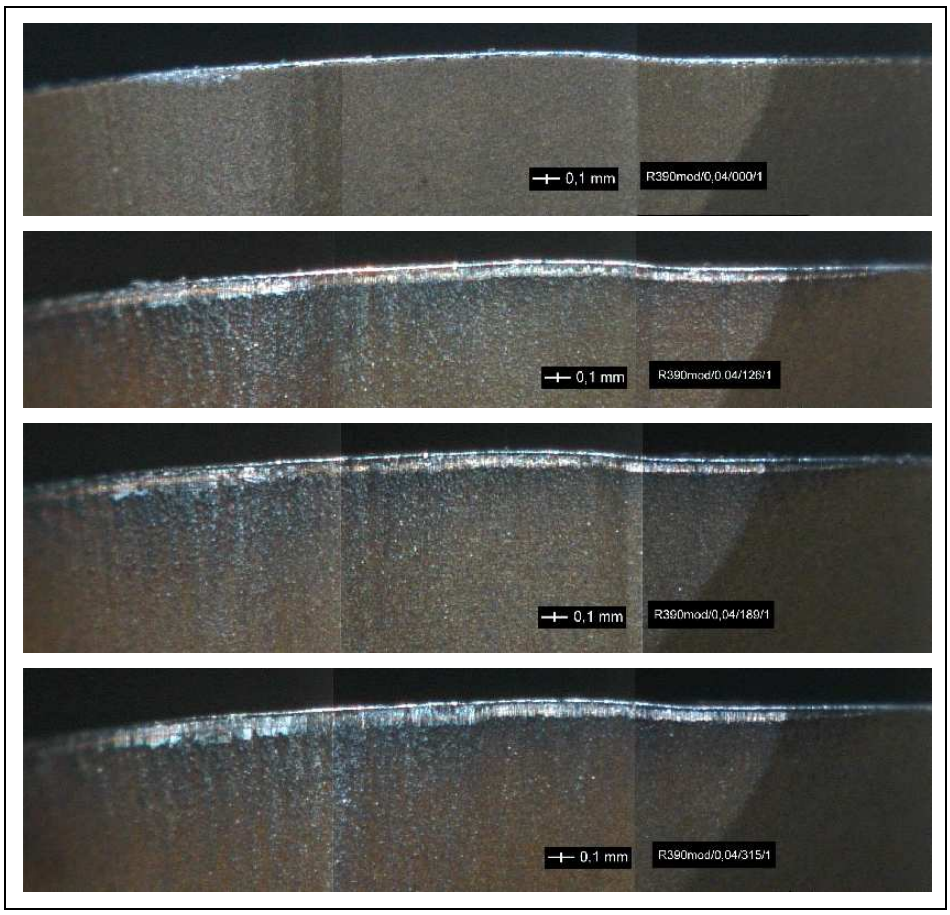


Załącznik nr 4

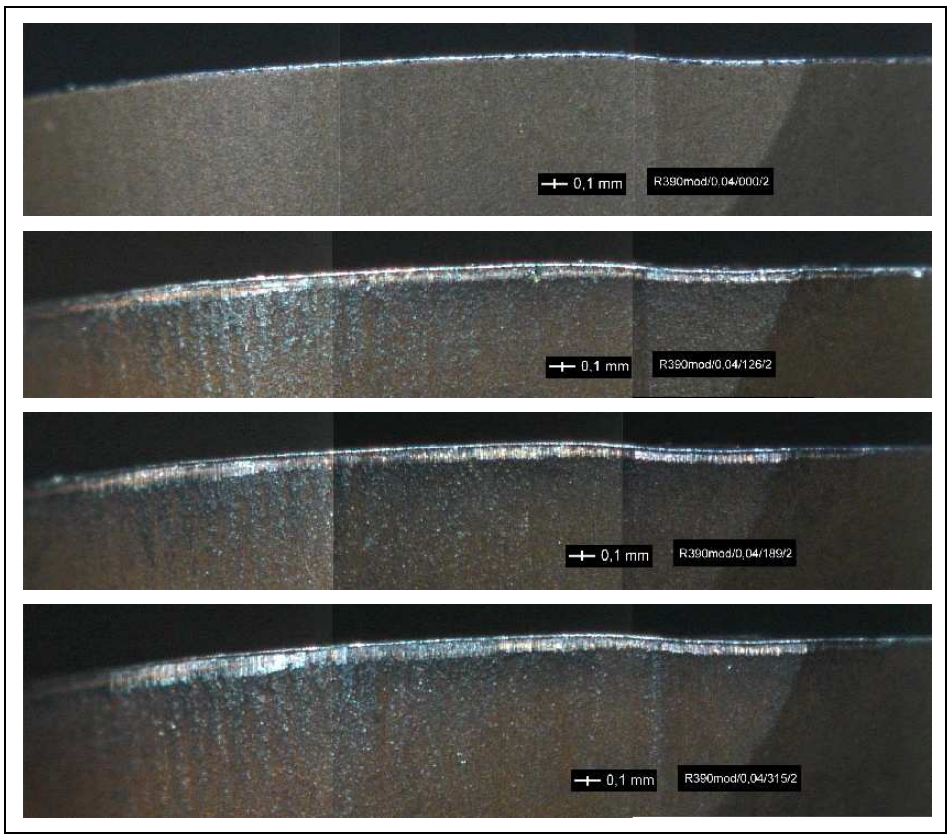
Zużycie ostrzy dla głowicy frezowej R390mod

Tablice 77 – 100

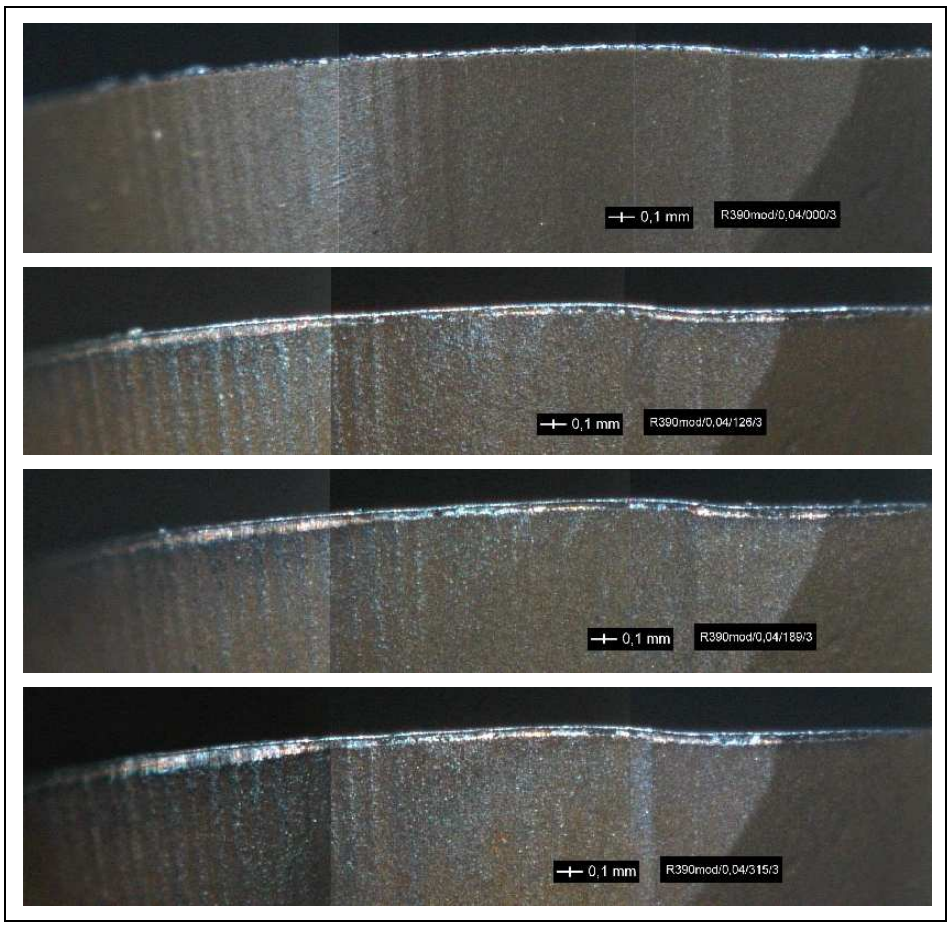
Tablica 77. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



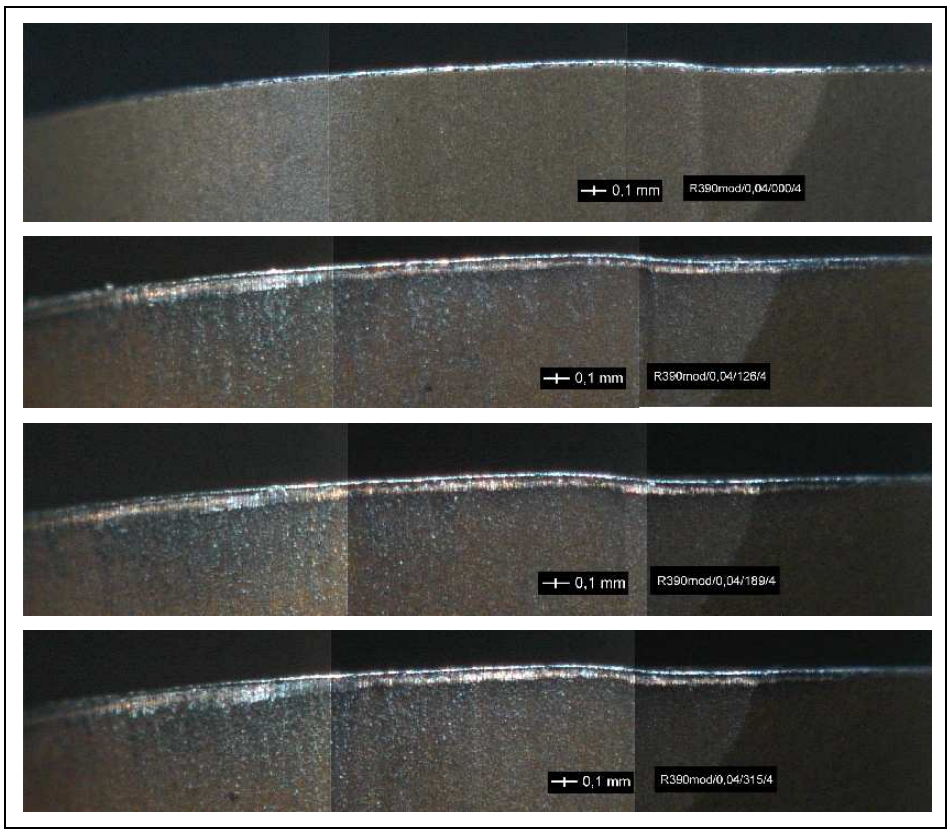
Tablica 78. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



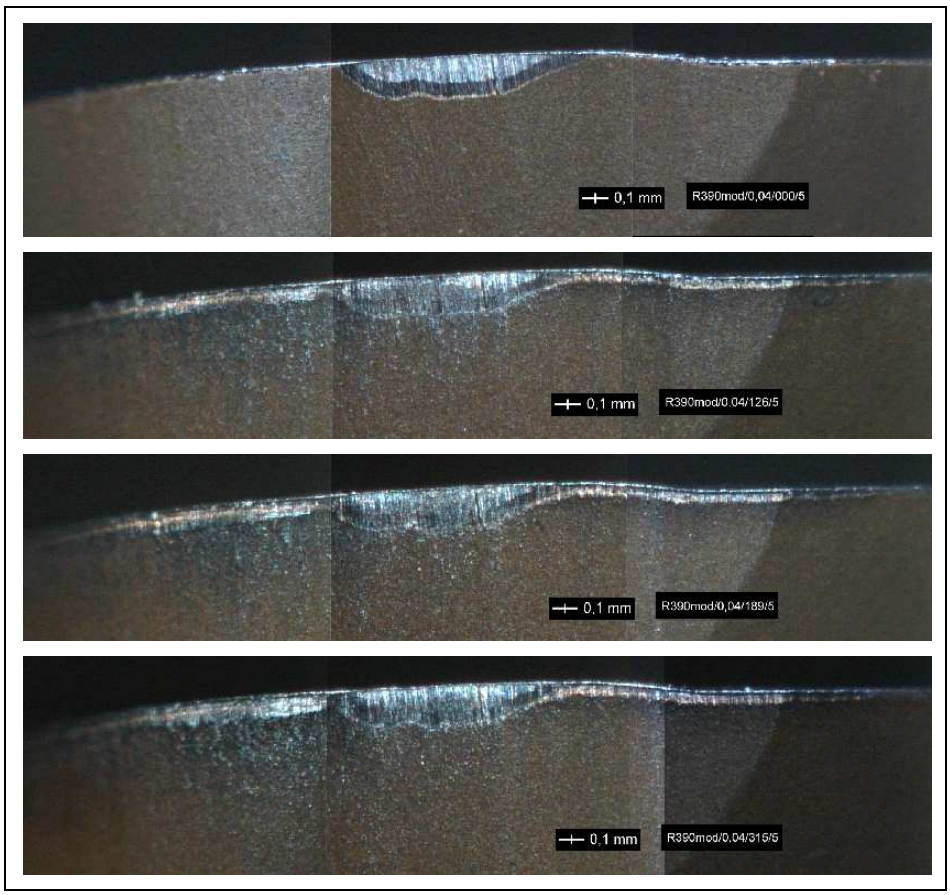
Tablica 79. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



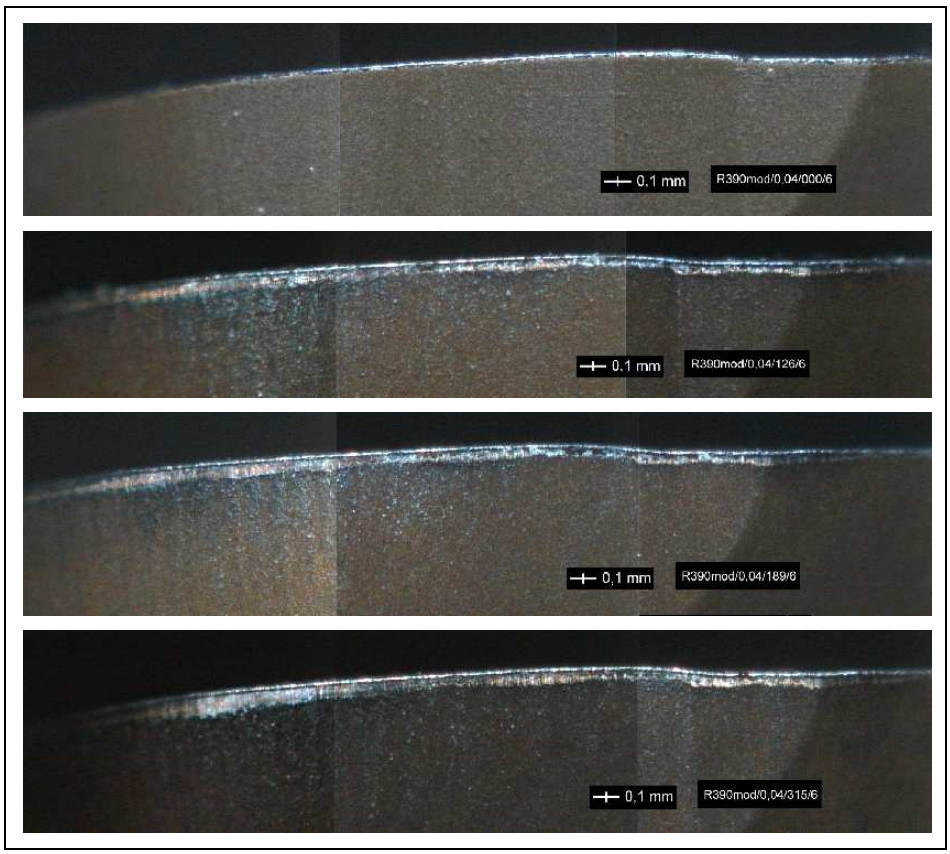
Tablica 80. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



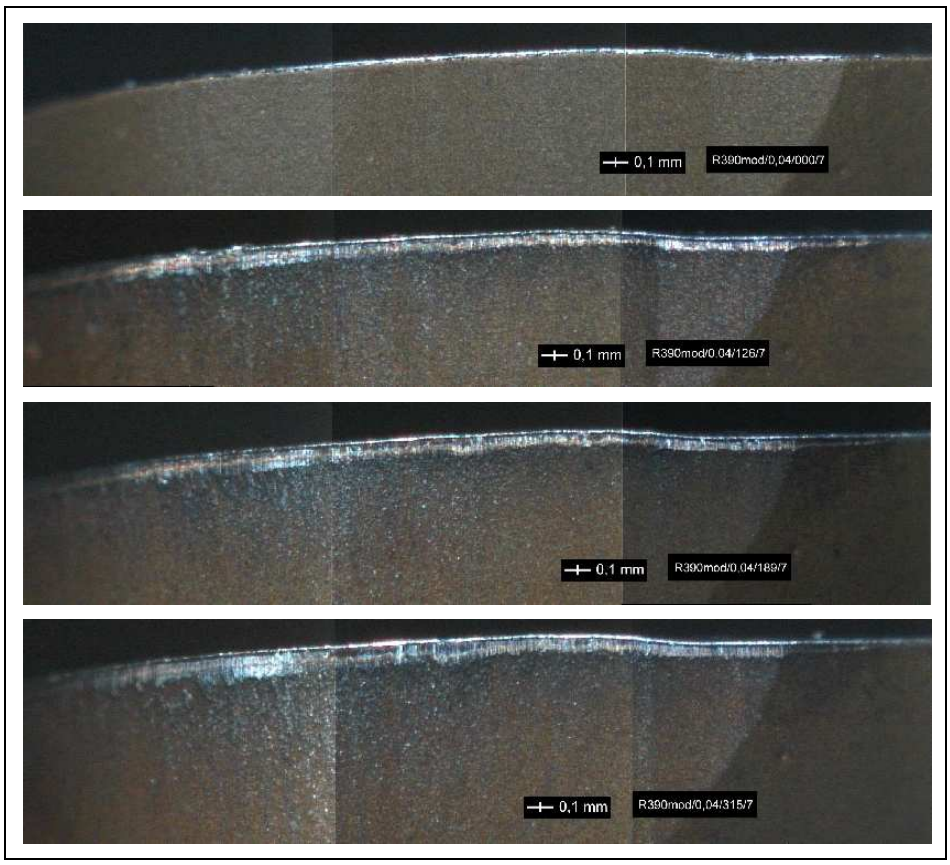
Tablica 81. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



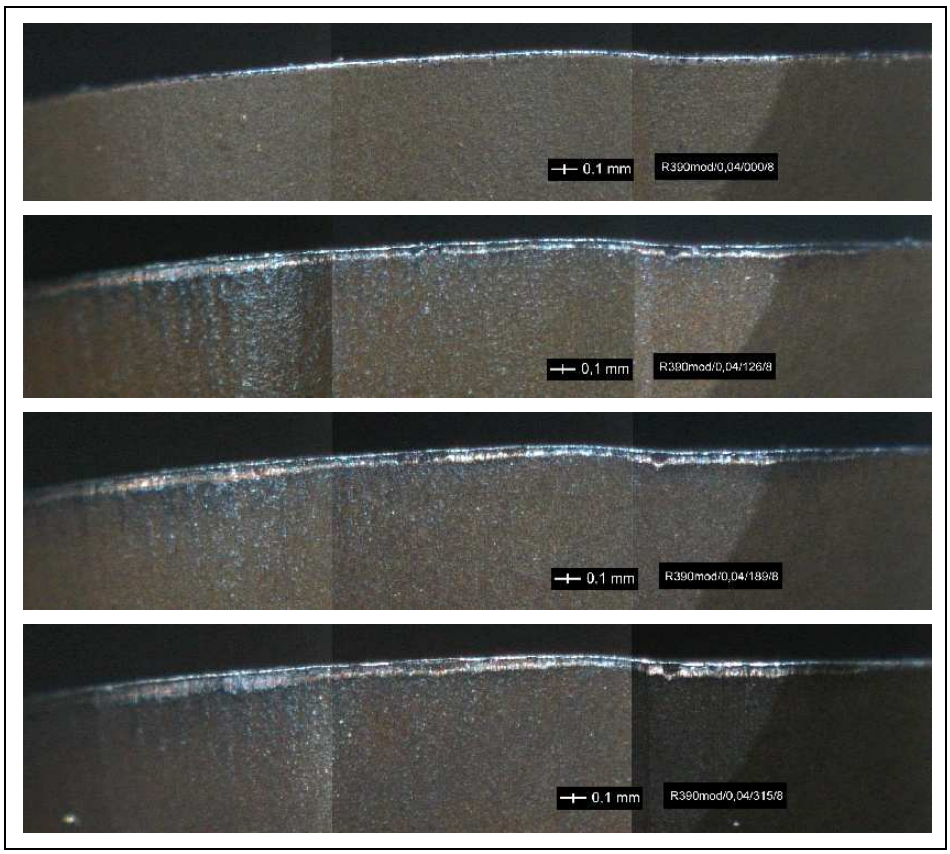
Tablica 82. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



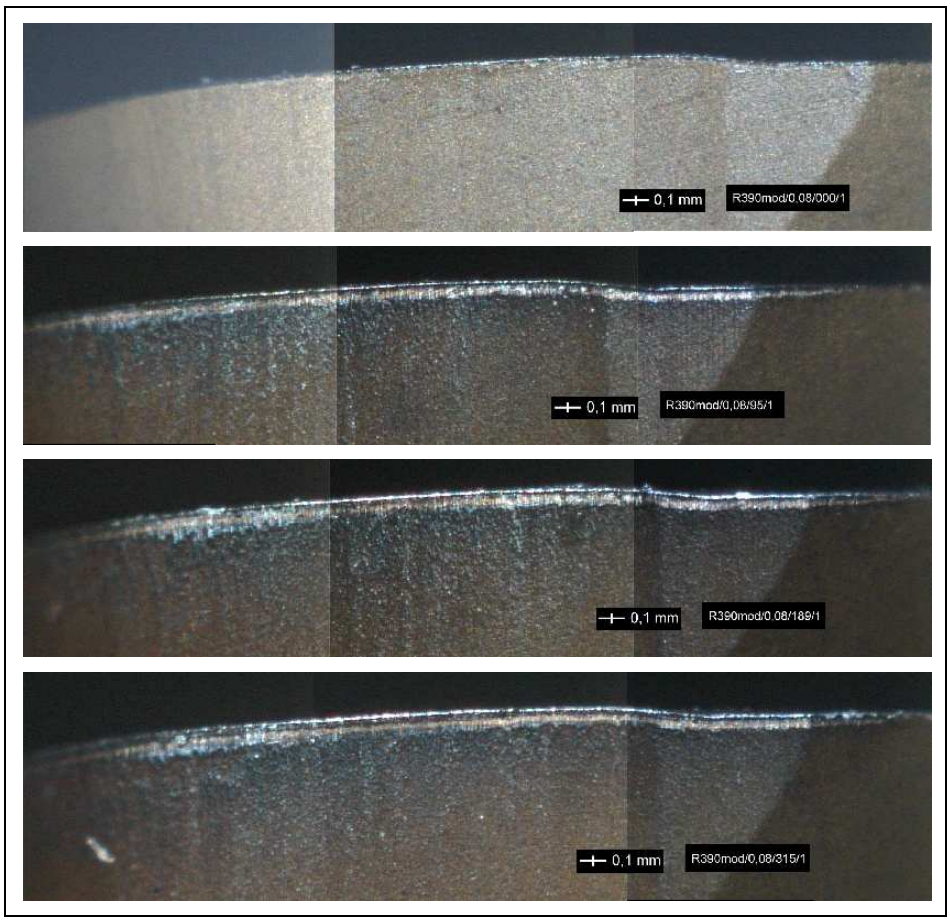
Tablica 83. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



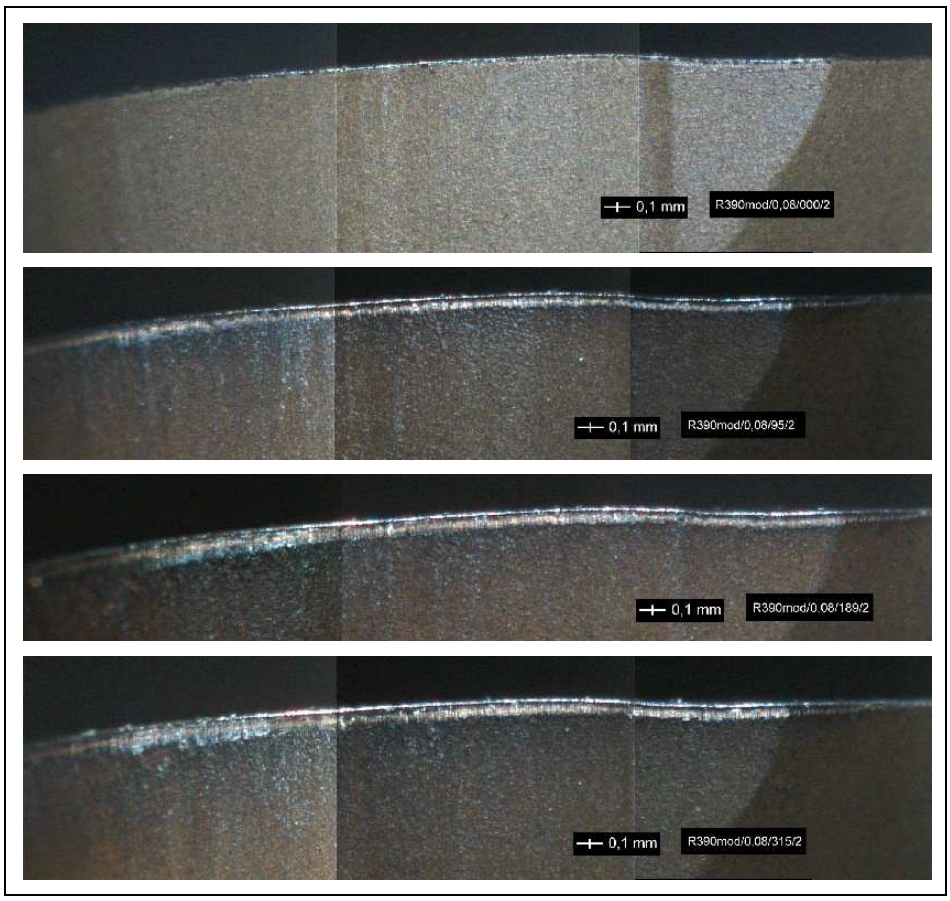
Tablica 84. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 355$ mm/min.



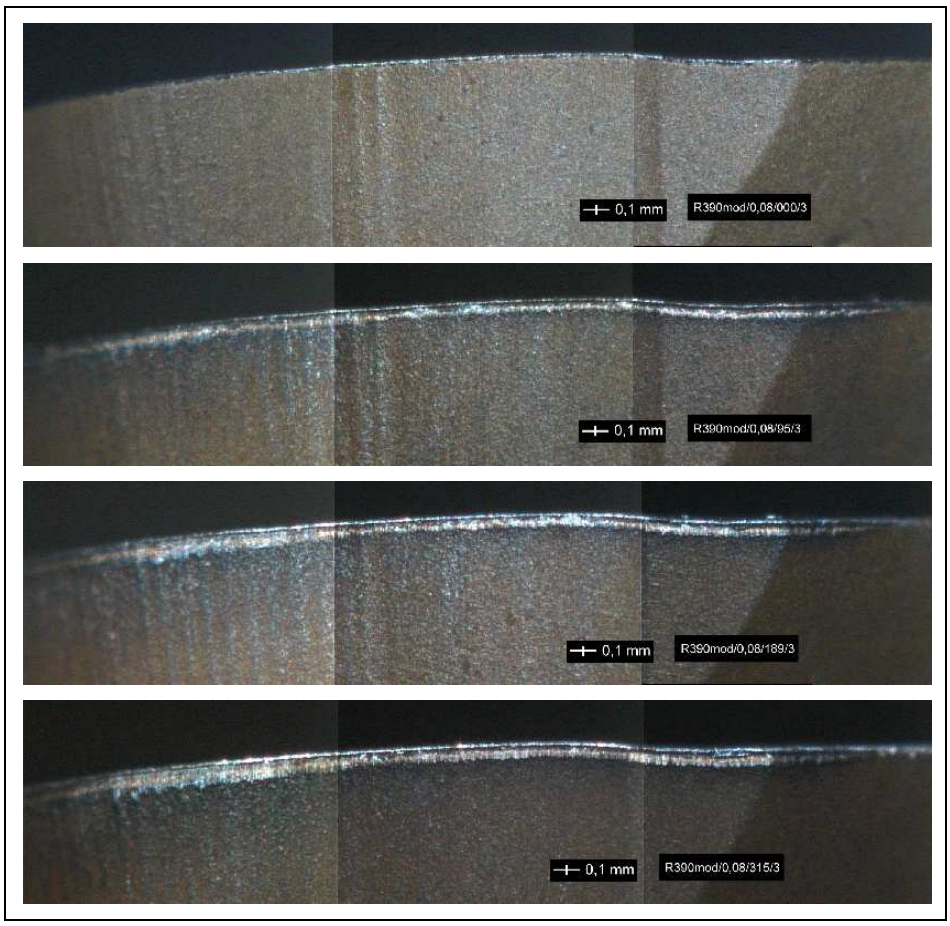
Tablica 85. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



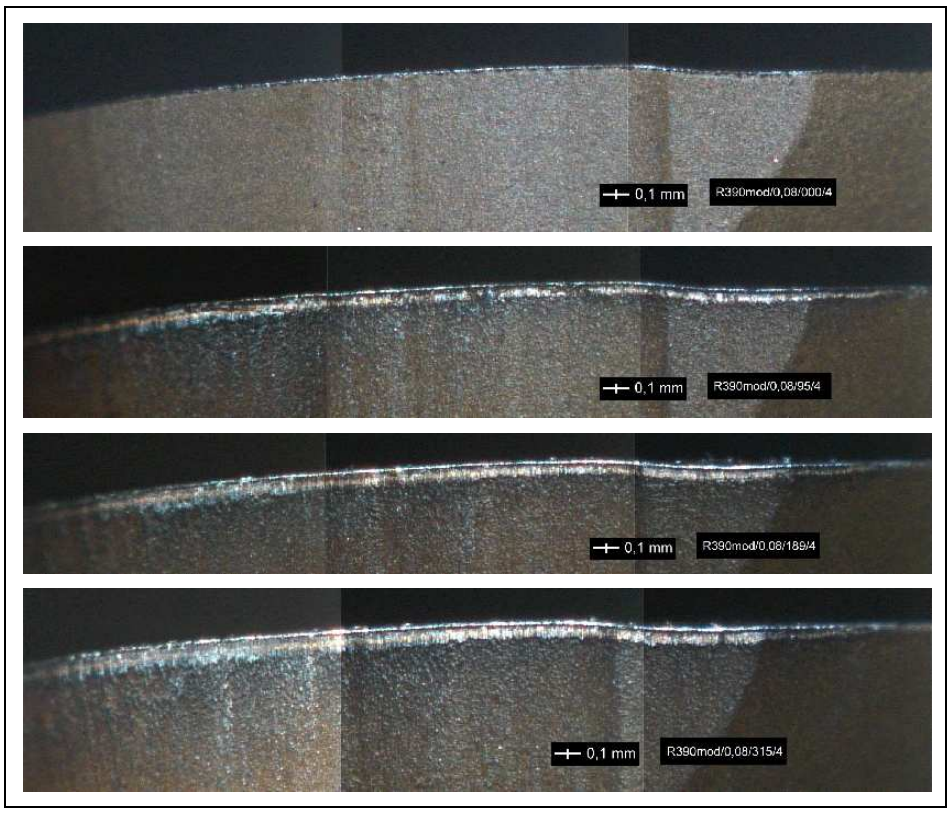
Tablica 86. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



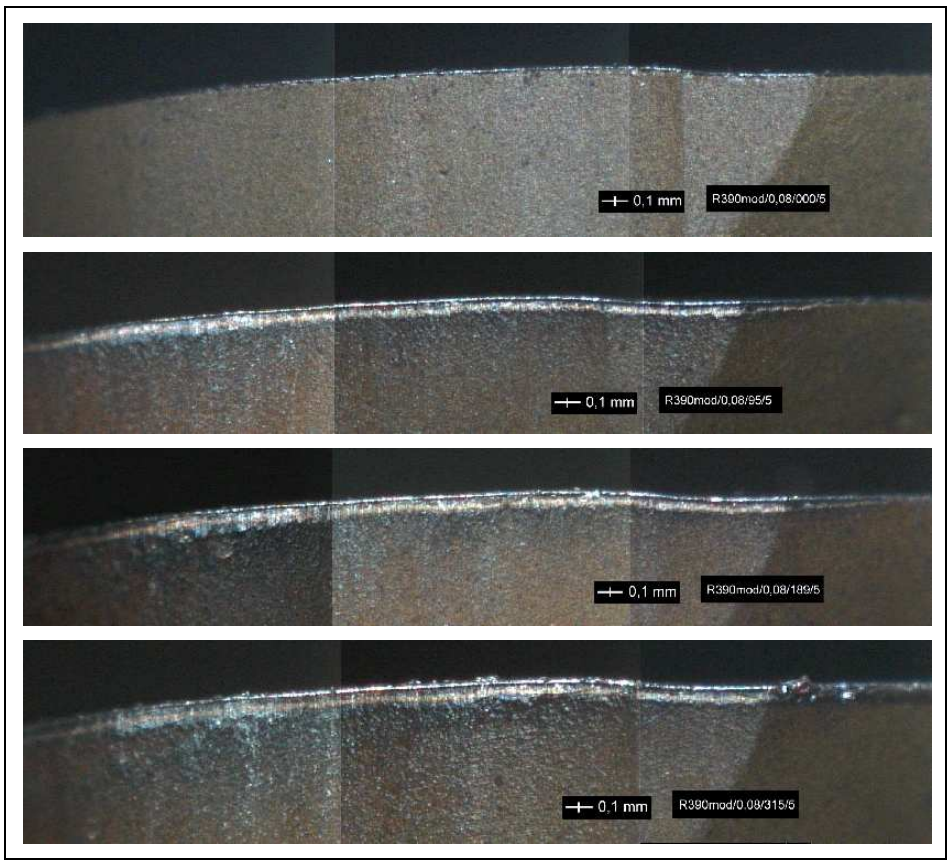
Tablica 87. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



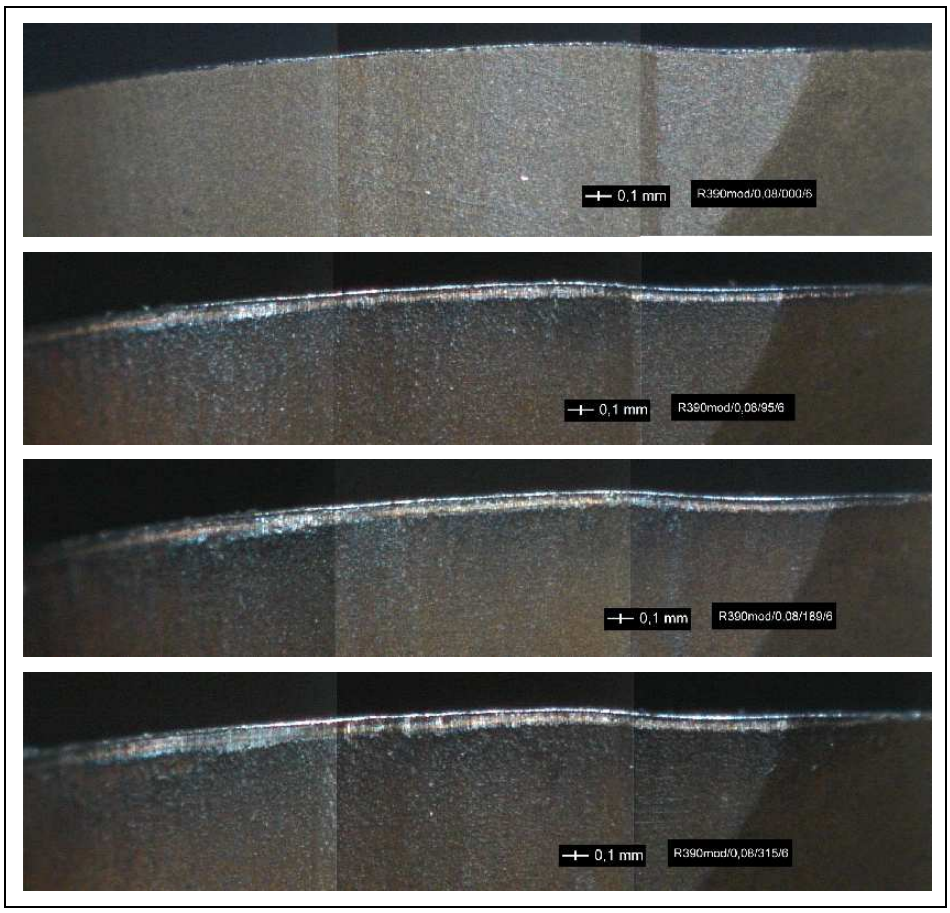
Tablica 88. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



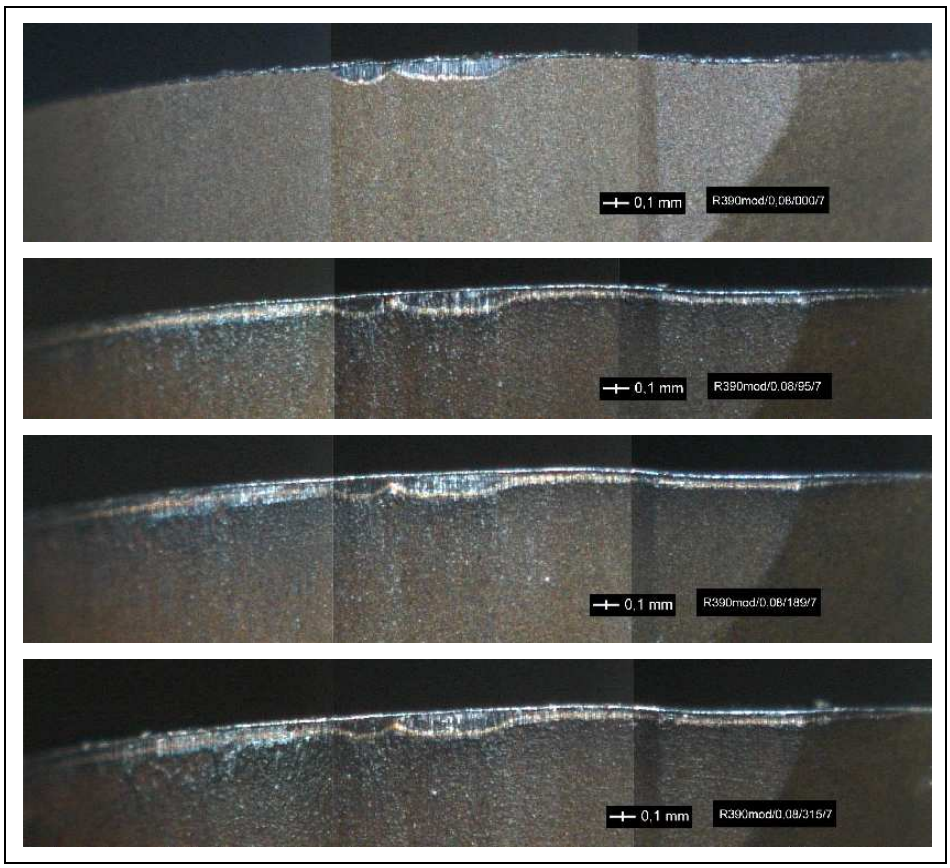
Tablica 89. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



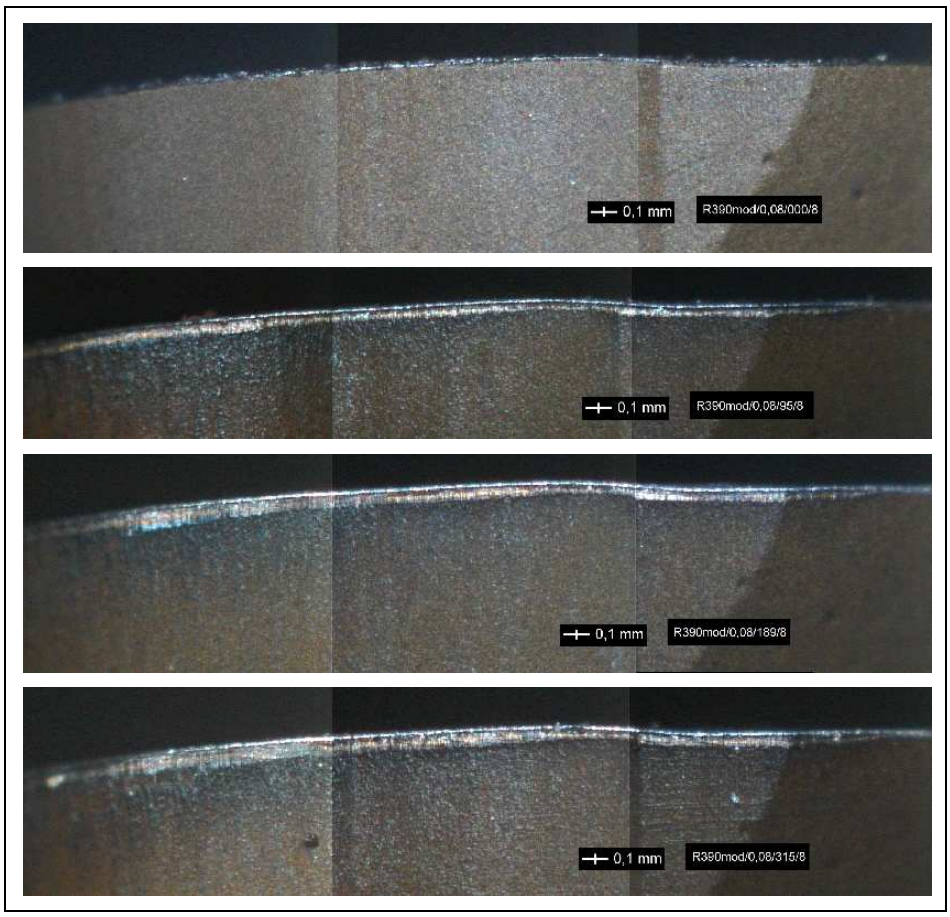
Tablica 90. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



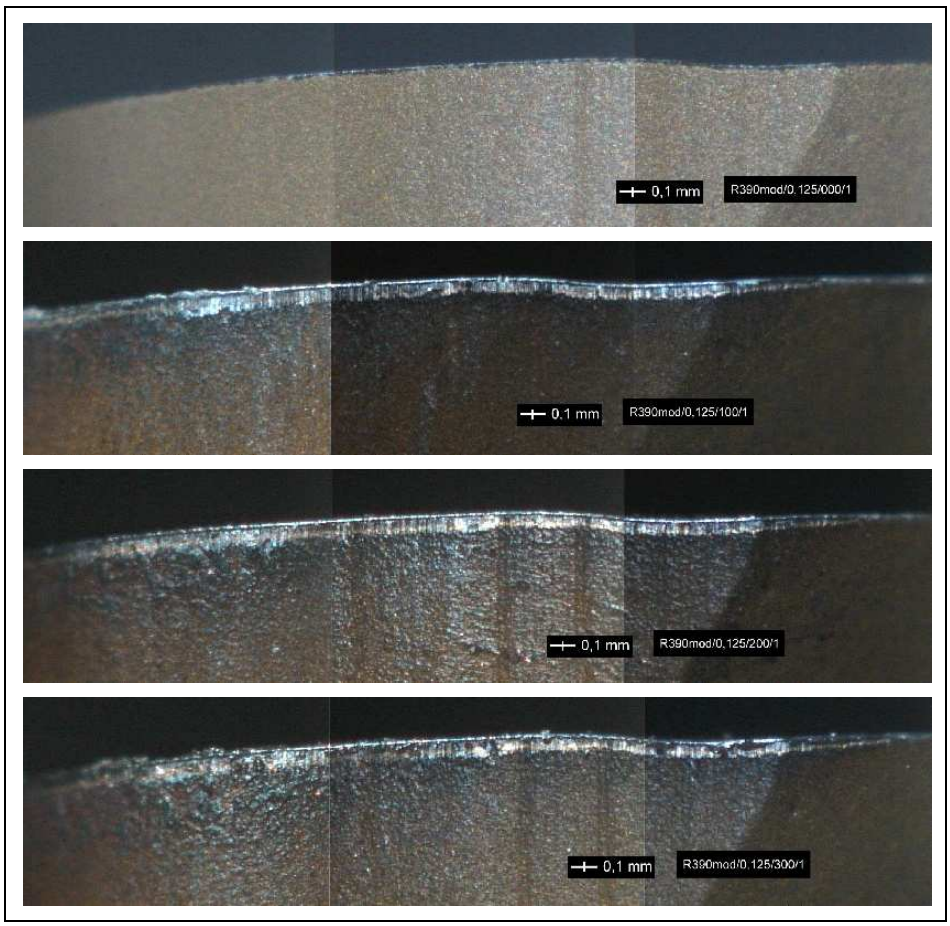
Tablica 91. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



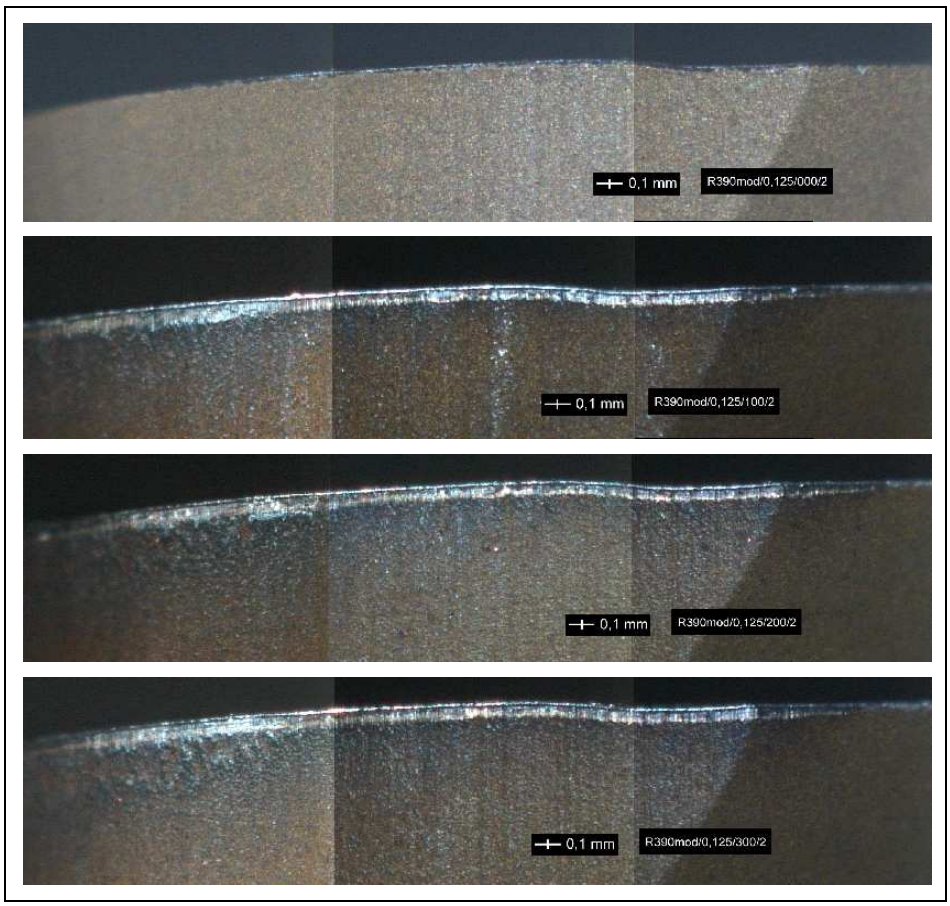
Tablica 92. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 710$ mm/min.



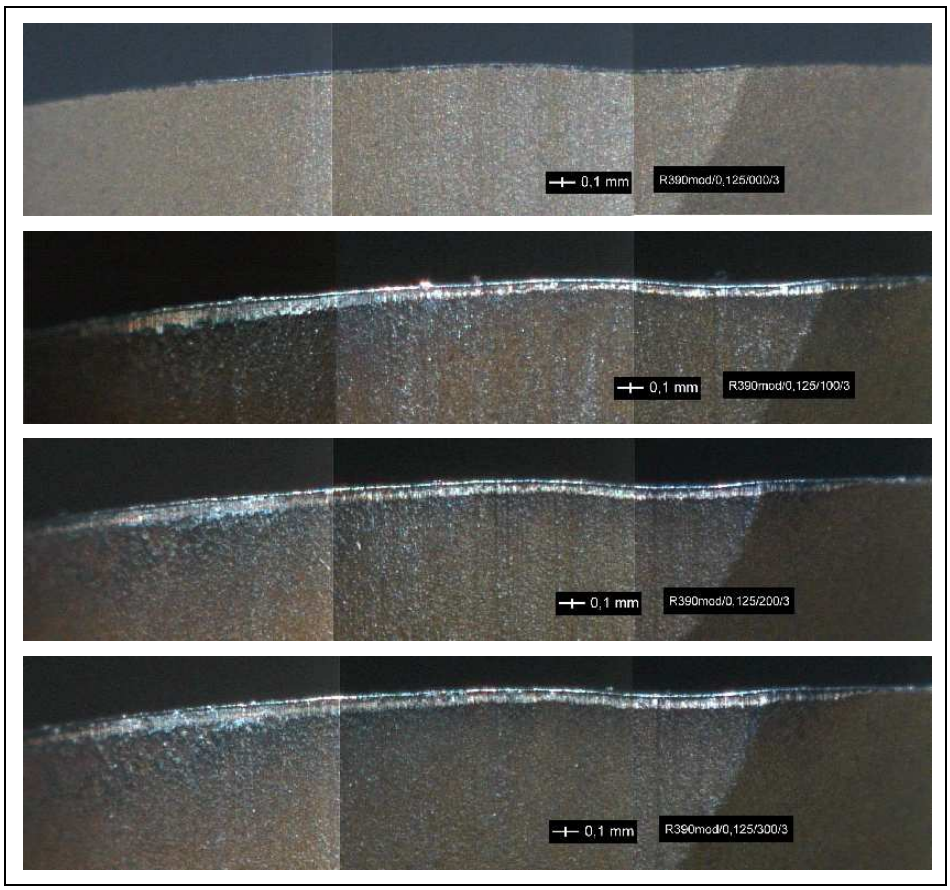
Tablica 93. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 1 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



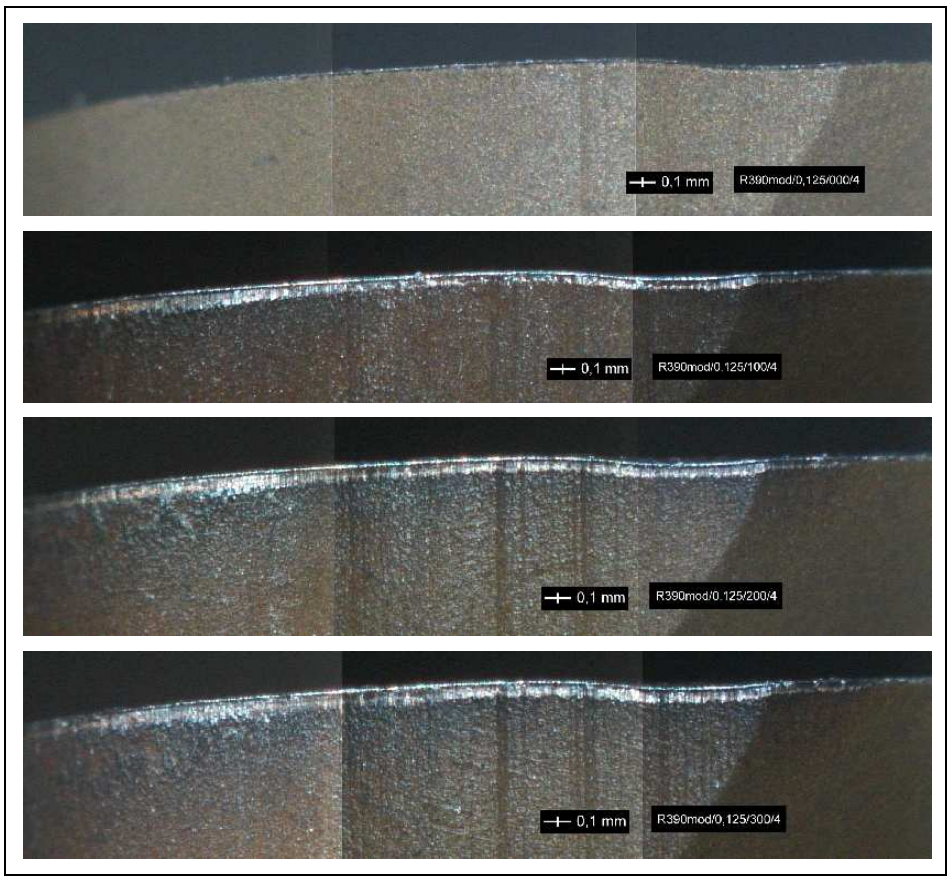
Tablica 94. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 2 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



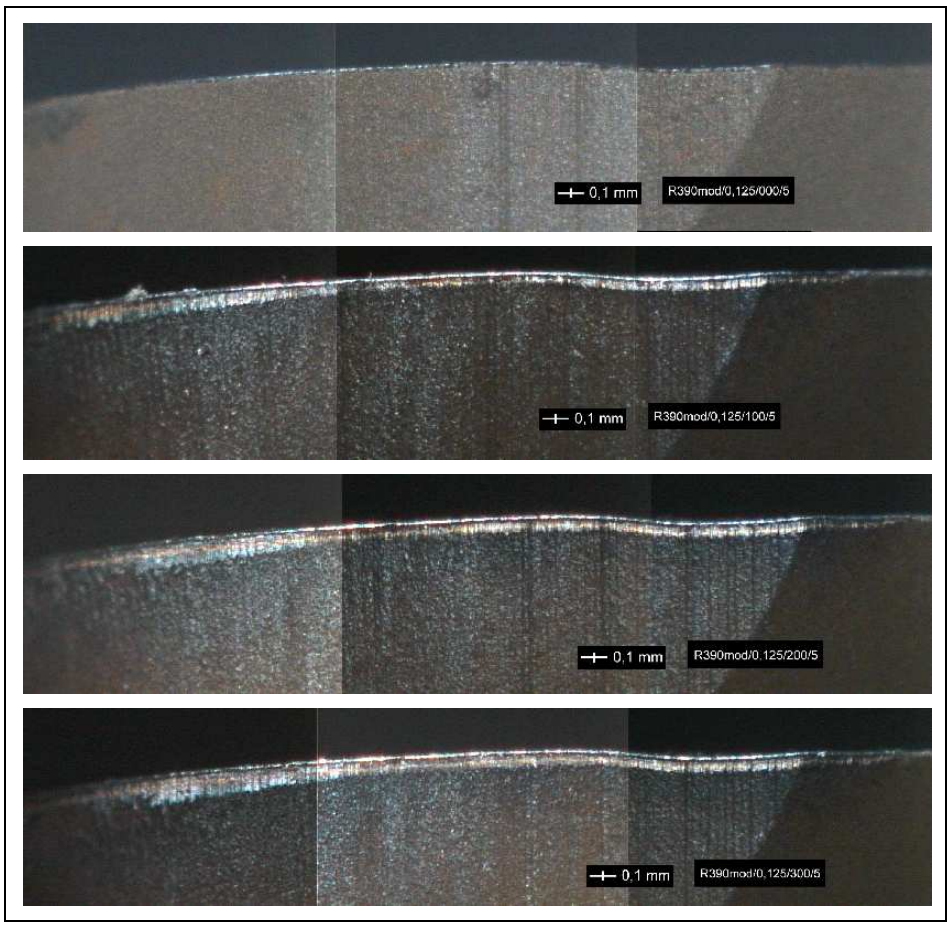
Tablica 95. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 3 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



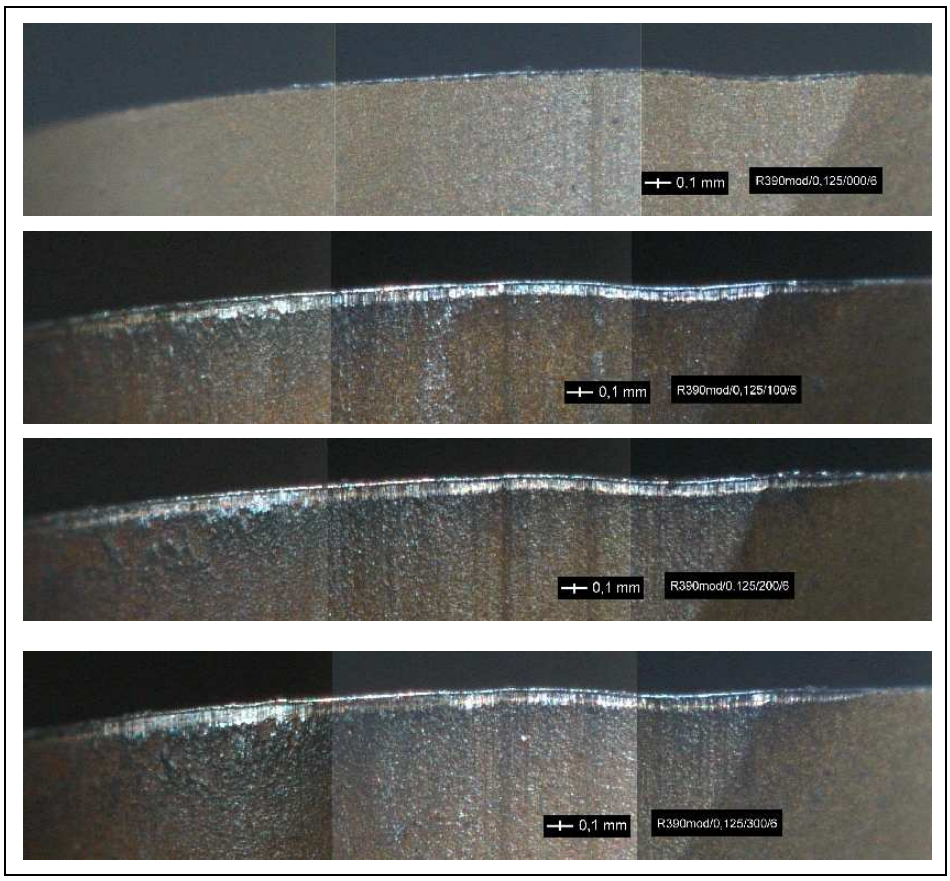
Tablica 96. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 4 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



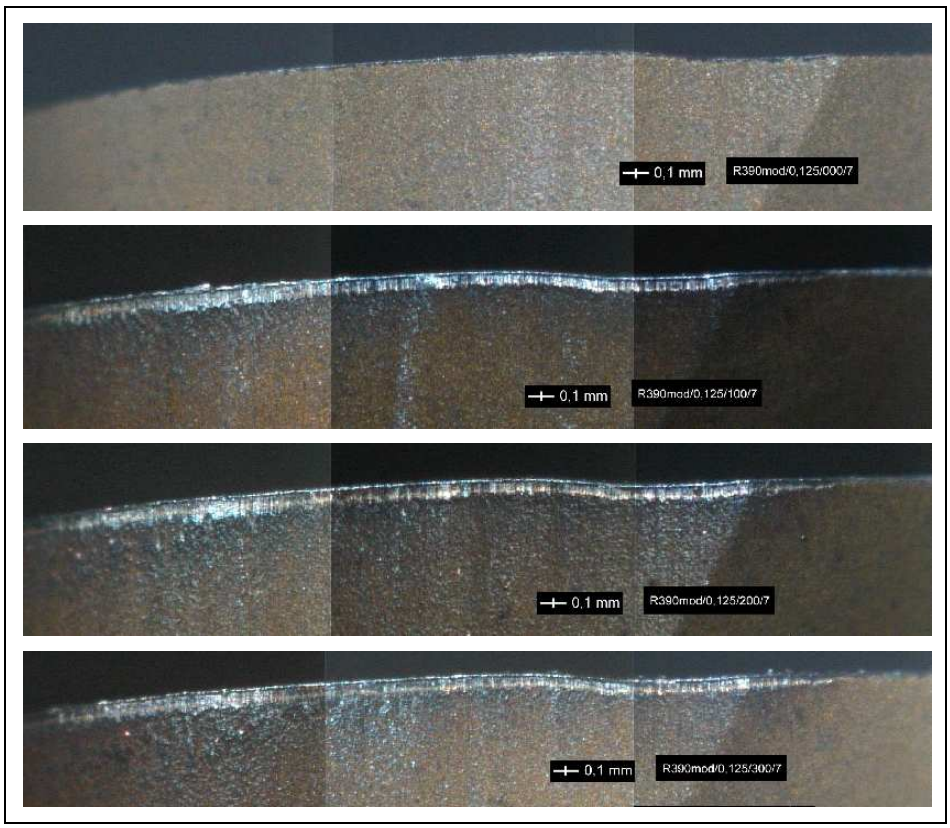
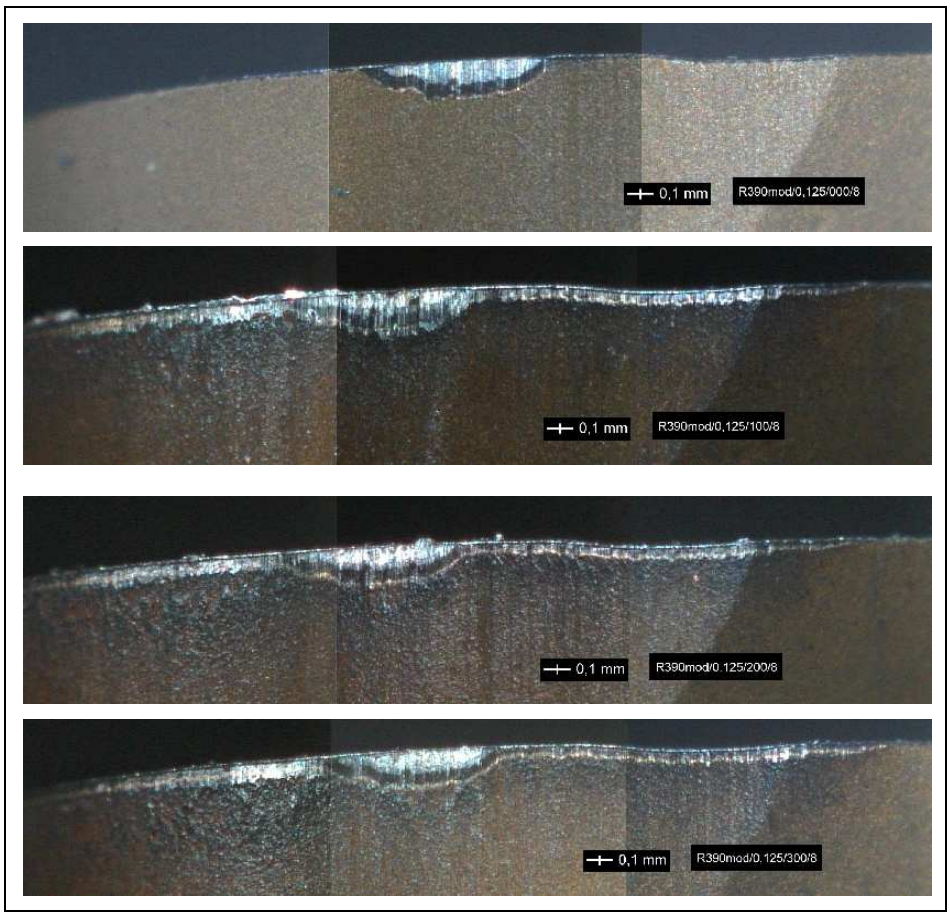
Tablica 97. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 5 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



Tablica 98. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 6 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



Tablica 99. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 7 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu v_f = 1120 mm/min.



Tablica 100. Rozwinięcie zużycia ostrza nr 8 w głowicy frezowej R390mod dla prędkości posuwu $v_f = 1120$ mm/min.