



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

**Badania procesu skrawania osiowo – symetrycznych
cienkościennych części silników lotniczych o dużej
smukłości wykonywanych z materiału
trudnoskrawalnego**

mgr inż. Krzysztof Smak

Rozprawa Doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, dr h.c., prof. h.c.

Promotor pomocniczy: dr inż. Piotr Szablewski

POZNAŃ 2025

Rozprawa doktorska została wykonana w ramach programu "Doktorat wdrożeniowy", finansowanego z budżetu Państwa i realizowanego przy współpracy Politechniki Poznańskiej oraz zakładu Pratt & Whitney Kalisz sp. z o.o.,
Umowa nr DWD/5/0388/2021

Opiekun pomocniczy: dr inż. Piotr Szablewski

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania moim Promotorom za wsparcie, cenne wskazówki oraz wiedzę, które były nieocenione w realizacji niniejszej pracy. Dziękuję również za zrozumienie i okazaną życzliwość.

Podziękowania kieruję również do mojej rodziny, w szczególności mojej żony i dzieci, a także rodziców i teściów za nieustające wsparcie i cierpliwość w czasie realizacji doktoratu.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	8
ABSTRACT	9
WYKAZ AKRONIMÓW ORAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	11
1. WPROWADZENIE.....	13
2. ANALIZA STANU WIEDZY	15
2.1. Ogólna charakterystyka stopu Inconel 718	15
2.2. Zastosowanie stopu Inconel 718	18
2.3. Charakterystyka komponentów cienkościennych oraz komponentów o dużej smukłości	20
2.3.1 Charakterystyka komponentów cienkościennych	20
2.3.2 Charakterystyka komponentów o dużej smukłości	25
2.4. Skrawalność stopu Inconel 718.....	28
2.5. Zużycie i trwałość ostrzy w procesie toczenia	30
2.6. Rodzaje materiałów narzędziowych i powłok stosowanych do obróbki stopu Inconel 718	42
2.7. Charakterystyka geometrii i mikrogeometrii ostrzy skrawających rekomendowanych dla toczenia wykończeniowego stopu Inconel 718.....	47
2.8. Zużycie i trwałość ostrzy w procesie toczenia stopu Inconel 718	50
2.9. Chropowatość oraz topografia powierzchni obrobionej po toczeniu stopu Inconel 718	69
2.10. Mikrostruktura warstwy wierzchniej po skrawaniu stopu Inconel 718 ..	75
2.11. Temperatura i siły skrawania podczas toczenia stopu Inconel 718.....	81
2.11.1 Temperatura występująca podczas toczenia stopu Inconel 718	81
2.11.2 Siły skrawania występujące podczas toczenia stopu Inconel 718.....	84
2.12. Proces tworzenia się wióra i jego rodzaje podczas toczenia stopu Inconel 718	87

2.13.	Drgania w procesie skrawania oraz charakterystyka i zastosowanie oprawek narzędziowych wyposażonych w tłumik drgań	91
2.13.1	Drgania w procesie skrawania	91
2.13.2	Charakterystyka i zastosowanie oprawek narzędziowych wyposażonych w tłumik drgań	93
2.14.	Podsumowanie analizy literatury i wnioski do badań	95
3.	CEL I TEZY BADAWCZE PRACY	97
4.	ZAKRES I WARUNKI PRZEPROWADZANYCH BADAŃ	100
4.1.	Stanowisko badawcze	100
4.2.	Materiały obrabiane przeznaczone do badań	102
4.3.	Narzędzia, materiały narzędziowe, parametry skrawania oraz geometria ostrzy stosowanych w badaniach	105
4.4.	Warunki przeprowadzanych badań	106
5.	METODYKA BADAŃ	109
5.1.	Ocena zużycia ostrza	109
5.2.	Ocena chropowatości i topografii powierzchni obrobionej	110
5.3.	Ocena uzyskiwanej dokładności wymiarowej	113
5.4.	Ocena mikrostruktury warstwy wierzchniej	117
5.5.	Ocena właściwości tribologicznych badanych ostrzy	118
5.6.	Pomiar drgań	118
5.7.	Ocena kształtu wiórów	120
6.	ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ	121
6.1.	Badania wstępne przeprowadzone na próbkach materiału	121
6.1.1	Badania zużycia ostrzy	122
6.1.2	Badania chropowatości i topografii powierzchni	128
6.1.3	Badania mikrostruktury warstwy wierzchniej	134
6.1.4	Ocena uzyskiwanych wymiarów na próbkach po toczeniu	137

6.1.5	Badania tribologiczne oraz pomiar mikrotwardości testowanych ostrzy	139
6.1.6	Wnioski z badań wstępnych	145
6.2.	Badania zasadnicze przeprowadzone na próbkach oraz na niezgodnych częściach produkcyjnych	148
6.2.1	Ocena zużycia ostrzy po toczeniu wzdłużnym powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej próbek materiału	150
6.2.2	Ocena chropowatości i topografii powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej obrobionych próbek materiału	178
6.2.3	Ocena mikrostruktury warstwy wierzchniej powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej obrobionych próbek materiału	199
6.2.4	Ocena uzyskiwanych wymiarów średnicowych po toczeniu wzdłużnym powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej obrobionych próbek materiału	210
6.2.5	Ocena chropowatości powierzchni wewnętrznej obrobionych części produkcyjnych	212
6.2.6	Ocena uzyskiwanych wymiarów średnicowych po toczeniu wzdłużnym powierzchni wewnętrznej części produkcyjnych	217
6.2.7	Ocena kształtu wiórów po toczeniu wzdłużnym powierzchni wewnętrznej	221
6.2.8	Badanie wpływu ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej na mikrostrukturę warstwy wierzchniej	223
6.2.9	Analiza wartości skutecznych RMS przyspieszeń drgań	226
6.2.10	Wpływ zasięgu zastosowanej oprawki narzędziowej na zmianę mikrogeometrii ostrza	230
6.2.11	Wpływ wartości posuwu na zużycie ostrza, dokładność uzyskiwanych wymiarów oraz chropowatość powierzchni	234
6.2.12	Wnioski z badań zasadniczych	236
7.	PREZENTACJA WDROŻENIA OPRACOWANEGO ROZWIĄZANIA ...	240

7.1.	Zasady dotyczące wdrażania zmian w procesie technologicznym części produkowanej według wymagań ESA.....	240
7.2.	Przebieg wdrożenia.....	241
7.3.	Analiza powtarzalności uzyskiwanych wymiarów oraz chropowatości powierzchni obrobionej	242
8.	WNIOSKI KOŃCOWE	250
8.1.	Wnioski odnoszące się do tej pracy	250
8.2.	Wnioski poznawcze	250
8.3.	Wnioski z przeprowadzonego wdrożenia.....	252
8.4.	Wnioski utylitarne	252
8.5.	Wnioski do dalszych badań	253
	Literatura.....	254

STRESZCZENIE

Problemem naukowym niniejszej pracy doktorskiej była identyfikacja relacji między parametrami technologicznymi i warunkami skrawania, a dokładnością wykonania i wybranymi cechami warstwy wierzchniej podczas skrawania wewnętrznych powierzchni osiowo – symetrycznych cienkościennych części o dużej smukłości wykonywanych z materiału trudnoskrawalnego. Luką badawczą, którą należało wypełnić było określenie wpływu wysięgu narzędzia skrawającego oraz ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej na technologiczne efekty wykończeniowej obróbki skrawaniem w procesie toczenia wewnętrznych powierzchni cienkościennych elementów silnika lotniczego. Badania eksperymentalne przeprowadzano w odniesieniu do wału silnika lotniczego ze stopu Inconel 718.

W pierwszej kolejności badania podstawowe wykonywane na próbkach ze stopu Inconel 718 miały na celu określić kierunek, w jakim należy podążać, aby rozwiązać problem niedostatecznej trwałości ostrza w stosunku do wymaganej drogi skrawania. Ten etap testów skupiony był wokół oceny wpływu powłok przeciwzużyciowych płytek skrawających z węglików spiekanych na zużycie ostrza skrawającego, którego wielkość i charakter oddziałuje na wymaganą dokładność wymiarową, jakość powierzchni oraz mikrostrukturę warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej. Przeprowadzone badania potwierdziły, iż niezależnie od metody nanoszenia powłok przeciwzużyciowych w badaniach zasadniczych powinny zostać zastosowane ostrza skrawające charakteryzujące się największą odpornością na ścieranie.

Badania zasadnicze przeprowadzone początkowo w sposób porównawczy na próbkach materiału, miały na celu określenie wpływu zestawu narzędziowego na zużycie ostrzy skrawających oraz na dokładność wymiarową, jakość powierzchni ocenianą parametrami chropowatości 2D i 3D, a także mikrostrukturę warstwy wierzchniej. W wyniku przeprowadzonych testów, trzy płytki skrawające o cechach VBGT 160408-UM S205, VBGT 160408LF KCS10B oraz VBMT 160408-LS MP9005, które dały najlepsze rezultaty, biorąc pod uwagę wspomniane wcześniej wymagania, zostały przeznaczone do dalszych badań wykonywanych na wybrakowanych częściach produkcyjnych.

Wykonane testy na częściach produkcyjnych pozwoliły wskazać rozwiązanie technologiczne przeznaczone do wdrożenia w postaci parametrów obróbki i płytki skrawającej VBGT 160408LF KCS10B, które przyniosło najkorzystniejsze wyniki pod

względem wymaganej dokładności wymiarowej, chropowatości powierzchni, mikrostruktury warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej oraz zużycia ostrza.

Na podstawie wykonanych badań udowodniono, że przy doborze odpowiednich wartości parametrów skrawania, zastosowanie oprawki narzędziowej wyposażonej w tłumik drgań korzystnie wpływa na spowolnienie zużywania ostrza skrawającego.

Wdrożenie do produkcji opracowanego rozwiązania umożliwiło racjonalizację procesu technologicznego wspomnianego komponentu, szczególnie pod względem wymaganej jakości. Wyprodukowano dwadzieścia zgodnych części spełniających przyjętą wartość kryterium, jakim była tolerancja wykonania średnicy otworu wału, a także spełniających wymagania dotyczące chropowatości powierzchni ocenianej parametrem *Ra*. Opracowane rozwiązanie technologiczne zostało wdrożone do produkcji seryjnej.

ABSTRACT

The scientific problem addressed in this doctoral dissertation was the identification of the relationship between technological parameters and cutting conditions, and the resulting dimensional accuracy and selected characteristics of the surface layer during the machining of internal surfaces of axially symmetric, thin-walled components with high slenderness, manufactured from a difficult-to-cut material. The research gap to be filled concerned the determination of the influence of cutting tool overhang and cutting fluid pressure on the technological outcomes of finishing turning operations of the internal surfaces of thin-walled aircraft engine components. The experimental investigations were conducted on an aircraft engine shaft made of Inconel 718 alloy.

In the first stage, the fundamental investigations carried out on Inconel 718 specimens were intended to indicate the direction to be pursued in order to address the problem of insufficient cutting edge durability relative to the required cutting length. This phase of testing focused on assessing the influence of wear-resistant coatings applied to cemented carbide inserts on cutting edge wear, the extent and character of which directly affect dimensional accuracy, surface quality, and the microstructure of the machined surface layer. The results confirmed that, irrespective of the coating deposition method, the principal experiments should employ cutting tools characterized by the highest resistance to abrasive wear.

The principal experiments, initially performed in a comparative manner on material specimens, were aimed at determining the influence of tool assembly overhang on cutting

edge wear, dimensional accuracy, surface quality assessed by 2D and 3D roughness parameters, and the microstructure of the surface layer. As a result of these tests, three cutting inserts VBGT 160408-UM S205, VBGT 160408LF KCS10B, and VBMT 160408-LS MP9005 which delivered the most favorable outcomes with respect to the aforementioned requirements, were selected for further investigations conducted on rejected production components.

The tests conducted on production components made it possible to identify a technological solution for implementation, consisting of machining parameters and the VBGT 160408LF KCS10B cutting insert. This solution yielded the most advantageous results in terms of the required dimensional accuracy, surface roughness, microstructure of the machined surface layer, and cutting edge wear.

Based on the conducted investigations, it was demonstrated that, with appropriately selected cutting parameters, the use of a tool holder equipped with a vibration damper has a beneficial effect on reducing the rate of cutting edge wear.

The implementation of the developed solution enabled the rationalization of the technological process of the aforementioned component, particularly with respect to the required quality. Twenty compliant parts were produced, meeting the adopted criterion of shaft bore diameter tolerance as well as the requirements for surface roughness evaluated by the Ra parameter. The developed technological solution was subsequently introduced into serial production.

WYKAZ AKRONIMÓW ORAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a_p	[mm]	– głębokość skrawania
d	[mm]	– średnica przedmiotu obrabianego
f	[mm/obr]	– posuw na obrót
F	[N]	– całkowita siła skrawania (wypadkowa)
F_p	[N]	– składowa odporowa siły skrawania
F_c	[N]	– główna składowa siły skrawania
F_f	[N]	– składowa posuwowa siły skrawania
h	[mm]	– grubość warstwy skrawanej
h_{min}	[mm]	– minimalna grubość warstwy skrawanej
l	[mm]	– długość części toczonej
n	[obr/min]	– prędkość obrotowa
Ra	[μm]	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej
Rz	[μm]	– największa wysokość profilu
R_{zto}	[μm]	– teoretyczna największa wysokość profilu
Rp	[μm]	– wysokość najwyższego wzniesienia profilu
Rv	[μm]	– głębokość najniższego wgłębienia profilu
r_ϵ	[mm]	– promień naroża
r_n	[μm]	– promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej
Sa	[μm]	– średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni
Sz	[μm]	– największa wysokość nierówności powierzchni
Sp	[μm]	– wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni
Sv	[μm]	– głębokość najniższego wgłębienia powierzchni
SGP		– struktura geometryczna powierzchni

t – zmienna standaryzowana dla rozkładu t -Studenta
 t_s [min] – czas skrawania
 v_c [m/min] – prędkość skrawania
 v_f [mm/min] – prędkość ruchu posuwowego
 μ – współczynnik tarcia
 BUE – (ang. Built-Up Edge) – narost na krawędzi
 BUL – (ang. Built-Up Layer) – narost na powierzchni
 CBN – (ang. Cubic Boron Nitride) – regularny azotek boru
 CCS – ciecz chłodząco-smarująca
 EDS – (ang. Energy Dispersive Spectroscopy) spektroskopia rentgenowska z dyspersją energii
 HRSA – (ang. Heat Resistant Super Alloys) – stopy żaroodporne
 MQL – (ang. Minimum Quantity Lubrication) – chłodzenie z minimalną ilością środka smarnego
 CRYO – chłodzenie kriogeniczne
 OUPN – układ Obrabiarka-Uchwyt-Przedmiot-Narzędzie
 SEM – mikroskopia skaningowa
 EDS – spektroskopia rentgenowska z dyspersją energii
 TWW – technologiczna warstwa wierzchnia
 WW – warstwa wierzchnia
 α_o [°] – kąt przyłożenia w płaszczyźnie ortogonalnej układu narzędzia
 α – poziom istotności
 γ_o [°] – kąt natarcia w płaszczyźnie ortogonalnej układu narzędzia

1. WPROWADZENIE

Inconel 718 należy do grupy żaroodpornych i żarowytrzymałych stopów na osnowie niklu. Stopy te nazywane inaczej nadstopami niklu prócz stopów tytanu i kobaltu są stosowane do produkcji najbardziej obciążonych termicznie części silników lotniczych. Według czołowych producentów silników lotniczych takich jak Pratt & Whitney czy General Electric części wykonane ze stopów niklu stanowią 30-50% masy silnika lotniczego, z czego ponad 50% z nich wykonane jest ze stopu Inconel 718 [1, 2, 7].

Stopy na osnowie niklu oceniane są jako materiały trudnoskrawalne. Wynika to między innymi z wartości indeksu skrawalności *MR* (ang. *machinability rating*), którego wolumen przyjmuje się na poziomie poniżej 25% dla wspomnianej grupy materiałowej. Materiałem referencyjnym dla wskaźnika skrawalności jest stal SEA 1020 (odpowiednik DIN 1.0402), dla którego $MR=100\%$. Stop Inconel 718 charakteryzuje się stosunkowo małą wartością indeksu skrawalności, która wynosi tutaj $MR=14\%$ [3].

Właściwości stopu Inconel 718 powodują, że jest on bardzo często wykorzystywany do produkcji części pracujących w gorącej sekcji silników lotniczych [4], takich jak; dyski turbin, obudowy łożysk, komory spalania i wały główne. Ta ostatnia grupa komponentów ze względu na dużą smukłość odznacza się dodatkowymi trudnościami podczas procesu obróbki. Trudności te związane są bardzo często z koniecznością zastosowania narzędzi o długim wysięgu podczas kształtowania powierzchni wewnętrznych. Przedsiębiorstwa specjalizujące się w produkcji części do silników lotniczych, kładą nacisk na ciągłe doskonalenie swoich procesów technologicznych. Niewątpliwie ogromną uwagę przywiązuje się do opracowania procesu obróbki, umożliwiającego wykonanie operacji dla danej części bez ingerencji operatora. Taka filozofia organizacji produkcji determinuje wymóg zastosowania precyzyjnie określonej trwałości narzędzi. Kryterium to ma szczególne znaczenie w odniesieniu do komponentów wykonywanych z materiału Inconel 718, gdyż zużycie narzędzi przebiega tutaj znacznie szybciej niż w przypadku obróbki innych materiałów [5]. Biorąc pod uwagę obróbkę komponentów cienkościennych bardzo często mogą pojawiać się drgania. Ich występowanie skutkuje najczęściej zmniejszeniem trwałości narzędzia. Obróbka części o dużej smukłości, w szczególności takich, które wymagają zastosowania narzędzi o długim wysięgu, również może okazać się problematyczna. Obniżona sztywność narzędzia, jak również pojawiające się wibracje także

przyczyniają się do skrócenia okresu trwałości ostrza. Często skutkują trudnościami w uzyskaniu żądanej dokładności wymiarowej, a także wymaganej jakości powierzchni.

2. ANALIZA STANU WIEDZY

2.1. Ogólna charakterystyka stopu Inconel 718

Stop Inconel 718 należy do grupy materiałów nazywanych superstopami lub nadstopami na osnowie niklu. Podłoże w postaci niklu Ni w połączeniu ze znaczną zawartością chromu Cr zapewniają temu materiałowi odporność na korozję i utlenianie, a także inne mechanizmy uszkadzające, działające podczas pracy przy wysokim poziomie temperatur. Stop ten charakteryzuje się również dużą wytrzymałością oraz odpornością na pełzanie w podwyższonych temperaturach [6, 7]. Wspomniane właściwości nadstopu na osnowie niklu są w stanie zachować nawet w temperaturze nie przekraczającej 90% wartości ich temperatury topnienia [7]. Generalnie nadstopy dzieli się na trzy grupy ze względu na osnowę: Ni, Co, a także Fe-Ni [8]. Można spotkać również inny podział superstopów: Ni, Co i Fe [9].

Pierwiastki występujące w nadstopach niklu, które mają wpływ na jego właściwości i mikrostrukturę można podzielić według zależności od pełnionej funkcji na grupy [10]:

- rozpuszczające się w osnowie austenitycznej: Co, Fe, Cr, V, Mo, W;
- tworzące wydzielania: Al, Ti, Nb, Ta, np. Ni_3Al , Ni_3Ti czy $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$;
- tworzące węgliki: Cr, Mo, W, V, Nb, Ti, Ta;
- segregujące do granic ziaren: Mg, B, C, Zr;
- tworzące tlenki zapobiegające korozji: Cr, Al;
- zwiększające odporność na utlenianie w wysokich temperaturach: La, Th.

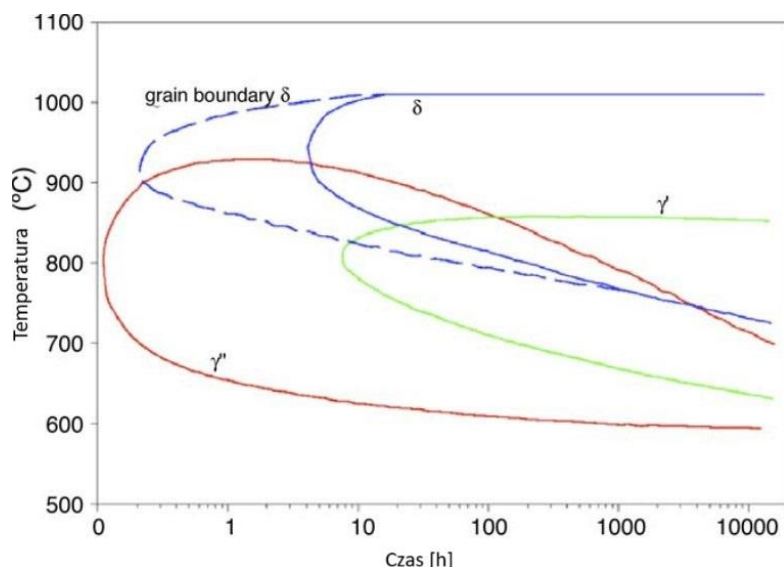
Skład chemiczny stopów na osnowie niklu opisuje norma PN-ISO 9722:2000 [11].

Skład chemiczny stopu Inconel 718 przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Skład chemiczny stopu Inconel 718 [6].

Stop	Skład chemiczny (%)									
	Al	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Ti	Nb	Ni
Inconel 718	0,52	0,021	0,11	19,06	0,02	18,15	3,04	0,93	5,08	53

Fazy, które głównie występują w nadstopach to γ , γ' , γ'' , węgliki Ti, Ta, Hf i Nb, oraz topologicznie upakowane δ , μ oraz Lavesa [6, 7, 8, 12]. Udział objętościowy wspomnianych faz zależy od metody wytwarzania oraz od przeprowadzonej obróbki cieplnej stopu (Rys. 2.1).



Rys. 2.1. Wykres fazowy dla stopu Inconel 718 [6]

Nikiel Ni stanowi ośnowę stopu i w połączeniu z chromem Cr krystalizują w fazie γ tworząc regularną strukturę ściennie centrowaną. Faza ta jest niemagnetyczna i charakteryzuje się dużą stabilnością podczas pracy w podwyższonych temperaturach [3, 7, 8]. Dodanie Ti i Al powoduje wytrącenie się w formie związków międzymetalicznych γ' ($\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$, o prostej sieci regularnej) [6, 7, 8]. Mają one mniejszy efekt utwardzający niż cząstki fazy γ'' . Faza ta odpowiada za umocnienie stopu, jak również za poprawę właściwości żaroodpornych [3]. Zwiększenie ilości fazy γ' poprzez zwiększenie zawartości tytanu i aluminium zazwyczaj prowadzi do wzrostu szybkości zużycia narzędzia [8]. Węgiel C jest również dodawany, aby wytrącać się w formie węglików TiC lub NbC. W tym przypadku zawartość węgla musi być wystarczająco niska, aby umożliwić wytrącanie Nb i Ti w postaci cząstek γ' i γ'' [6]. Nb dodaje się w celu utworzenia twardniejących wydzieleni fazy γ'' , który jest meta stabilnym związkiem międzymetalicznym Ni_3Nb , o centrowanej tetragonalnej sieci krystalicznej. Faza ta odpowiada za poprawę wytrzymałości w niższych temperaturach [3, 6]. Molibden Mo jest również często obecny w Inconelu 718, aby zwiększyć wytrzymałość mechaniczną poprzez utwardzanie roztworu stałego. Ostatecznie może również pojawić się faza δ (międzymetaliczny Ni_3Nb), czasami nazywana fazą δ , która jest cząstką równowagową o strukturze rombowej. Wszystkie te cząstki mogą wytrącać się wzdłuż granic ziaren

w matrycy γ , zwiększając odporność na płynięcie międzykrystaliczne tego stopu [6]. Faza δ w stopie Inconel 718 tworzy się w wyniku obróbki cieplnej i starzenia [13].

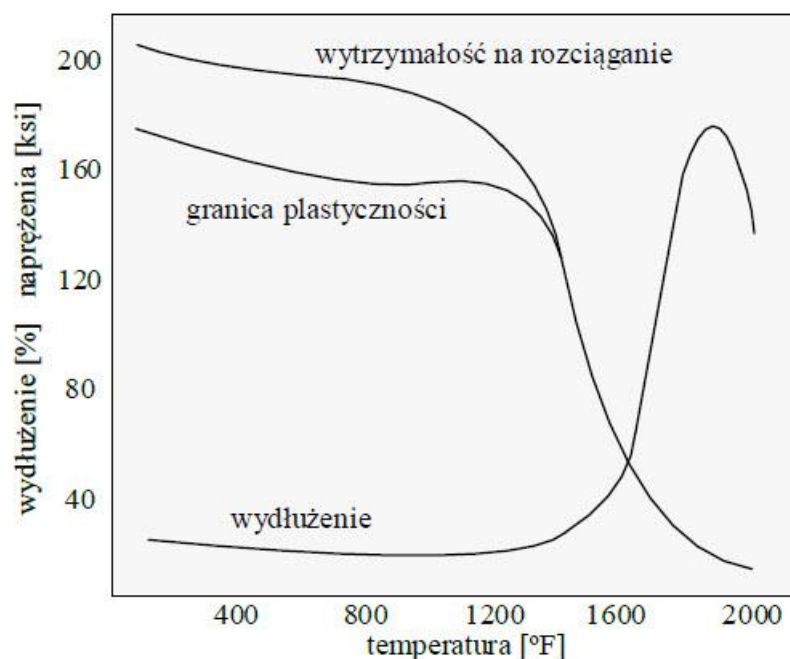
Generalnie skład chemiczny stopu Inconel 718 zdefiniowany jest w normie UNS N07718 [14]. Ponieważ stop ten jest powszechnie stosowany w przemyśle lotniczym, dlatego czołowi producenci silników lotniczych utworzyli normy zakładowe, które są wykorzystywane przez dostawców materiałów przeznaczonych na półfabrykaty do produkcji komponentów [3]. Ze specyfikacji tych korzystają także dostawcy komponentów lotniczych.

Półwyroby wykonane ze stopu Inconel 718 najczęściej otrzymywane są w stanie odlewanych lub w wyniku obróbki plastycznej, natomiast później materiały te poddawane są obróbce cieplnej. Taki proces ma na celu uzyskanie zoptymalizowanej mikrostruktury dla konkretnego zastosowania lub aplikacji [15]. Materiał ten może być dostarczany według przykładowej specyfikacji przedstawionej w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Wykaz specyfikacji form i standardu dostawy stopu Inconel 718 [3].

Forma dostawy	Standard
Pręt	ASTM B637, AMS 5662, AMS 5663, AMS 5664, PWA 1009, PWA 1010, GE B50TF15
Drut	AMS 5832
Blacha	ASTM B670, AMS 5596, AMS 5597, PWA 1033, GE B50TF14, ASTM B670, ASTM B637
Płyta	ASTM B670, AMS 5596, AMS 5597, PWA 1033, GE B50TF15, ASTM B670, ASTM B637
Rura	AMS 5589, AMS 5590
Odkuwka	ASTM B637, AMS 5662, AMS 5663, AMS 5664, PWA 1009, PWA 1010, GE B50TF15
Drut spawalniczy	AWS A5.14 ERNiFeCr-2

Żarowytrzymałość oraz odporność na pełzanie stopu Inconel 718 utrzymuje się do temperatury ok. 650°C, niemniej jednak jest ona uzależniona od przeprowadzonej wcześniej obróbki cieplnej [6, 16, 17, 18]. Przebieg zmian wybranych parametrów wytrzymałościowych w funkcji temperatury przedstawiono na rys. 2.2 [3].

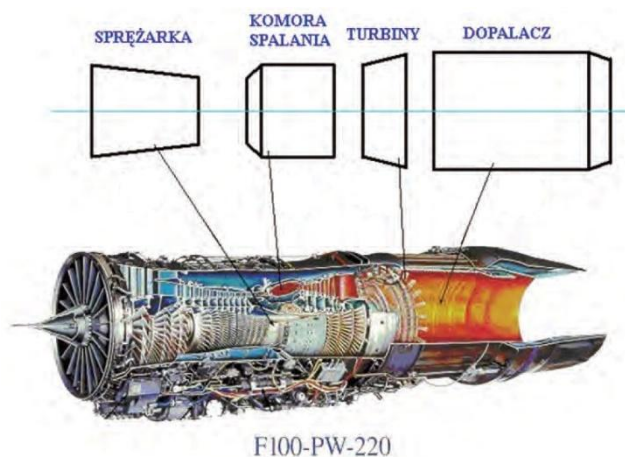


Rys. 2.2. Właściwości stopu Inconel 718 wyżarzzonego (1800°F/1h) oraz starzonego (1325°F/1h) w postaci pręta walcowanego [3]

2.2. Zastosowanie stopu Inconel 718

Stop Inconel 718 ze względu na swoje właściwości takie jak; wysoka wytrzymałość, odporność na pełzanie, oraz korozję i utlenianie w podwyższonych temperaturach jest stosowany do produkcji komponentów pracujących w warunkach wysokich temperatur [6, 18]. Dlatego jest materiałem stosowanym do produkcji komponentów gorącej sekcji silników lotniczych. Najczęściej ze stopu tego wykonuje się dyski turbin, komory spalania, obudowy łożysk, wały główne, a także łopatki turbin (Rys. 2.3) [6, 18, 19]. Inconel 718 ma również zastosowanie w budowie wymienników ciepła, urządzeń do obróbki cieplnej, a także głównych silników promów kosmicznych i reaktorów jądrowych [18]. Stop ten wykazuje również bardzo dobre właściwości w temperaturach kriogenicznych pod względem wytrzymałości, plastyczności, odporności na pękanie oraz zmęczenia materiału. Z tego powodu jest również stosowany w aplikacjach kriogenicznych, takich jak zbiorniki do przechowywania ciekłego azotu czy komponenty do rakiet na paliwo ciekłe [18, 20]. Opracowany w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia stop Inconel 718 osiągnął wytrzymałość porównywalną z najlepszymi dostępnymi wówczas materiałami, takimi jak Rene 41, Udimet 700, Inconel X-750 oraz Waspalloy. Z punktu widzenia spawalności, stopy te były uważane za łatwe do spawania cienkich blach, bez większych trudności; jednak wszystkie ulegały pękaniu starzeniowemu wywołanemu naprężeniami podczas obróbki

starzeniowej po spawaniu. Metalurdzy z General Electric-Evendale jako pierwsi dostrzegli potencjalną zaletę powolnej reakcji starzeniowej stopu 718 w unikaniu problemu pęknięcia starzeniowego wywołanego naprężeniami. Zatem jego dobra spawalność w porównaniu do innych nadstopów czyni go bardzo dobrym kandydatem do montażu części [21, 22].



Rys. 2.3. Widok odrzutowego silnika lotniczego F100-PW220 ze wskazaniem głównych modułów [23]

Należy zaznaczyć, że w przypadku takich komponentów jak odporne na pękanie łopatki i kierownice turbin, są zazwyczaj wytwarzane za pomocą złożonych procesów odlewania precyzyjnego, które są kluczowe dla wdrożenia skomplikowanych systemów chłodzenia oraz kontroli struktury ziaren [7]. Tego typu komponenty mogą zawierać ziarna równoosiowe lub kolumnowe, albo być odlewane jako monokryształy, co całkowicie eliminuje wszystkie granice ziaren o dużym kącie [7]. Ponieważ granice ziaren są miejscami kumulacji uszkodzeń w wysokich temperaturach, łopatki w początkowych stopniach turbiny są zazwyczaj wykonane z monokryształów, natomiast łopatki w późniejszych (chłodniejszych) stopniach turbiny są wytwarzane z równoosiowych stopów [7]. Komponenty strukturalne, takie jak obudowy silników, są wytwarzane za pomocą procesów odlewania precyzyjnego. Dyski turbin są wytwarzane poprzez procesy obróbki plastycznej, które wykorzystują albo odlewane wlewki, albo spieczony proszek nadstopowy. Wyjątkowe połączenia wytrzymałości, odporności na pękanie i wzrost pęknięć można osiągnąć w tych materiałach dzięki precyzyjnej kontroli mikrostruktury na różnych etapach obróbki plastycznej [7].

2.3. Charakterystyka komponentów cienkościennych oraz komponentów o dużej smukłości

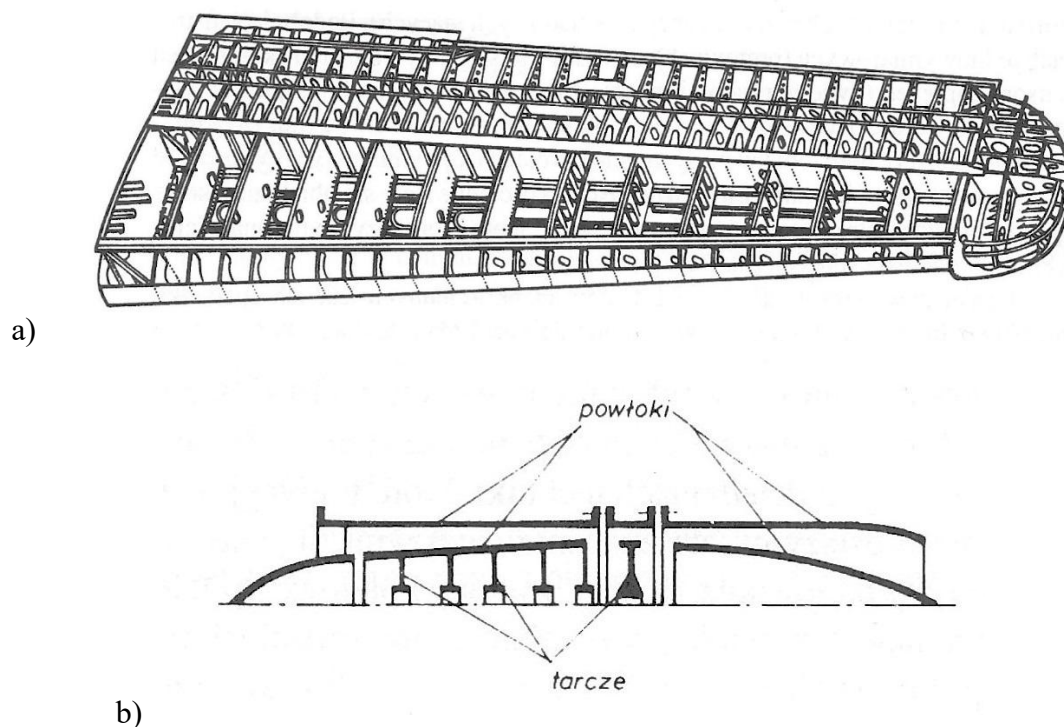
2.3.1 Charakterystyka komponentów cienkościennych

Komponentami cienkościennymi nazywamy ten rodzaj konstrukcji, w których jeden wymiar (np. grubość) ma małą lub bardzo małą wartość w porównaniu z wartościami dwóch pozostałych wymiarów [24]. Ustroje te nazywa się również – z tego powodu – dwuwymiarowymi lub skorupowymi [24]. Analiza naprężeń i odkształceń konstrukcji cienkościennych w stosunku do analizy bryły trójwymiarowej jest znacznie prostsza. Fakt cienkościenności z jednej strony implikuje zarówno możliwość całkowitego pominięcia od jednej do trzech składowych tensora naprężeń w dowolnym punkcie ciała (naprężeń normalnych w kierunku małej grubości i naprężeń stycznych), jak i założenie rozkładu pozostałych składowych wzdłuż grubości (stałego lub liniowego – składowych normalnych, stałego lub parabolicznego – składowych tnących) [24]. Z drugiej strony cienkościenność konstrukcji wywołuje pewne specyficzne problemy wytrzymałościowe (np. zagadnienia stateczności), nieistotne w masowych ustrojach trójwymiarowych [24]. Wszystkie te przyczyny spowodowały, że konstrukcje cienkościenne stały się obiektami wyróżniającymi stosowane metody analizy wytrzymałościowej zarówno w zakresie sprężystym jak i plastycznym [24].

Innym powodem wydzielenia ustrojów cienkościennych jest ich specyfika konstrukcyjna i technologiczna. Należą one do konstrukcji lekkich, stosowanych powszechnie tam, gdzie mały ciężar ustroju decyduje o jego walorach użytkowych (np. konstrukcje lotnicze) [24]. Gwałtowny, w ostatnich dziesięcioleciach, rozwój metod obliczeniowych (głównie numerycznych) i możliwości technologicznych, spowodował, iż ustroje cienkościenne zaczęły być bardzo często stosowane również w tych dziedzinach techniki, które tradycyjnie posługiwały się ustrojami znacznie prostszymi, ale znacznie cięższymi [24].

Zakres zastosowania konstrukcji cienkościennych jest, jak widać, bardzo szeroki. Ich początki wiązały się z koniecznością budowy obiektów, które z racji swojej podstawowej funkcji użytkowej musiały zapewnić szczelność, a z wytrzymałościowego punktu widzenia – możliwość przeniesienia obciążeń wynikających z ciężaru lub ciśnienia czynnika (stałego, płynnego bądź gazowego) wypełniającego czy pokrywającego te obiekty [24]. Chodzi tu głównie o wszelkiego rodzaju zbiorniki pokrycia itp [24]. Tego typu ustroje cienkościenne

były bardzo często mocowane na konstrukcjach ramowych lub kratowych, które z kolei spełniały główne funkcje wytrzymałościowe – przenosiły całkowity ciężar ustroju i czynnika, a także wspierały i wzmacniały część skorupową [24]. Z czasem funkcje wytrzymałościowe przekazano samemu ustrojowi cienkościenne. Natomiast jeszcze później konstrukcje cienkościenne zaczęto stosować do budowy wielu innych obiektów, jako elementy lub rozwiązania całościowe, spełniające funkcje całkowicie wytrzymałościowe [24]. Ustroje cienkościenne, będąc często obiektami dużymi, są szczególnie czułe na błędy wykonania i montażu. Ich elementy składowe (przed zmontowaniem) mają małą sztywność, co powoduje dodatkowe trudności zapewnienia wymaganej dokładności połączeń, uniknięcia wstępnego zniekształcenia ustroju, które ma zasadniczy wpływ na jego dalszą pracę. Ustroje cienkościenne stosowane są obecnie niemal we wszystkich dziedzinach techniki. Począwszy od lekkich konstrukcji lotniczych (zarówno płata jak i silnika) poprzez przemysł samochodowy, przemysł maszyn budowlanych, konstrukcje samonośne oraz w produkcji różnego rodzaju zbiorników (Rys. 2.4) [24].

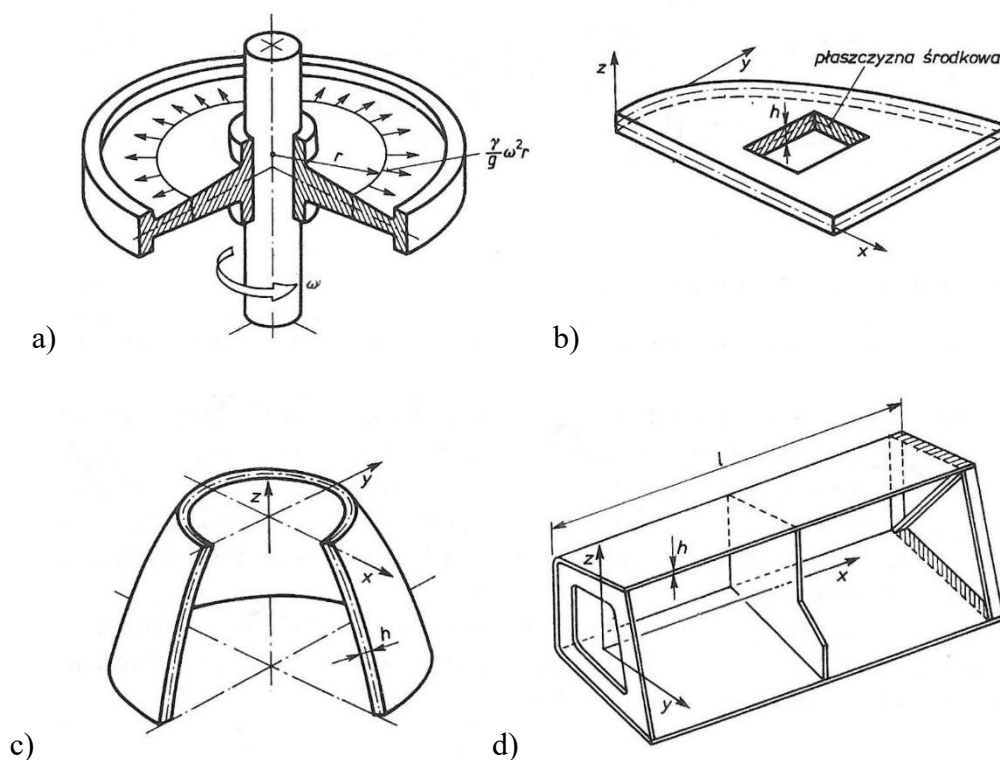


Rys. 2.4. Przykłady konstrukcji cienkościennych: a) konstrukcja skrzydła samolotu, b) elementy cienkościennej konstrukcji silnika odrzutowego [24]

Ustroje cienkościenne podzielić można na cztery zasadnicze grupy: tarcze, płyty, powłoki i pręty cienkościenne [24]. Niektóre z nich mogą występować jako samodzielne

konstrukcje (np. tarcze i powłoki); wszystkie stanowią elementy bardziej złożonych obiektów [24].

Tarczami nazywamy ustroje płaskie o stałej bądź zmiennej grubości, obciążone w swojej płaszczyźnie. *Płyty* to ustroje płaskie (w sensie geometrii nie różnią się od tarcz) obciążone prostopadłe do swej płaszczyzny. *Powłoki* budowane są na podstawie powierzchni przestrzennej otwartej bądź zamkniętej, która stanowi powierzchnię środkową ustroju o grubości ścianki bardzo małej w porównaniu z innymi wymiarami. *Pręty cienkościenne* o przekrojach otwartych bądź zamkniętych składają się z pryzmatycznego, cienkiego płaszcza o długości wielokrotnie większej od wymiarów poprzecznych i tworzących równoległych do osi pręta oraz z żeber poprzecznych do tej osi [24]. Przykłady podstawowych grup ustrojów cienkościennych pokazano na rys. 2.5 [24].



Rys. 2.5. Podstawowe grupy ustrojów cienkościennych: a) osiowosymetryczna tarcza wirująca, b) płyta, c) powłoka obrotowa, d) pręt cienkościenne [24]

Komponentami cienkościennymi szczególnie w przypadku konstrukcji lotniczych mogą być także wały główne silników odrzutowych i śmigłowych. Cienkościenność tego typu elementów związana jest oczywiście z obniżeniem ich masy [25]. Wpływa to na proces produkcyjny takich komponentów, gdyż zarówno powierzchnie zewnętrzne jak i wewnętrzne są poddane obróbce mechanicznej. Cienkościenne struktury, takie jak płyty

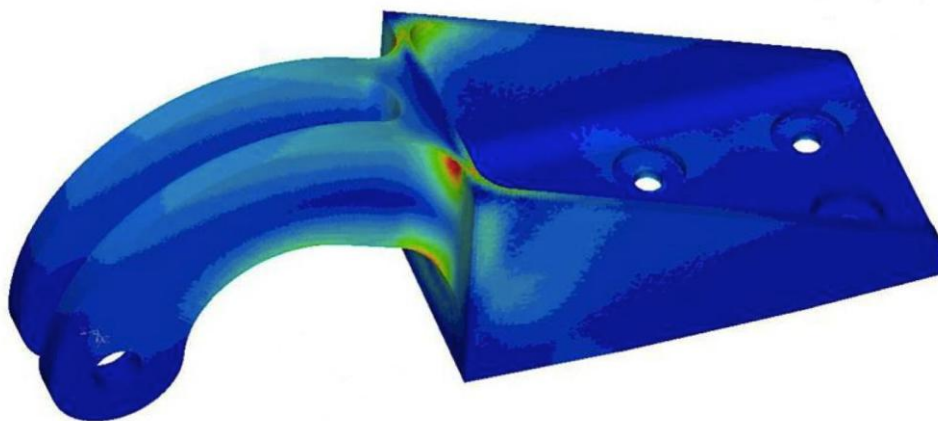
i powłoki, są najczęstszymi elementami konstrukcyjnymi w przyrodzie i technologii. Niezależnie od konkretnej skali mogą być małe, jak błony komórkowe i drobne części maszyn, lub bardzo duże, jak kadłuby samolotów i wieże chłodnicze. Ta preferencja stosowania możliwie cienkich ścian stanowi naturalną strategię optymalizacji, która pozwala zmniejszyć ciężar własny i zminimalizować zużycie materiału. Oprócz smukłości, korzystny efekt krzywizny jest wykorzystywany w konstrukcjach powłokowych, umożliwiając optymalne przenoszenie obciążeń poprzecznych, co było znane już starożytnym mistrzom budownictwa [26].

Biorąc pod uwagę projektowanie komponentów cienkościennych, rozwój metod numerycznych, a w szczególności systemów MES, doprowadził do powstania metodyki projektowania, którą nazywa się *optymalizacją topologii*. Optymalizacja topologii to matematyczna metoda, pozwalająca na optymalizację projektowanej struktury. Jej celem jest uzyskanie rozwiązania zapewniającego najlepsze rozmieszczenie w pewnej przestrzeni projektowej materiału, przeznaczonego do wykonania danej konstrukcji tak, aby przy zadanych warunkach brzegowych i dla zadanego obciążenia kształt konstrukcji był optymalny [27].

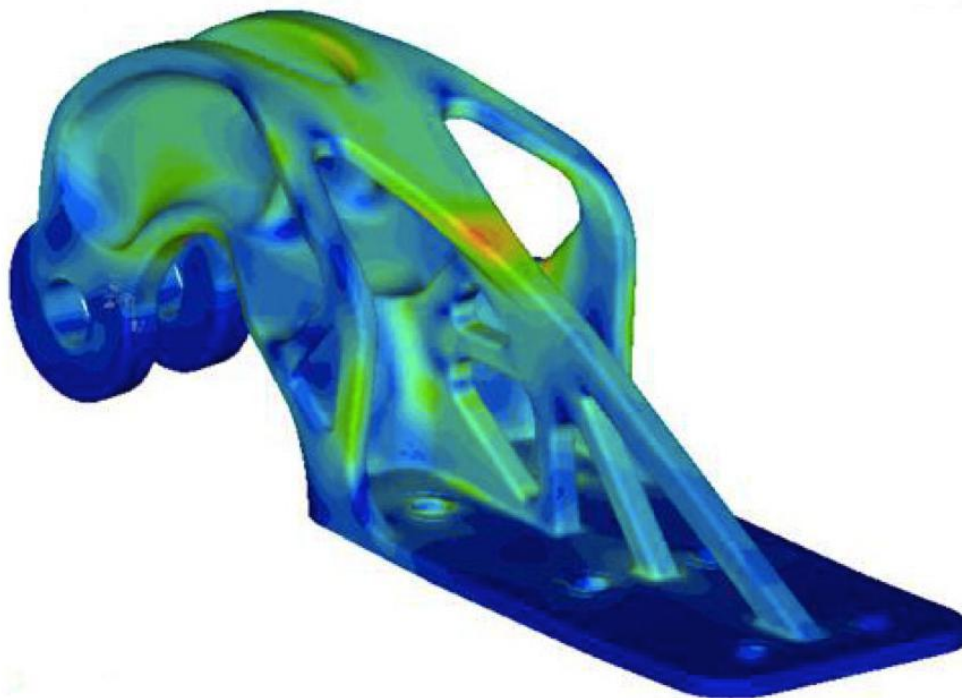
Najbardziej popularną metodą matematycznej optymalizacji topologii ciał izotropowych jest metoda litego materiału izotropowego z penalizacją (SIMP) [28]. Po raz pierwszy metoda SIMP została zastosowana w 1989 r. przez Bendsoe [Bendsoe 1989]. Rozpatrywany ośrodek ciągły traktuje się, jako ciągły w skali obszaru projektowego oraz jednocześnie jako dyskretny, identyfikując każdy punkt materialny jako osobny, niezależny punkt mający odrębne własności materiałowe. Masę całkowicie wypełniającą obszar projektowy Ω nazywa się m , zaś jej gęstość jako ρ , a moduł sprężystości podłużnej (moduł Younga) jako E . Według Bendsoe'a (1989): „optymalizacja kształtu w najbardziej ogólnym ujęciu powinna polegać na ustaleniu dla każdego punktu w przestrzeni, czy jest w nim materiał, czy go nie ma”. Tradycyjnym podejściem do optymalizacji topologii jest dyskretyzacja domeny w sieć elementów skończonych, zwanych izotropowymi mikrostrukturami litymi. Każdy element jest wypełniony materiałem w obszarach, które wymagają materiału, albo opróżniony z materiału w obszarach, w których można usunąć materiał (reprezentujących puste przestrzenie).

Jednym z bardziej znanych przykładów optymalizacji topologicznej części była praca EADS Innovation Works, korporacyjnego centrum badawcze EADS (European

Aeronautic Defence and Space), będącego światowym liderem w sektorze lotnictwa, kosmonautyki, obronności oraz innych powiązanych z tymi dziedzinami usług [29]. Celem realizowanego przez EADS Innovation Works projektu było zademonstrowanie możliwości wydrukowania w technologii DMLS części (wspornik zawiasu gondoli samolotu Airbus A320) o zredukowanej masie, przy jednoczesnym zachowaniu identycznej wydajności, jak w przypadku części oryginalnej. EADS Innovation Works zastosował metodę projektowania w postaci optymalizacji topologicznej, aby wykonać wspornik zawiasu gondoli samolotu Airbus A320 przy możliwie najmniejszej ilości zużytego materiału tj. zredukowanej masie. Zastosowanie metody optymalizacji topologicznej w projektowaniu części lotniczych pozwala na znaczne zredukowanie ich masy. Waga zoptymalizowanej konstrukcji wspornika zawiasu gondoli samolotu Airbus A320 wynosiła 326 g, co w porównaniu z masą oryginalnej części 918 g, oznacza redukcję masy elementu o 64%. Zoptymalizowana konstrukcja zachowała ponadto te same właściwości wytrzymałościowe, przy jednoczesnym zmniejszeniu wartości naprężeń w elemencie (Rys. 2.6, 2.7) [29].



Rys. 2.6. Analiza metodą elementów skończonych oryginalnego wspornika zawiasu gondoli samolotu Airbus A320 [29].



Rys. 2.7. Analiza metodą elementów skończonych zoptymalizowanego wspornika zawiasu gondoli samolotu Airbus A320 [29].

2.3.2 Charakterystyka komponentów o dużej smukłości

Części, których wymiar długości wielokrotnie przewyższa ich wymiar poprzeczny nazywamy częściami o dużej *smukłości*.

Natomiast naukowo rzecz ujmując, komponenty o dużej smukłości, to elementy charakteryzujące się dużym *współczynnikiem smukłości* [30]. Współczynnik ten jest stosunkiem długości części L do najmniejszego promienia bezwładności i jej przekroju poprzecznego [30]. Niewątpliwie w konstrukcjach mechanicznych rodziną części, które charakteryzują się dużym współczynnikiem smukłości są wały [30].

Ponieważ niniejsza praca dotyczy obróbki mechanicznej powierzchni wewnętrznej wału silnika lotniczego, stąd w rozdziale tym skupiono się wyłącznie na charakterystyce części typu wał.

Wał jest częścią, która służy przede wszystkim do przenoszenia momentu obrotowego (skręcającego), ponadto może być obciążony podobnie jak oś, momentem gnącym, siłami ściskającymi i rozciągającymi [24]. Wały i osie mogą być gładkie, kształtowe, pełne lub drażnione, w przekroju prostokątnym do osi – okrągłe lub profilowe,

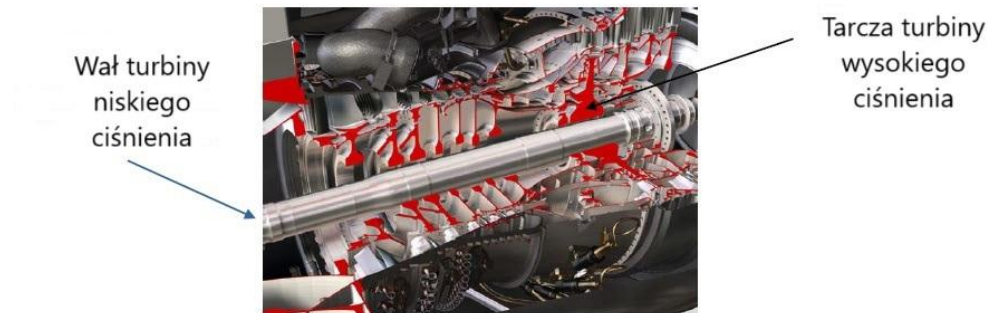
całkowite (jednolite) lub składane [24]. Wały mogą mieć ponadto korby lub wykorbienia i wówczas nazywamy je korbowymi lub wykorbionymi [24]. Na osiach i wałach wyróżniamy takie powierzchnie jak: czopy, powierzchnie swobodne oraz odsadzenia, pierścienie i kołnierze, tworzące zwykle powierzchnie oporowe [24]. Ponadto powierzchnie na wałach mogą być powierzchniami gwintowanymi oraz powierzchniami z wykonanymi wielowypustami, rowkami wpustowymi oraz uzębieniem [24].

Czopami nazywa się te powierzchnie wałów, na których występuje styk z innymi komponentami współpracującymi.

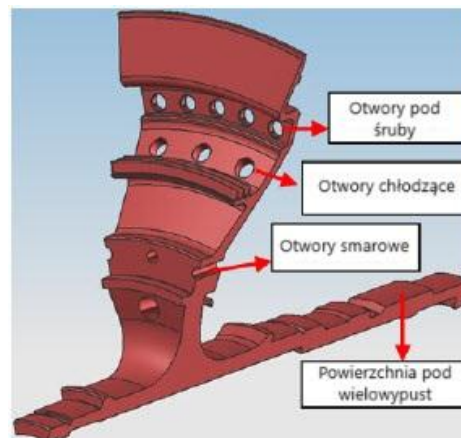
Konstrukcja wałów głównych silników lotniczych turboodrzutowych, bądź turbośmigłowych, odpowiada grupie wałów kształtowych i drażonych wewnątrz, celem zmniejszenia ich masy [25]. Część ta jest elementem łączącym i przenoszącym moc pomiędzy sprężarkami a turbinami w silniku lotniczym [25]. Wymiary wału są projektowane tak, aby zapewnić niezbędną zdolność do przenoszenia momentu obrotowego przy określonym dopuszczalnym naprężeniu [24, 25]. Chociaż w szacowaniu masy wału zakłada się, że jego wymiary są określane przez moment obrotowy, należy pamiętać, że inne czynniki konstrukcyjne mogą wpływać na wymiary wału [24, 25]. Prędkości krytyczne wału lub jego sztywność wzdłużna, mogą faktycznie wyznaczać wymiary, co jest zależne od układu łożysk, sztywności mocowania, lokalizacji i sztywności mas obracających się [24, 25]. Obliczona masa wału powinna być traktowana jako minimalna wartość, która może być znacznie większa, gdy uwzględni się inne kryteria.

We współczesnych silnikach lotniczych podstawowy element wału stanowią odcinki bębnowe pomiędzy sąsiednimi stopniami wirnikowymi sprężarek bądź turbin, a odcinki wału przekazujące moment obrotowy z turbiny na sprężarkę, stanowią również cienkościenne konstrukcje [31]. Specyficzną cechą konstrukcji bębnowych wirników jest ich duża sztywność na zginanie i skręcanie, a jednocześnie ograniczenia konstrukcyjne, wynikające ze znacznych naprężeń obwodowych, wywołanych działaniem obciążeń masowych [31]. Końcowe powierzchnie wałów głównych, łączące wirniki wentylatorów lub sprężarek z napędzającymi je wirnikami turbin, mają odpowiednie wielowypusty, przystosowane do przenoszenia momentu obrotowego we wszystkich zakresach pracy silnika [31]. Zastosowanie cienkościennych konstrukcji dla wałów głównych silników lotniczych umożliwił rozwój metod numerycznych, oraz systemów wspomagających projektowanie części. Ponadto postęp w zakresie technologii wytwarzania, szczególnie

w obrębie obrabiarek numerycznych, a także odpowiednich narzędzi skrawających, również pozwolił na wykonanie takich komponentów. Przykłady cienkościennych, smukłych wałów silników lotniczych przedstawiono na rys. 2.8, 2.9 i 2.10 [32, 33, 34].



Rys. 2.8. Wał główny turbiny niskiego ciśnienia [32].



Rys. 2.9. Wał turbiny niskiego ciśnienia [33].



Rys. 2.10. Wał główny silnika i turbiny niskiego ciśnienia [34].

2.4. Skrawalność stopu Inconel 718

Skrawalnością materiału nazywamy jego podatność na kształtowanie w wyniku obróbki skrawaniem [35]. Pojęcie to niekiedy trudno jest jednoznacznie zdefiniować, gdyż zależy od wielu czynników takich jak [35]:

- właściwości, składu chemicznego, struktury i jej rozkładu w całej objętości materiału obrabianego,
- sposobu i rodzaju realizowanego procesu,
- charakteru procesu skrawania (ciągły, przerywany),
- parametrów skrawania i wpływu cieczy chłodząco-smarujących,
- właściwości materiału narzędziowego, stereometrii ostrza, sposobu ukształtowania krawędzi skrawającej.

Wskaźnikami skrawalności mogą być: okresowa prędkość skrawania, chropowatość powierzchni obrobionej, siły skrawania, temperatura skrawania, dokładność kształtu i wymiarów obrobionej części oraz trwałość ostrza [36].

Stop Inconel 718 jest klasyfikowany przez dostawców jako materiał trudnoskrawalny [3, 17]. Biorąc pod uwagę jeden ze wskaźników skrawalności, którym jest okresowa prędkość skrawania, według producentów narzędzi skrawających, dla stopu Inconel 718 jest ona od 8 do 10 razy mniejsza niż dla stali automatowej B1112 (wg. AISI) [37, 38]. W oparciu o dane producentów superstopów indeks skrawalności *MR* dla stopu Inconel 718 wynosi $MR = 12 \div 14 \%$, gdzie odniesieniem jest również stal B1112, dla której $MR = 100 \%$ [3, 39]. Należy jednak zaznaczyć, że przy odpowiednio zdefiniowanych parametrach skrawania, możliwe jest uzyskanie stabilnego i powtarzalnego procesu technologicznego. Trudności dotyczące skrawalności materiału Inconel 718 koncentrują się wokół następujących obszarów: jakości powierzchni obrobionej definiowanej parametrami chropowatości i topografii, uzyskiwanej dokładności wymiarowej, a także niedostatecznej trwałości ostrza [40, 41]. Źródłem złej skrawalności stopu są następujące właściwości [4, 19, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47]:

- niska przewodność cieplna, doprowadzająca do koncentracji ciepła w strefie skrawania wpływającego na termiczną destrukcję ostrza,
- tendencja do tworzenia się narostu na ostrzu, którego skutkiem jest zwiększona intensywność adhezyjnego zużycia powłoki narzędzia,

- występowanie twardych węglików, m.in. tytanu, molibdenu, niobu, chromu oraz wolframu na granicy ziaren wpływających na intensyfikację zużycia ściernego ostrza skrawającego,
- utwardzenie warstwy wierzchniej podczas skrawania,
- zwiększona wytrzymałość w podwyższonych temperaturach, co w połączeniu ze spadkiem właściwości skrawnych ostrzy w tych temperaturach, wywołuje obniżenie trwałości ostrzy,
- powinowactwo chemiczne stopu Inconel 718 do większości materiałów narzędziowych stosowanych w obróbce skrawaniem,
- możliwość powstawania drgań wpływających na sztywność układu OUPN.

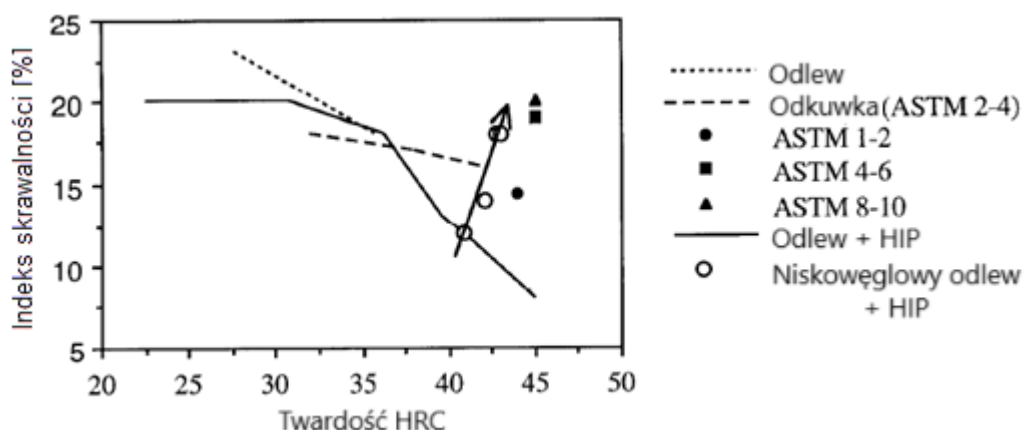
Właściwości stopu Inconel 718 często powodują, że niejednokrotnie wyzwaniem podczas obróbki tego materiału jest zapewnienie wymaganego wykończenia powierzchni oraz uzyskanie żądanej dokładności wymiarowej [48, 49]. Wykończenie powierzchni najczęściej oceniane jest przy pomocy parametrów chropowatości i topografii, a także poprzez uzyskanie wymaganego ukształtowania mikrostruktury warstwy wierzchniej. Generowana wysoka temperatura w strefie skrawania, która w połączeniu z mechanicznym obciążeniem ostrza, a także utwardzanie warstwy wierzchniej, bardzo często prowadzą do szybkiego zużycia krawędzi skrawającej narzędzia [45]. W konsekwencji czynniki te przyczyniają się do utrudnień w dokładnym kształtowaniu powierzchni komponentów według wymagań konstrukcyjnych, co pociąga za sobą zwiększenie kosztów produkcji.

Skrawalność stopu Inconel 718 w największym stopniu zależy od metody wytwarzania półfabrykatu (Rys. 2.11). Zmiany zachodzące w mikrostrukturze podczas procesów produkcyjnych półfabrykatu, takich jak kucie, odlewanie czy odlewanie z prasowaniem izostatycznym na gorąco, wpływają na otrzymaną wielkość ziarna, a także twardość stopu [1, 50]. Na podstawie badań prowadzonych przez firmę Pratt & Whitney oraz United Technologies Research Center zdefiniowano główne przyczyny mające wpływ na skrawalność Inconelu 718 [1, 50], które określono w następujący sposób:

- skrawalność jest zależna od twardości materiału, ale przy twardościach poniżej 38 HRC nie zależy od sposobu otrzymywania półfabrykatu,
- w przypadku odlewów z prasowaniem izostatycznym na gorąco obrobionych cieplnie, których twardość wynosi powyżej 38 HRC, skrawalność gwałtownie

spada i to obniżenie skrawalności jest znaczne w porównaniu do półfabrykatów otrzymywanych inną metodą,

- poprawę skrawalności stopu można zaobserwować, dla struktury, której wielkość ziarna jest poniżej wyrażonego indeksem ASTM 5,
- skrawalność poprawia zmniejszenie zawartości węgla w stopie.



Rys. 2.11. Porównanie indeksu skrawalności stopu Inconel 718 pod względem metody wytwarzania półfabrykatu, rozmiaru ziarna oraz zawartości węgla w stopie; HIP – prasowanie izostatyczne na gorąco (ang. hot isostatic pressing) [50].

W dalszej części rozprawy opisano problematykę skrawalności stopu Inconel 718 w odniesieniu do uzyskiwanej jakości powierzchni, dokładności wymiarowej, a także kształtowania mikrostruktury warstwy wierzchniej i ich zależności od zużycia ostrza.

2.5. Zużycie i trwałość ostrzy w procesie toczenia

Zużycie ostrza jest to szereg zmian geometrycznych, które zaistniały w wyniku pracy narzędzia [35]. Zmiany te mogą być związane lub niezwiązane z ubytkiem materiału, mogą się również odnosić do zmian właściwości wywołanych odkształceniami, temperaturą, a także chemicznym działaniem ośrodka współpracującego [35].

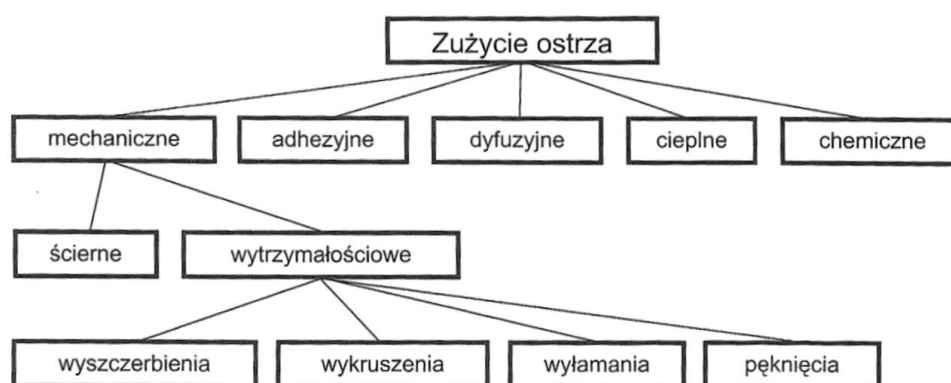
Przyczynami zużycia ostrzy są procesy tribologiczne oraz zjawiska cieplne i chemiczne, które zachodzą podczas skrawania w warunkach [35]:

- wysokiej temperatury skrawania,
- dużych nacisków jednostkowych, często o uderowym charakterze,
- względnego przemieszczania się materiału obrabianego i ostrza.

Procesy zużywania się ostrzy mają niejednorodne przebiegi, ponieważ zależą od wielu czynników, do których należą [35]:

- ✓ rodzaj i właściwości materiału narzędziowego,
- ✓ rodzaj, grubość i właściwości powłok przeciw zużyciowym nanoszonych na ostrza
- ✓ geometrię ostrza,
- ✓ rodzaj i właściwości materiału obrabianego,
- ✓ rodzaj skrawania (zgrubne, kształtujące, wykończeniowe, ciągłe, przerywane itp.),
- ✓ parametry skrawania (prędkość skrawania, posuw i głębokość skrawania),
- ✓ wspomaganie skrawania poprzez:
 - podawanie do strefy skrawania lub narzędzia płynu obróbkowego
 - modyfikację właściwości materiału obróbkowego
 - wymuszone drgania.

Wymienione wyżej czynniki, a także ich zmienne wartości, powodują, że w strefie skrawania, jak również na powierzchniach roboczych ostrza, mogą wystąpić różnorodne wielkości i ciągłe zmiany: nacisków, temperatur, naprężeń, a także prędkości względnego przemieszczania się materiału obrabianego i ostrza oraz drgań narzędzia względem przedmiotu obrabianego [35]. Na podstawie wymienionych warunków można wyodrębnić następujące rodzaje zużycia ostrzy (Rys. 2.12) [35]: mechaniczne, adhezyjne, dyfuzyjne, cieplne oraz chemiczne.



Rys. 2.12. Podział i odmiany zużycia ostrzy [35]

Zużycie mechaniczne ostrza może wystąpić na skutek przekroczenia wytrzymałości doraźnej lub zmęczeniowej ostrza, może mieć ono charakter skokowy, dlatego jest nazywane *zużyciem wytrzymałościowym ostrza* [35, 36]. Drugim rodzajem zużycia mechanicznego jest

zużycie *ściernie* ostrza i powstaje ono wskutek stopniowego, mającego ciągły charakter ścierania się ostrza [35, 36].

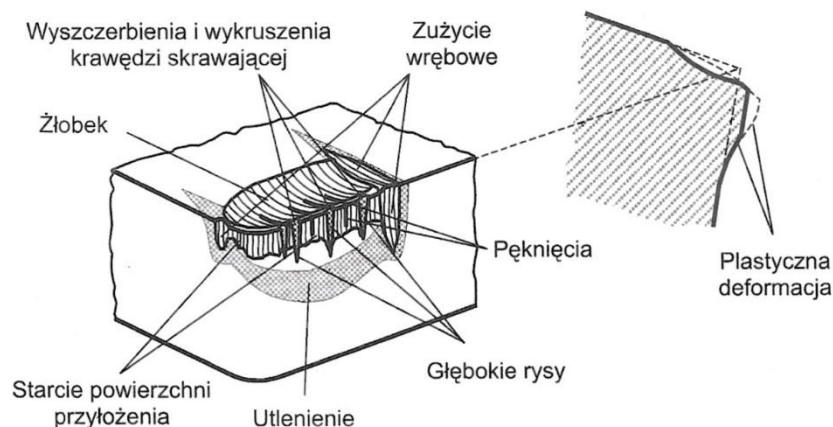
Zużycie wytrzymałościowe najczęściej przejawia się [35]:

- wyszczerbieniami krawędzi ostrza – to drobne, mikroskopowe ubytki materiału narzędzia,
- wykruszeniami – dotyczą one ubytku nieco większych fragmentów ostrza w obrębie krawędzi skrawającej,
- wyłamaniem – ubytki ostrza sięgające poza obszar bezpośredniego styku ostrza z materiałem obrabianym, dochodzące czasami do podstawy płytki skrawającej lub ostrza,
- pęknięciami – występują one na powierzchni natarcia lub przyłożenia w pobliżu krawędzi skrawającej, ich przebieg może być prostopadły lub równoległy do krawędzi skrawającej.

Jedną z przyczyn zużycia wytrzymałościowego, może być zmęczenie materiału wywołane drganiami narzędzia względem przedmiotu obrabianego, cyklicznością procesu zrywania narostu, formowania się wióra, wcinania ostrza w materiał, mające miejsce podczas obróbki przerywanej [35].

Zużycie *ściernie* powstaje w wyniku rysowania, mikroskrawania i ścierania mikrowierzchołków nierówności, znajdujących się na powierzchni ostrza, przez twarde składniki struktury materiału obrabianego (wtrącenia, cementyt, węgliki metali stopowych, cząsteczki narostu itp.) [35]. Do ścierania powierzchni ostrza przyczyniają się również mikrocząsteczki zużytych fragmentów narzędzia utwardzone w materiale obrabianym [35]. Ewolucja zużycia *ściernego* jest tym większa, im mniejszy jest w temperaturze skrawania stosunek twardości materiału narzędzia do twardości mikrocząstek trących o powierzchnię ostrza [35]. Zużycie wytrzymałościowe, które osiągnie cechy katastroficznego, z reguły występuje w ostatnim stadium postępującego zużywania się ostrza. Zostają wtedy przekroczone dopuszczalne kryteria stępienia narzędzia, powodując wzrost oporów skrawania przy jednoczesnym osłabianiu się ostrza.

Typowe objawy wytrzymałościowego i *ściernego* zużycia ostrza przedstawiono na rys. 2.13.



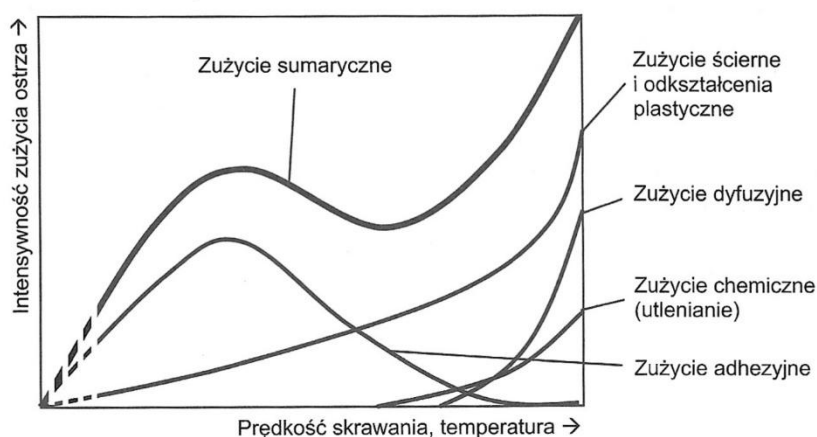
Rys. 2.13. Objawy zużycia ostrzy [35]

Poszczególne rodzaje zużycia ostrza mogą ulegać intensyfikacji, zmniejszać się, a nawet znikać w miarę zmian warunków, w jakich przebiega proces skrawania [35].

Zużycie adhezyjne ostrza powstaje na skutek szepiania się materiału obrabianego z mikronierównościami występującymi na powierzchniach roboczych ostrza [35]. Jeżeli siły adhezji szepionego materiału będą większe od sił spójności między fragmentami cząstek materiału narzędzia, to może dochodzić do wrywania fragmentów materiału ostrza [35, 36]. Wyrwany fragment ostrza z jego podłoża może zostać utwierdzony w materiale obrabianym, co przyczyni się do intensywności zużycia ściernego narzędzia. Natomiast w przypadku kiedy siły kohezji w materiale obrabianym będą mniejsze niż siły adhezji z materiałem ostrza, to wówczas dojdzie do szepiania się jego fragmentu z powierzchnią narzędzia i rozpocznie się proces tworzenia narostu [35, 36].

Narost jest klinową, włóknistą, silnie umocnioną zgmiotem warstwą materiału obrabianego przytwierdzoną do powierzchni natarcia w wyniku sił adhezji i dużego tarcia, w pobliżu krawędzi skrawającej [35, 36]. Narost może pojawić się również na powierzchni przyłożenia [35, 36]. Zjawisko to powstaje najczęściej przy małych prędkościach skrawania i jest zależne od wiązkości materiału obrabianego oraz jego powinowactwa z materiałem ostrza [35, 36].

Zatem intensywność zużycia adhezyjnego jest zależna od powinowactwa materiału ostrza i obrabianego [35, 36]. W miarę wzrostu temperatury skrawania zużycie adhezyjne najpierw rośnie, natomiast później maleje (Rys. 2.14) [35, 36].



Rys. 2.14. Mechanizmy i intensywność zużywania się ostrzy [35]

Uzasadnia się to w taki sposób, że wzrastająca temperatura w czasie procesu skrawania sprzyja przywarciom adhezyjnym, stąd w początkowym etapie rośnie wywołane nią zużycie. Przy dalszym wzroście temperatury następuje zwiększenie uplastycznienia materiału obrabianego i pomimo wzmożonej skłonności do przywarć adhezyjnych maleje wytrzymałość materiału obrabianego. W takich warunkach materiał obrabiany nie jest już w stanie wrywać cząstek materiału ostrza, gdyż jego wytrzymałość jest utrzymana w wysokich temperaturach w znacznie niższym stopniu niż wytrzymałość materiału narzędzia. Nasileniu zużycia adhezyjnego towarzyszy równoległe występowanie omówionego wcześniej zjawiska narostu. Fragmenty narostu, które ulegną zerwaniu po uderzeniu w krawędź skrawającą i tarcia o powierzchnię przyłożenia, przyczyniają się do dodatkowego ściernego i wytrzymałościowego zużycia ostrza. Po osiągnięciu pewnej temperatury zużycie adhezyjne zanika, a powstający narost przekształca się w przyhamowaną warstwę materiału przy powierzchni natarcia, po której następuje poślizg wióra [35].

Zużycie dyfuzyjne ostrza zaczyna pojawiać się w wyższych temperaturach, ale jego wzrost następuje gwałtownie. Poprzez ruchy cieplne atomy materiału narzędzia przenikają w głąb materiału obrabianego co powoduje naturalny ubytek ostrza. Dyfuzja składników odbywa się z różną szybkością, która zależna jest od ruchliwości atomów, na którą wpływa z kolei temperatura i rodzaj pierwiastka [35]. Dla przykładu ruchliwość atomów węgla jest około 70×10^3 większa niż atomów żelaza [51]. Szybkość przenikania uzależniona jest także od różnicy stężenia pierwiastków dyfundujących na granicy styku powierzchni. Dyfuzja pierwiastków zachodzi w obu kierunkach. W czasie procesu obróbki stali ostrzem z węglików spiekanych, najszybciej z ostrza dyfunduje węgiel, natomiast znacznie wolniej

wolfram, tytan i kobalt [35]. Do ostrza z kolei przenika żelazo. Tworzą się wówczas nowe związki międzymetaliczne i roztwory stałe. Wzajemne kierunki migracji atomów nie są korzystnym zjawiskiem, gdyż zmienia ona pierwotne proporcje składników materiału ostrza. Prowadzi to bezpośrednio do obniżenia własności skrawnych ostrza, a w konsekwencji do jego przyspieszonego zużycia [35].

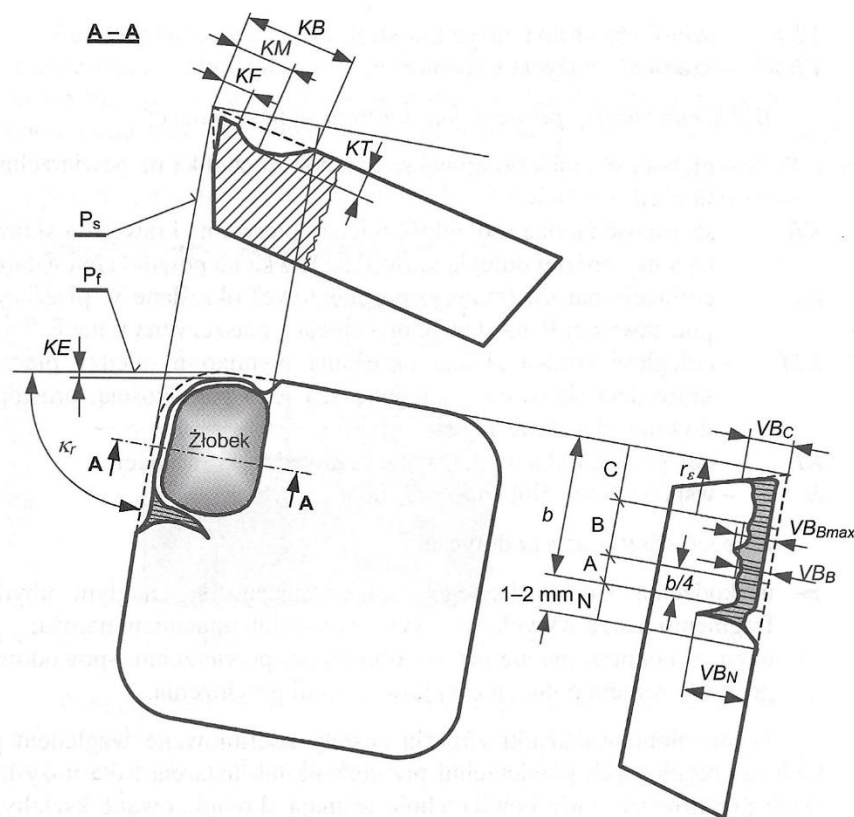
Zużycie dyfuzyjne ostrza jest w dużej mierze uzależnione od rodzaju składników materiałów obrabianego oraz narzędzia [35].

Zużycie cieplne ostrza dotyczy zmian właściwości materiału ostrza w wyniku przekroczenia temperatur, w których narzędzie traci swoje właściwości skrawne. Każdy materiał narzędziowy posiada określony poziom temperatury, po przekroczeniu którego wykonane z niego narzędzie nie powinno być eksploatowane. Jeżeli podczas obróbki temperatura osiąga dość wysokie wartości i towarzyszą jej znaczne obciążenia ostrza wywołane siłami skrawania, wówczas może dojść do zjawiska plastycznego i wysokotemperaturowego pełzania materiału i osiadania naroża (Rys. 2.13). Ostrza z węglików spiekanych poddają się plastycznej deformacji, choć jest ona mniejsza niż w przypadku stali szybko tnących. Natomiast w przypadku niektórych ostrzy wykonanych z ceramiki można zauważyć powierzchniowe, plastyczne odkształcenie i przemieszczenie się rozmażanych ziaren ceramicznych wzdłuż kierunku przemieszczania się materiału obrabianego po powierzchniach ostrza [35].

Zużycie chemiczne ostrza pojawia się w postaci utleniania. Warstwy tlenków, które powstają od węglików, wolframu, tytanu i kobaltu osiągają większą objętość od materiału utlenionego, stają się porowate i kruche. Tworzą one warstwę pasywną na powierzchni ostrza, chroniąc ją przed dalszym utlenianiem, ale są słabo związane z podłożem, co powoduje, że dają się łatwo usunąć. Zlokalizowane są w sąsiedztwie strefy skrawania (Rys. 2.13), gdzie jeszcze występuje wysoka temperatura, ale i jednocześnie łatwy dostęp powietrza. Powstające tlenki nie są szkodliwe do momentu, kiedy są poza miejscem styku materiału obrabianego z ostrzem. Jeżeli obszar zużycia powierzchni ostrza dotrze do miejsca, w którym tworzą się tlenki, interakcja różnych rodzajów zużycia może być wówczas wzmożona [35].

Wielkość śladów zużycia na powierzchniach roboczych narzędzia ocenia się za pomocą wskaźników zużycia ostrza (Rys. 2.15) [35]. Podstawowe informacje oraz

rekomendowane dopuszczalne wartości dotyczące wskaźników zużycia ostrza zawarte są w normie ISO 3685.



Rys. 2.15. Geometryczna identyfikacja wskaźników zużycia ostrzy [35]

Wskaźniki zużycia określone są dla powierzchni przyłożenia i natarcia. W przypadku powierzchni przyłożenia wyodrębnia się je w płaszczyźnie P_s , prostopadle do krawędzi skrawającej w jej pierwotnym położeniu i w czterech strefach A, B, C i N [35]. Strefa C dotyczy części zaokrąglonej naroża, strefa B odnosi się do środkowej części obszaru starcia, strefa A obejmuje odcinek 0.25 długości zużytej krawędzi skrawającej b , najbardziej oddalonej od naroża. Natomiast strefa N rozchodzi się poza zakresem kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym na długości $1 \div 2$ mm i występuje w niej zużycie wrębowe [35]. Dla powierzchni przyłożenia zostały zdefiniowane następujące wskaźniki zużycia:

VB_B – średnia szerokość pasma zużycia powierzchni przyłożenia

VB_{Bmax} – największa szerokość pasma zużycia powierzchni przyłożenia

VB_C – szerokość pasma zużycia naroża

VB_A – szerokość pasma zużycia w strefie A

VB_N – szerokość zużycia wrębowego

Dla powierzchni natarcia obowiązują następujące wskaźniki zużycia [35]:

KT – głębokość żłobka (największa głębokość żłobka na powierzchni natarcia)

KB – szerokość żłobka (definiowana jako odległość między pierwotną krawędzią skrawającą a najbardziej odległą krawędzią rowka na powierzchni natarcia)

KE – cofnięcie naroża (zużycie promieniowe) określane w płaszczyźnie podstawowej P_r na śladzie przecięcia z płaszczyzną tylną P_p

KM – odległość środka żłobka, odniesiona jest do wymiaru pomiędzy pierwotną krawędzią skrawającą a największą jego głębokością, w kierunku prostopadłym do krawędzi skrawającej

KF – odległość żłobka od pierwotnej krawędzi skrawającej

K – współczynnik żłobka $K = KT/KM$

Innymi wskaźnikami zużycia ostrza mogą być:

- uszkodzenie katastroficzne, spowodowane nagłym ubytkiem fragmentu ostrza, wywołane np. wyłamaniem
- nagłe pogorszenie jakości powierzchni obrobionej

Wymienione wyżej wskaźniki stanowią formę bezpośredniej ewaluacji stanu ostrza skrawającego.

W warunkach przemysłowych kiedy często nie ma dostępu do urządzeń pomiarowych umożliwiających ocenę zużycia ostrza, stosowane są wskaźniki pośrednie. Wskaźniki te można podzielić na fizyczne i technologiczne [35]. Do fizycznych wskaźników zużycia ostrza należą:

- składowe siły, momenty i moc skrawania,
- temperaturę skrawania,
- drgania, w tym emisję akustyczną,
- barwę wióra,
- postać i kształt wióra.

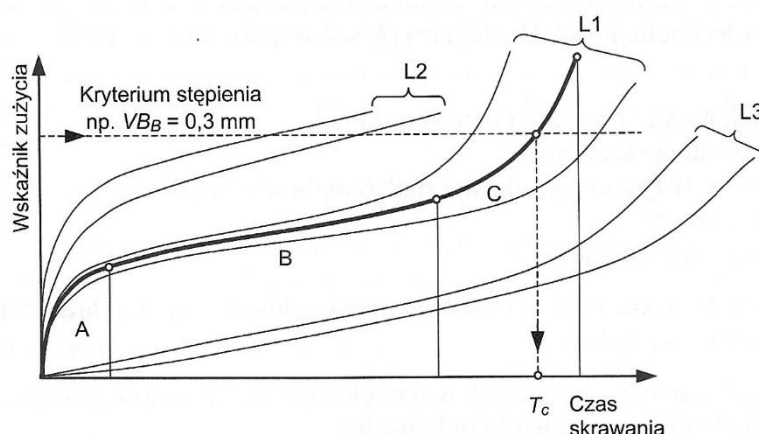
Natomiast wskaźniki technologiczne dotyczą:

- struktury geometrycznej powierzchni, w tym chropowatości powierzchni oraz mikrostruktury warstwy wierzchniej,
- dokładności wymiarowo-kształtowej.

W warunkach przemysłowych z praktycznego punktu widzenia nie jest istotne, czy dane narzędzie osiągnęło kryterium dopuszczalnego stopienia określonego np. wskaźnikiem zużycia ostrza $VB_B = 0,3$ mm według normy ISO 3685. Natomiast zasadnicze znaczenie ma to, czy powierzchnia obrabiana przedmiotu mieści się w wymaganej tolerancji wymiarowo-kształtowej oraz tolerancji chropowatości [35].

Przebiegi krzywych zużycia w funkcji czasu mogą przybierać różną formę (Rys. 2.16). Definiując krzywą zużycia powierzchni przyłożenia ostrza pracującego w standardowych warunkach, jej kształt najczęściej zbliżony jest do krzywej Lorentza (zakres L1) [35, 36]. Można wyróżnić na niej trzy charakterystyczne etapy:

- etap A – jest to okres przyspieszonego zużycia, odpowiada on zjawisku docierania się elementów par tribologicznych,
- etap B – jest to okres stopniowej i równomiernej intensywności zużywania się ostrza,
- etap C – jest okresem powtórnego przyspieszonego zużycia, do momentu osiągnięcia zużycia katastroficznego, wykluczającego narzędzie z pracy.



Rys. 2.16. Typowe przebiegi krzywych zużycia ostrzy skrawających [35]

Dla powierzchni natarcia zużycie ostrzy większości materiałów narzędziowych może przebiegać według krzywych z zakresu L3 (Rys.2.16) [35]. Zużycia ostrzy wykonanych z materiałów ceramicznych i supertwardych często przybierają kształt krzywych z zakresu L2 [35, 52].

Stępienie ostrza jest to stan graniczny spowodowany zużywaniem się ostrza, w którym wystąpiła tak znaczna utrata jego własności skrawnych, że proces skrawania nie może być dalej prowadzony [35].

Kryterium stępienia jest to ustalona wartość wskaźnika zużycia ostrza w chwili, kiedy ostrze uległo stępieniu [35]. Wyodrębnia się następujące kryteria stępienia ostrza:

- geometryczne,
- technologiczne,
- fizyczne,
- ekonomiczne.

Geometryczne kryteria stępienia to przyjęte wartości wskaźników zużycia powierzchni przyłożenia lub natarcia, ustalone na podstawie wieloletnich badań i doświadczeń, np. szerokość starcia powierzchni przyłożenia w obszarze naroża VB_C [35].

Technologiczne kryteria stępienia to takie przyjęte zużycie narzędzia, w którym zostaje przekroczone któreś z wymagań technologicznych obróbki, np. dopuszczalna chropowatość powierzchni, dokładność wymiarowa lub kształtowa obrabianej powierzchni [35].

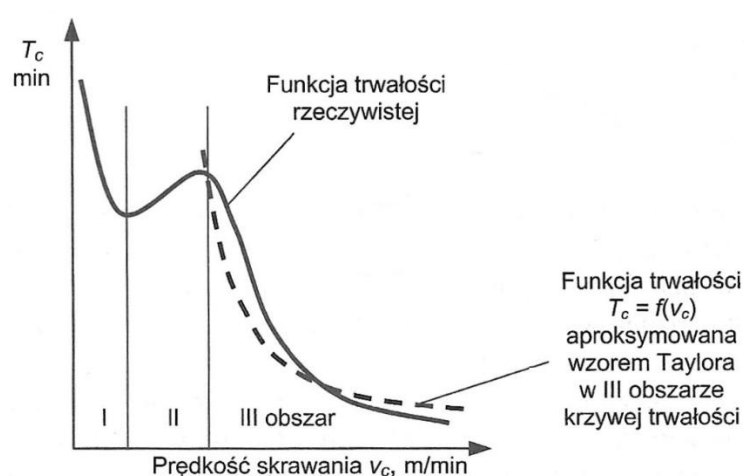
Fizyczne kryteria stępienia odnoszą się do pośrednich, fizycznych wskaźników zużycia ostrza, np. temperatura, siły, moc, drgania [35]. Fizyczne wskaźniki zużycia są najczęściej stosowane w układach nadzorujących proces skrawania. Obecnie obrabiarki CNC przeznaczone do procesu obróbki skrawaniem są bardzo często wyposażone w układy nadzorujące, które wykorzystują pośrednie, fizyczne wskaźniki zużycia ostrza.

Ekonomiczne kryteria stępienia wyznacza się, w celu osiągnięcia najniższych kosztów eksploatacji narzędzia lub najniższych kosztów operacji. Przyjmując coraz większe wartości kryteriów stępienia, uzyskuje się coraz dłuższe okresy trwałości narzędzia [35].

Trwałość narzędzia jest wielkością, która charakteryzuje w sposób bezpośredni czas skrawania do momentu osiągnięcia kryterium stępienia. Wielkość ta może być również określana pośrednio poprzez liczbę wykonanych operacji oraz długość drogi skrawania. Jeżeli wielkość ta wyrażona jest czasem skrawania wówczas nazywa się okresem trwałości ostrza T_c [35].

W przypadku narzędzi wieloostrowych przyjęto, że trwałość obejmuje okres pracy narzędzia do chwili, kiedy dowolne ostrze osiągnie kryterium stępienia [35].

Przedstawiając trwałość narzędzia w funkcji prędkości skrawania, można zauważyć, że przebieg jej nie jest monotoniczny (Rys. 2.17) [35]. W pierwszym okresie przebiegu tej zależności można zauważyć gwałtowny spadek trwałości co jest spowodowane dużym udziałem zużycia adhezyjnego, występującego przy niskim zakresie prędkości skrawania. W miarę wzrostu prędkości skrawania zużycie adhezyjne zanika i trwałość zaczyna rosnąć. Kiedy przekroczona zostanie pewna graniczna prędkość skrawania, temperatura w strefie skrawania osiąga na tyle wysoką wartość, że zaczynają nasilać się inne rodzaje zużycia ostrza, np. zużycie dyfuzyjne, chemiczne i ściernie. Wówczas trwałość narzędzia zaczyna ponownie się zmniejszać [35].



Rys. 2.17. Zależność rzeczywistej i aproksymowanej wzorem Taylora trwałości narzędzia od prędkości skrawania w normalnym układzie współrzędnych [35]

Należy dodać, że biorąc pod uwagę współczesne materiały narzędziowe zalecane prędkości skrawania występują najczęściej w trzecim obszarze krzywej trwałości, która monotonicznie maleje w miarę wzrostu prędkości skrawania [35].

Podstawową formułą opisującą trwałość jest zależność (2.1) Taylora [53], w której iloczyn prędkości skrawania v_c i trwałości narzędzia T_c podniesionej do określonej potęgi n ma wartość stałą C_v dla ustalonych pozostałych warunków obróbki:

$$v_c T_c^n = C_v \quad (2.1)$$

Jeżeli powyższa zależność zostanie przekształcona w formułę (2.2), wówczas określa ona trwałość narzędzia w funkcji prędkości skrawania. Wzór ten w dość dokładny sposób definiował rzeczywiste przebiegi [35]. Ponadto formuła ta miała jeszcze zaletę, że przedstawiona w układzie podwójnie logarytmicznym przebiegała liniowo, co w znacznym

stopniu ułatwiło aproksymację współczynników regresji równania na podstawie wyników badań doświadczalnych nad trwałością:

$$T_c = \frac{C_T}{v_c^{s_T}} \quad (2.2)$$

gdzie:

C_T – stała uwzględniająca wpływ wszystkich innych czynników nie uwzględnionych we wzorze,

s_T – wykładnik potęgowy definiujący wielkość wpływu prędkości skrawania

Jeżeli zależność (2.2) zostanie przekształcona jak poniżej:

$$v_c^{s_T} = \frac{C_T}{T_c} \quad (2.3)$$

$$v_c = \left(\frac{C_T}{T_c} \right)^{\frac{1}{s_T}} \quad (2.4)$$

wówczas otrzymana formuła umożliwia wyznaczenie tzw. okresowej prędkości skrawania $v_{c(T)}$, to znaczy takiej, dla której uzyskuje się zdefiniowaną trwałość narzędzia [35].

Predykcja rzeczywistego zużycia ostrza jest zadaniem złożonym, nawet przy zastosowanych stałych parametrach skrawania w całym okresie pracy narzędzia [35]. Bardzo często w obróbce skrawaniem występują liczne przypadkowe zakłócenia, które powodują, że trwałość narzędzia jest zmienną losową [54]. Rozrzuty trwałości opisywane są wieloma rozkładami statystycznymi, z których najbardziej uniwersalny, a jednocześnie złożony jest rozkład Weibulla [55]. Duża różnorodność rozkładów statystycznych stosowanych do opisu rozrzutów trwałości narzędzi pokazuje, że samo zużywanie się ostrza i towarzysząca mu trwałość są procesami o trudnych do prognozowania parametrach [35].

$$V(T_c) = \frac{S(T_c)}{T_{c(sr)}} \quad (2.5)$$

Współczynniki zmienności, wyrażające stosunek średniego odchylenia standardowego do trwałości średniej, mogą osiągać w skrajnych przypadkach wartości większe od jedności [35].

Zatem predykcja trwałości narzędzi jest generalnie trudna i może być obarczona dużymi przedziałami ufności [35].

Prognozowaniem zużycia narzędzia w warunkach pracy o zmiennych parametrach skrawania zajmowali się autorzy prac [56, 57]. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że nie zachodzi prosta przemienność sumowania się zużyć ostrza wyznaczanych analitycznie:

$$\begin{aligned} \Delta VB(v_{c1}, f_1, a_{p1}) + \Delta VB(v_{c2}, f_2, a_{p2}) + \dots + \Delta VB(v_{cn}, f_n, a_{pn}) \neq \\ \neq \Delta VB(v_{cn}, f_n, a_{pn}) + \dots + \Delta VB(v_{c2}, f_2, a_{p2}) + \Delta VB(v_{c1}, f_1, a_{p1}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Wpływ warunków z poprzednich etapów obróbki na zużycie w następnych cyklach pracy narzędzia staje się jeszcze trudniejsze do określenia, gdy narzędzia pracują ze zmiennymi parametrami [52, 56].

Na dynamikę zużywania się ostrza wpływają także zmiany toczonej średnicy, szczególnie przy użyciu ostrzy ceramicznych [35]. Dlatego dokładne określenie trwałości ostrza w funkcji parametrów skrawania nie było łatwe, co skłoniło wielu badaczy do szukania rozwiązań.

Jedną z metod pokonania powyższych trudności zaproponował Jacobs, który oparł swoją formułę na rozszerzonym wzorze Taylora [35]:

$$T_c = \frac{C_T}{v_c^{s_T} f^{u_T} a_p^{g_T}} \quad (2.7)$$

gdzie:

s_T , u_T , g_T – wykładniki potęgowe, które określają wpływ odpowiednio prędkości skrawania, posuwu i głębokości skrawania

2.6. Rodzaje materiałów narzędziowych i powłok stosowanych do obróbki stopu Inconel 718

Materiały narzędziowe przeznaczone do obróbki stopu Inconel 718 muszą spełniać bardzo wysokie wymagania, ponieważ skrawalność tego materiału jest na bardzo niskim poziomie. Zatem warunki, w jakich pracują wykonane z nich ostrza są niezwykle trudne. Obróbce tego materiału towarzyszy wywiązywanie się wysokich temperatur, jak również dużych nacisków jednostkowych [41]. Należy zwrócić uwagę, że ze względu na aspekty

technologiczny takie jak dokładność wymiarowa oraz chropowatość powierzchni i intensywne zużywanie się ostrza, obróbka skrawaniem tego materiału jest mało efektywna [40, 41].

Stop Inconel 718 w obróbce skrawaniem jest zaklasyfikowany do grupy materiałów HRSA (ang. Heat Resistant Super Alloys). Do najczęściej stosowanych materiałów narzędziowych do obróbki stopu 718 należą różnego rodzaju powlekane węgliki spiekane [4, 40, 58, 59], ceramika narzędziowa [60, 61, 62], kompozyty ceramiczne (Bidemic) [63], oraz regularny azotek boru [61, 64]. W tabeli 2.3 przedstawiono przykładowe materiały narzędziowe oraz geometrie ostrzy skrawających przeznaczone do obróbki zgrubnej, zalecane przez producentów narzędzi. Natomiast w tabeli 2.4 przedstawiono materiały narzędziowe oraz geometrie ostrzy przeznaczone do obróbki wykończeniowej stopu Inconel 718.

W przypadku obróbki zgrubnej stopu 718 producenci narzędzi rekomendują zastosowanie węglików spiekanych z różnymi powłokami, oraz narzędzi z ceramiki narzędziowej lub kompozytów ceramicznych. Nowo opracowane narzędzia z węglików spiekanych umożliwiają zastosowanie zakresów prędkości skrawania, na poziomie $70 \div 80$ m/min [37]. Można zauważyć tutaj pewien rozwój w obrębie wspomnianego typu narzędzi skrawających w porównaniu do tych, które używane jeszcze kilka lat temu, pozwalały na pracę w zakresie prędkości skrawania na poziomie $30 \div 50$ m/min.

W przypadku narzędzi z ceramiki narzędziowej również nastąpił rozwój, gdyż powstały nowo opracowane materiały w postaci kompozytów ceramicznych, np. przez firmę Sandvik materiał 6220 i 6230, jak również przez japońską firmę NTK materiał JP2 (Bidemics) [65]. Uzyskanie powyższych materiałów również pozwoliło na zwiększenie średniej wartości prędkości skrawania z 250 m/min w przypadku standardowych narzędzi z ceramiki do wartości 400 m/min. Projektując strategię obróbki zgrubnej dla części wykonanych z materiału Inconel 718 i zakładając wielokrotne przejścia narzędzia, należy wziąć pod uwagę podatność tego stopu na umacnianie warstwy wierzchniej [66]. Umocniona warstwa przyczynia się do powstawania nacięcia rowkowego (ang. notch wear) na parokrotnie pracującym ostrzu w miejscu maksymalnej głębokości skrawania [66, 67]. Obecnie aby uniknąć tego zjawiska można zastosować kilka metod optymalizacji obróbki, jedną z nich jest użycie zmiennej głębokości skrawania w zakresie pracy łamacza wióra [66, 68].

Tabela 2.3. Zestawienie przykładowych narzędzi i parametrów skrawania według różnych producentów, przeznaczonych do toczenia zgrubnego stopu Inconel 718 (opracowanie własne).

Producent	Materiał narzędziowy		Geometria płytki wg ISO	v_c [m/min]	f [mm/obr]	a_p [mm]
Sandvik	Węglik spiekane	WC + TiAlN [PVD]	CNMG,	40÷75	0,14÷0,23	0,5÷4
		WC + TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN [CVD]	DNMG, WNMG	75÷90	0,18÷0,3	1÷4
	Ceramika narzędziowa	670 (SiCw)	RNGN	235÷305	0,11÷0,31	0,6÷3,2
	Kompozyt ceramiczny	6220 (TiC, Ti(C,N))	RNGN	285÷345	0,11÷0,31	0,6÷3,2
Mitsubishi Materials	Węglik spiekane	WC + (Al, Ti)N [PVD]	CNMG, DNMG, WNMG	30÷100	0,1÷0,25	0,5÷4
Kennametal	Węglik spiekane	WC + AlTiN	CNMG, DNMG, WNMG	15÷140	0,2÷0,5	0,8÷5,1
	Ceramika narzędziowa	KYS25 (SiAlON)	RNGN	170÷380	0,06÷0,3	0,1÷2,54
Greenleaf	Węglik spiekane	WC + TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN [CVD]	CNMG, DNMG, WNMG	45÷85	0,25÷0,56	0,25÷6,35
	Ceramika narzędziowa	WG300 (SiCw)	RNGN, SNGN	200÷300	0,1÷0,22	1,0÷3,0

Inną metodą, która umożliwia optymalizację zużycia narzędzia jest zastosowanie toczenia symultanicznego (3-osowego) z ciągłym użyciem osi obrotowej [69]. Powyższa metoda jest dostępna oczywiście tylko na obrabiarkach wielozadaniowych, wyposażonych w uchylną głowicę narzędziową, bądź uchylny stół.

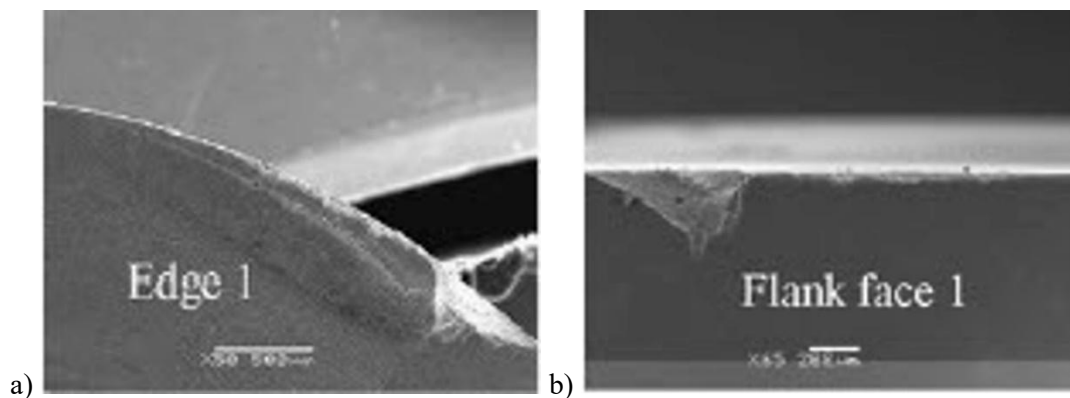
Tabela 2.4. Zestawienie przykładowych narzędzi i parametrów skrawania według różnych producentów, przeznaczonych do toczenia wykończeniowego stopu Inconel 718 (opracowanie własne).

Producent	Materiał narzędziowy		Geometria płytki wg ISO	v_c [m/min]	f [mm/obr]	a_p [mm]
Sandvik	Węglik spiekane	WC + TiAlN [PVD]	CCGT, DCGT, VBGT, VBMT	32÷80	0,12÷0,28	0,5÷2,8
		WC + TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN [CVD]		75÷100	0,12÷0,28	0,5÷2,8
	Regularny azotek boru	CBN + TiN [PVD]	DCGW, VBGW	160÷195	0,07÷0,27	0,07÷0,4
Mitsubishi Materials	Węglik spiekane	WC + (Al, Ti)N [PVD]	CCGT, DCGT, VBGT, VBMT	30÷110	0,1÷0,25	0,2÷0,8
Kennametal	Węglik spiekane	WC + AlTiN	CCGT, CNGG, DCGT, VBGT, VBMT	15÷140	0,1÷0,4	0,8÷3,95
	Regularny azotek boru	KBH20 (CBN)	DCGW, VBGW	120÷340	0,05÷0,25	0,03÷0,3
Walter	Węglik spiekane	WC + TiCN + Al ₂ O ₃ (+Al) [PVD]	CCGT, DCGT, VCGT, VBGT	30÷60	0,1÷0,3	0,3÷3,0

Ten rodzaj obróbki zdecydowanie zwiększa trwałość narzędzia i stabilność jego pracy, ponieważ zapewniona jest tutaj ciągła zmiana punktu styku ostrza skrawającego z przedmiotem obrabianym. Tym samym zużycie ostrza jest rozłożone na większą długość krawędzi skrawającej, powodując zwiększenie jego trwałości [69]. Kolejną metodą optymalizacji zużycia ostrza podczas obróbki stopu Inconel 718 jest zastosowanie strategii

toczenia dynamicznego. Jest to stosunkowo nowa strategia obróbki opracowana w systemach CAM typu NX czy Mastercam. Wygenerowana ścieżka narzędzia przybiera kształt krzywych o bardzo dużym i zmiennym promieniu. Biorąc pod uwagę parametry technologiczne, metoda ta opiera się na małych wartościach głębokości skrawania i dużych wartościach posuwu. Przejścia narzędzia po krzywych o zmiennym promieniu powoduje również zmienny punkt styku ostrza z przedmiotem obrabianym [70].

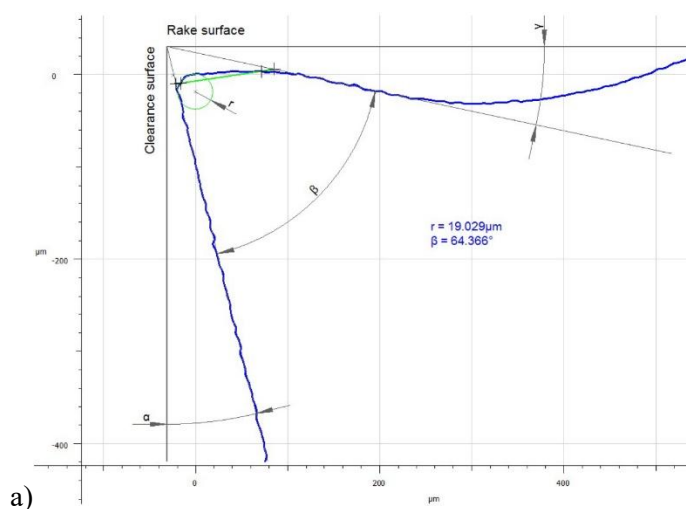
W zakresie obróbki wykończeniowej stopu 718 zaleca się stosować nowej generacji narzędzia z węglików spiekanych. Przykładem mogą być tutaj gatunki S205 firmy Sandvik, oraz KCS10B od Kennametal [19, 40, 71]. Gatunki te pozwalają na pracę ze zwiększoną wartością prędkości skrawania, w zakresie $75 \div 110$ m/min, zależnie od wymaganej trwałości ostrza. Wymienione materiały narzędziowe charakteryzują się znacznie większą wytrzymałością w podwyższonych temperaturach w strefie skrawania, spowodowanych wzrostem prędkości skrawania [40]. Dodatkowym atutem jest tutaj także fakt, że jeżeli ostrze może pracować z dwukrotnie większą prędkością skrawania w porównaniu do starszych rozwiązań narzędziowych, to oznacza, że wykona swoją pracę znacznie szybciej, a tym samym może pracować dłużej. Jest to także bardzo korzystne z tego powodu, że prędkość skrawania jest parametrem technologicznym, który ma najmniejszy wpływ na siły skrawania [35]. W wielu aplikacjach stosowane są także ostrza wykonane z regularnego azotku boru [61, 64, 72, 73]. Jest to zaawansowany materiał narzędziowy, który pozwala na wysokowydajną obróbkę HSM (ang. High Speed Machining) materiału Inconel 718, gdyż zakres stosowanych wartości prędkości skrawania dla tego materiału jest wysoki w porównaniu do narzędzi wykonanych z węglików spiekanych. Autorzy pracy [64] wykazali, że pod względem zużycia ostrza, najkorzystniej w testach wypadły płytki z zawartością CBN od 45% do 60% i ze spoiwem ceramicznym zbrojonym TiN, oraz pracujące w zakresie prędkości skrawania $250 \div 300$ m/min (Rys. 2.18). Należy jednak pamiętać, że CBN charakteryzuje się dużą twardością co znacznie osłabia jego odporność na obróbkę uderową. Oznacza to w konsekwencji, że powierzchnie przeznaczone do obróbki takim materiałem narzędziowym nie powinny być uprzednio poddane zbyt agresywnej obróbce skrawaniem i winne być wolne od wszelkich nieregularności, w tym zbyt dużych wartości błędów kształtu.

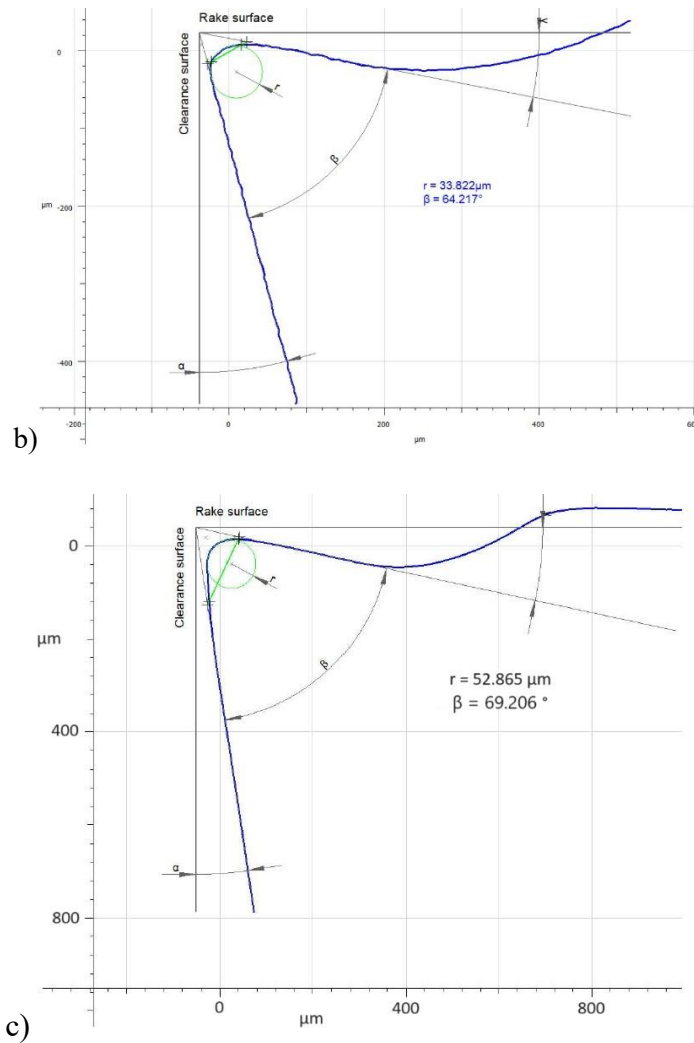


Rys. 2.18. Obrazy SEM ostrza CBN po obróbce stopu Inconel 718 [64]

2.7. Charakterystyka geometrii i mikrogeometrii ostrzy skrawających rekomendowanych dla toczenia wykończeniowego stopu Inconel 718

Geometria i mikrogeometria ostrzy skrawających jest istotnym czynnikiem, mającym wpływ na zużycie ostrza oraz uzyskiwaną strukturę geometryczną powierzchni [74]. Biorąc pod uwagę obróbkę materiału Inconel 718 należy uwzględnić znacznie szybsze zużycie ostrza skrawającego z uwagi na złą obrabialność tego stopu. Producenci narzędzi skrawających zalecają do toczenia superstopów ostrza z węglików spiekanych lub z regularnego azotku boru CBN. Narzędzia z węglików spiekanych mają z reguły wykonany łamacz wióra z naniesionym kątem natarcia, który w połączeniu z kątem przyłożenia nadaje tego typu ostrzom znacznie bardziej ostrą geometrię. Ponadto wielu producentów narzędzi rekomenduje zastosowanie ostrzy szlifowanych do obróbki stopu 718. Zabieg szlifowania determinuje dodatkowo zaostrzenie geometrii, ponieważ powoduje zmniejszenie promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n (Rys. 2.19).





Rys. 2.19. Wynik pomiaru mikrogeometrii ostrzy skrawających płytek: a) VBGT 160408-UM 1105 firmy Sandvik (geometria szlifowana, powłoka PVD), b) VBGT 160408-UM S05F firmy Sandvik (geometria szlifowana, powłoka CVD), c) VCMT 160408-SM IC804 firmy Iscar (geometria nieszlifowana, powłoka PVD) [19, 40]

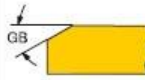
Na wartość promienia r_n ma także wpływ rodzaj nanoszonej powłoki. Dla powłok typu PVD (ang. Physical Vapour Deposition) z reguły wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej jest mniejsza, gdyż grubość tych powłok jest mniejsza. Natomiast powłoki typu CVD (ang. Chemical Vapour Deposition) są zazwyczaj powłokami o większej grubości, dlatego po ich naniesieniu rozmiar promienia r_n zwiększa się. Tak więc geometria narzędzia definiowana kątami przyłożenia i natarcia, promieniem naroża i promieniem zaokrąglenia krawędzi skrawającej ma wpływ na zużycie ostrza, uzyskiwaną strukturę geometryczną powierzchni, oraz na siły skrawania [75, 76, 77]. Potwierdził to również w swoich pracach Zhuang i inni [78, 79], który udowodnił, że w przypadku zaokrąglonych krawędzi skrawających płytek węglkowych, zarówno wielkość promienia zaokrąglenia krawędzi

skrawającej jak również jego rozkład na powierzchniach natarcia i przyłożenia mają wpływ na; wartość temperatury na ostrzu, trwałość narzędzia, chropowatość powierzchni, mikrostrukturę warstwy wierzchniej oraz naprężenia szczątkowe powierzchni obrobionej. Według autorów najbardziej optymalna wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, biorąc pod uwagę trwałość narzędzia, wynosi $r_n = 15 \mu\text{m}$. Przy mniejszych jego wartościach nastąpi szybkie wykruszanie krawędzi skrawającej. Natomiast większe wartości promienia r_n spowodują wzrost deformacji ziaren w warstwie wierzchniej powierzchni obrobionej, a także wzrost chropowatości powierzchni. Także Niestony i inni [80] poruszyli aspekt promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, którego wartość według autorów ma wpływ na chropowatość obrobionej powierzchni, ponieważ wpływa na minimalną grubość warstwy skrawanej.

W przypadku narzędzi z CBN krawędź skrawająca zabezpieczona jest poprzez perforację w postaci wykonanej fazy, fazy z zaokrągleniem lub promienia, który może być z kolei poddany zabiegowi honowania (Rys. 2.20) [37].

Rodzaj krawędzi skrawającej		
F		Ostra krawędź skrawająca
E (A)		Zaokrąglona krawędź skrawająca A (calowe) E (metryczne)
T		Ścin o ujemnym kącie natarcia
K		Podwójny ujemny ścin
S		Ścin o ujemnym kącie natarcia i zaokrąglona (ER) krawędź skrawająca

Szerokość ścinu	
ISO, mm	
010 BN = 0.10	
015 BN = 0.15	
020 BN = 0.20	
025 BN = 0.25	
070 BN = 0.70	
150 BN = 1.50	
200 BN = 2.00	

Kąt ścinu, stopnie	
	15 GB = 15°
	20 GB = 20°
	25 GB = 25°
	30 GB = 30°
	35 GB = 35°

Rys. 2.20. Ukształtowanie krawędzi skrawającej ostrzy wykonanych z CBN według firmy Sandvik Coromant [37]

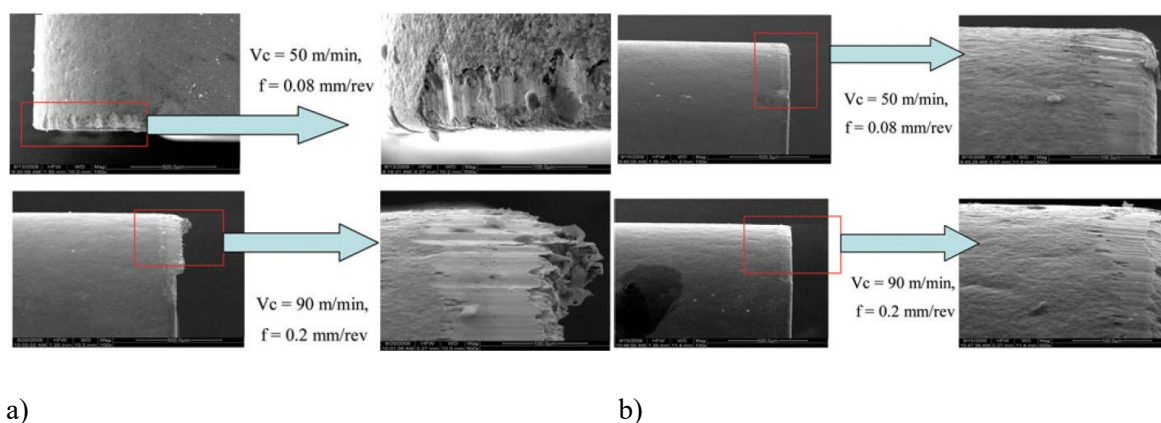
Według Zhuang i innych [78] zmienna mikrogeometria krawędzi skrawającej może wydłużyć trwałość narzędzia w porównaniu ze stałą mikrogeometrią krawędzi. Charakterystyka fazy krawędzi skrawającej jest bardzo wrażliwa na prędkość posuwu i przy wzroście tego parametru skraca się żywotność narzędzia. Narzędzia o sfazowanych krawędziach skrawających charakteryzują się większą trwałością w porównaniu z narzędziami o ostrych krawędziach. Identyczny wniosek można wysnuć analizując uzyskiwaną chropowatość powierzchni obrobionej, której większe wartości spowodowane

są zastosowaniem ostrej krawędzi, gdyż ta bardzo często podlega mikropęknięciom [78]. Coelho i inni [61], wykazali w swojej pracy, że modyfikacja perforacji krawędzi skrawającej poprzez zmniejszenie kąta natarcia fazy i zwiększenie jej długości spowodowały w większości testowanych przypadków uzyskanie mniejszej chropowatości powierzchni, a także zmniejszenie zużycia narzędzia. Z kolei Khan i inni [72] w wyniku przeprowadzonych badań udowodnili, że ostrze z perforacją o zaokrąglonej krawędzi, dla której wartość promienia $r_n = 25\mu\text{m}$ w pewnych warunkach skrawania wykazało się największą trwałością narzędzia. Pawade i inni [81] badali wpływ geometrii krawędzi skrawającej ostrzy PCBN oraz parametrów skrawania na siły skrawania, chropowatość powierzchni, jak również na uszkodzenia powierzchni podczas toczenia stopu 718. Naukowcy użyli trzech różnych mikrogeometrii, z których dwie charakteryzowały się tą samą długością fazy równą 0,1 mm ale różnymi katami natarcia 20° i 30° , natomiast trzecia wykonana była w postaci fazy o kącie 30° i honowanego promienia. Przeprowadzone badania doprowadziły do wniosków, że biorąc pod uwagę siły skrawania, najmniejsze jej wartości uzyskano dla ostrza z fazą 30° i honowanym promieniem ale przy stosunkowo dużej, testowanej prędkości skrawania $v_c = 475 \text{ m/min}$. Następnie biorąc pod uwagę chropowatość powierzchni, to najniższą jej wartość uzyskano dla ostrza z fazą o kącie 30° , lecz także przy zastosowanej większej prędkości skrawania. Natomiast Zhou i inni [43], testując powlekane i niepowlekane ostrza z CBN w swoich badaniach doszli do wniosku, że powlekane ostrze CBN z racji większej wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej charakteryzuje się większą intensywnością tworzenia narostu. Autorzy dodają także, że intensywność ta może być również związana z generowaną wyższą temperaturą w obszarze kontaktu ostrza z przedmiotem obrabianym, spowodowaną niższą przewodnością cieplną powlekanego narzędzia.

2.8. Zużycie i trwałość ostrzy w procesie toczenia stopu Inconel 718

Aspekty dotyczące zużycia ostrza w procesie toczenia stopu 718 były i są przedmiotem badań naukowców na całym świecie. Niewątpliwie mechanizmy, które towarzyszą intensywności i charakterowi degradacji ostrza w procesie toczenia tego materiału są uzależnione od wielu czynników. Jednym z nich, któremu można przypisać największe znaczenie jest sztywność układu OUPN. Ma ona wpływ na stabilność pracy narzędzia i zabezpiecza je przed powstawaniem wibracji podczas przebiegu skrawania. Innymi również bardzo istotnymi aspektami, mającymi wpływ na zużycie narzędzia jest rodzaj materiału, z którego jest ono wykonane, a także gatunek i metoda nanoszonej

powłoki. Kluczowym jest także dobór odpowiednich parametrów skrawania, a także środowisko, w którym przeprowadzany jest proces obróbki. Biorąc pod uwagę środowisko obróbki naukowcy bardzo często odnoszą się do metod chłodzenia procesu skrawania [35]. Wiele badań prowadzonych jest na sucho, z podawaniem cieczy chłodząco-smarującej pod niskim lub wysokim ciśnieniem. Testy prowadzone są także z zastosowaniem metody MQL (ang. Minimum Quantity Lubrication), czyli mgły olejowej, jak również z użyciem chłodzenia kriogenicznego. Kriogeniczna technika chłodzenia polega na użyciu skroplonych gazów takich jak ciekły azot (LN_2) lub ciekły dwutlenek węgla (LCO_2). Thakur i inni [82], badali wpływ powłok wielowarstwowych płytek z węgliku wolframu na charakterystyki skrawalności superstopu 718, w tym zużycie ostrza podczas toczenia na sucho. Autorzy poddali testom płytki skrawające z węgliku wolframu z powłoką PVD TiN/TiAlN, oraz CVD TiN/ Al_2O_3 /Ti(CN). Badania prowadzone były przy następujących parametrach skrawania: $v_c = 50 - 90$ m/min; $f = 0,05 - 0,2$ mm/obr; $a_p = 0,5$ mm. Na podstawie wyników badań wykazano, że ostrze z powłoką PVD charakteryzowało się znacznie większym zużyciem w porównaniu do ostrza z powłoką CVD (Rys. 2.21). Na narzędziu z powłoką PVD zaobserwowano wykruszenia materiału powłoki, którego mikrocząsteczki pozostając w strefie skrawania, spowodowały dalsze zużycie ściernie powierzchni przyłożenia. Zauważono także znacznie bardziej nierównomierne zużycie ostrza z powłoką PVD w porównaniu do ostrza z powłoką CVD. Narzędzie z powłoką CVD charakteryzowało się jedynie zużyciem ściernym. Mniejsze zużycie tego narzędzia autorzy pracy przypisują obecności powłoki Al_2O_3 , która zapewnia stabilność termiczną i odporność na zużycie, natomiast powłoka TiN powoduje obniżenie tarcia, a także odporność na zużycie adhezyjne.

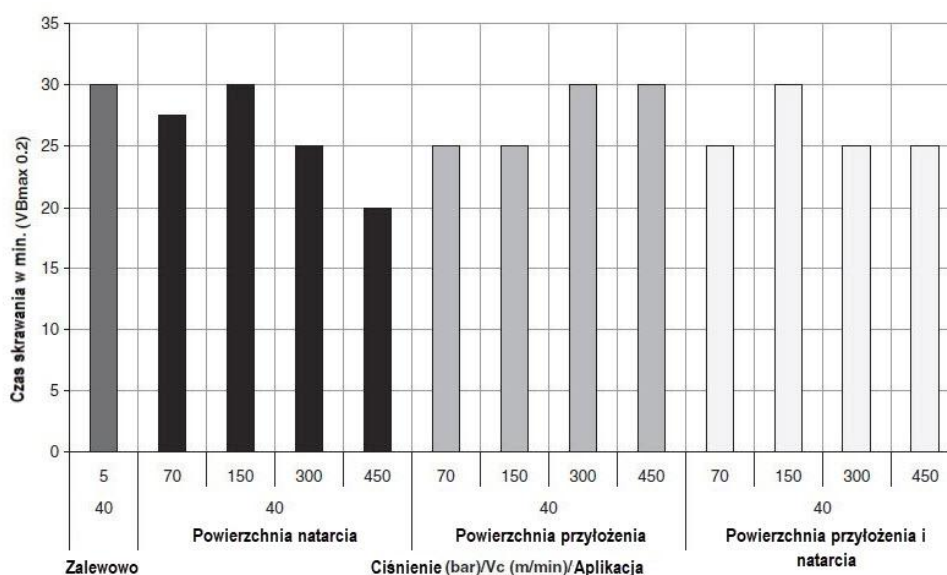


Rys. 2.21. Zdjęcia SEM powierzchni przyłożenia badanych narzędzi: a) z powłoką PVD, b) z powłoką CVD [82]

Podsumowując autorzy pracy stwierdzili, że formy zużycia, które wystąpiły podczas przeprowadzonych testów to odkształcenie plastyczne, ścieranie i mikrowykruszenia. D'Addona i inni [59] badali zużycie narzędzia wykonanego z węglików spiekanych podczas toczenia materiału Inconel 718 w warunkach z doporowadzeniem cieczy chłodząco-smarującej. Testy wykonano przy stałej wartości posuwu i głębokości skrawania, natomiast zastosowano cztery różne warianty prędkości skrawania 60 m/min, 90 m/min, 190 m/min i 255 m/min. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy dowiedli, że zastosowanie niższych wartości prędkości skrawania 60 m/min i 90 m/min nie spowodowało znacznych uszkodzeń narzędzia. Zużycie które wystąpiło na ostrzach było jednolite wzdłuż promienia naroża, jak również wystąpiły ślady łuszczenia się powłoki. Z kolei podczas testowanych wyższych prędkościach skrawania 190 m/min i 255 m/min narzędzie zużywało się w znacznie szybszym tempie i dominującym rodzajem zużycia było wyżłobienie. Narzędzie uległo zużyciu niemal do kryterium trwałości przy największej wartości prędkości skrawania. Wystąpiły także ślady przypaleń, co według autorów jest spowodowane znaczną ilością ciepła generowanego podczas obróbki Inconelu 718 z tak dużymi wartościami prędkości skrawania. Większość wydzielanego ciepła przenika do narzędzia z powodu słabej przewodności cieplnej nadstopu 718. Mehta i inni [5], badali między innymi wpływ różnego rodzaju środowiska na zużycie ostrza. Autorzy przeprowadzili testy obróbki stopu Inconel 718 przy stałych parametrach skrawania w następujących środowiskach; na sucho, z zastosowaniem metody MQL, zimnego powietrza + MQL, kriogenicznego, oraz kriogenicznego + MQL. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy zarejestrowali, że podczas obróbki na sucho występuje adhezja materiału obrabianego. Rodzaje zużycia, które wystąpiły na ostrzach w testowanych środowiskach to zużycie w postaci nacięcia (ang. notch wear), starcie powierzchni przyłożenia, narost oraz wykruszenia na krawędzi skrawającej. Największą wartość szerokości starcia powierzchni przyłożenia autorzy zanotowali podczas obróbki na sucho, natomiast najmniejszą jego wartość podczas pracy ostrza w środowisku kriogenicznym a następnie MQL. Zużycie kraterowe również zarejestrowano największe podczas obróbki na sucho z kolei najmniejszą jego wartość także w obróbce kriogenicznej i kolejno w MQL. Podobne wartości zużycia kraterowego autorzy obserwują podczas obróbki w środowiskach zimnego powietrza + MQL oraz kriogenicznego + MQL. Ramanujam i inni [83], zamodelowali optymalizację parametrów skrawania podczas toczenia stopu Inconel 718 na sucho, przy użyciu tablicy ortogonalnej Taguchiego. Celem przeprowadzonych badań było uzyskanie optymalnych wartości parametrów chropowatości powierzchni Ra , Rt , Rz , siły skrawania F_z . Ocenę zużycia badanego ostrza, wykonanego

z węglików spiekanych, przeprowadzono dla optymalnych parametrów skrawania. Przy najmniejszej testowanej prędkości skrawania $v_c = 30$ m/min zanotowano najniższą wartość zużycia ostrza co jest według autorów oczywiste ze względu na niską temperaturę skrawania. Dominującym rodzajem zużycia ostrza są tutaj wyszczerbienia i pęknięcia krawędzi skrawającej. Mogły one być spowodowane wibracjami wywołanymi przez siły skrawania, bądź przez segmentowanie wióra, oraz adhezją stykających się materiałów pomiędzy przedmiotem obrabianym a narzędziem skrawającym. Przy prędkościach skrawania od 30 m/min do 70 m/min dominującymi mechanizmami zużycia narzędzia było ścieranie, utlenianie oraz wyszczerbienia krawędzi skrawającej spowodowane tarcieniem i zmiękczeniem termicznym materiału. Celem badań Sharman i innych [47] było scharakteryzowanie wpływu zastosowania ultra wysokiego ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej na integralność powierzchni oraz trwałość ostrza podczas toczenia wykończeniowego nadstopu 718. Autorzy przeprowadzili testy stosując pięć różnych wartości ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej 5 bar, 70 bar, 150 bar, 300 bar i 450 bar, przy prędkościach skrawania 40 m/min, 60 m/min i 80 m/min. Przeprowadzone próby wykazały, że w przypadku toczenia wykończeniowego Inconelu 718 zastosowanie ultra wysokiego ciśnienia cieczy chłodząco smarującej (do 450 bar) nie zapewnia znacznej poprawy trwałości narzędzia w porównaniu z uzyskaną przy chłodzeniu zalewowym. Autorzy zauważają jednak, że skierowanie płynu obróbkowego tylko na powierzchnię natarcia ostrza wykazuje zmniejszenie jego trwałości wraz ze wzrostem ciśnienia. Natomiast nie zaobserwowano tego kiedy płyn obróbkowy kierowany jest na powierzchnie przyłożenia narzędzia, lub jednocześnie na powierzchnie przyłożenia i natarcia (Rys. 2.22). W odniesieniu do wyników powyższych badań Ezugwu i Bonney [84] przedstawili kilka odmiennych wniosków. Autorzy przeprowadzili badania dotyczące obróbki Inconelu 718 w warunkach obróbki zgrubnej. Testy wykonano za pomocą narzędzia z węglików spiekanych potrójnie powlekanego metodą PVD ($\text{TiCN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$) z zastosowaniem prędkości skrawania 20, 30 i 50 m/min, przy użyciu konwencjonalnego oraz pod wysokim ciśnieniem, sposobu doprowadzenia cieczy chłodząco-smarującej. Wykorzystano trzy wartości ciśnienia, 110, 150 i 203 bar. Autorzy rejestrowali trwałość narzędzia, chropowatość powierzchni (R_a), zużycie narzędzia i składowe siły skrawania. Wyniki testów pokazały, że dłuższą trwałość narzędzia można osiągnąć podczas obróbki Inconelu 718 przy zastosowaniu wysokiego ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej. W porównaniu z konwencjonalną metodą chłodzenia, trwałość narzędzia wzrosła aż o 740% podczas obróbki z ciśnieniem 203 barów i prędkości skrawania 50 mm/min. Trwałość narzędzia

generalnie wzrasta wraz ze wzrostem doprowadzanego ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej. Można to przypisać zdolności cieczy pod wysokim ciśnieniem do podnoszenia wiórów i uzyskiwania dostępu bliżej powierzchni styku skrawającego. Działanie to prowadzi do zmniejszenia obszaru zatarcia, a tym samym do obniżenia współczynnika tarcia, co z kolei skutkuje zmniejszeniem temperatury skrawania i sił składowych. Łamliwość wiórów podczas obróbki zależy od głębokości skrawania, zastosowanego posuwu i prędkości skrawania, a także od zastosowanego ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej. Wysokie ciśnienie chłodziwa poprawia segmentację wiórów, ponieważ promień zwijania się wiórów jest znacznie zmniejszony. Dominującym typem awarii narzędzia było zużycie naroża, prawdopodobnie spowodowane zmniejszeniem długości i powierzchni kontaktu narzędzie-wiór i narzędzie-przedmiot obrabiany. W odniesieniu do tych wyników autorzy pracy [47] wyciągnęli wniosek, że prawdopodobnie, w warunkach obróbki wykańczającej generowana temperatura nie była wystarczająco wysoka, aby uzyskać zwiększony efekt chłodzenia strumieniem cieczy chłodząco-smarującej pod wysokim ciśnieniem.



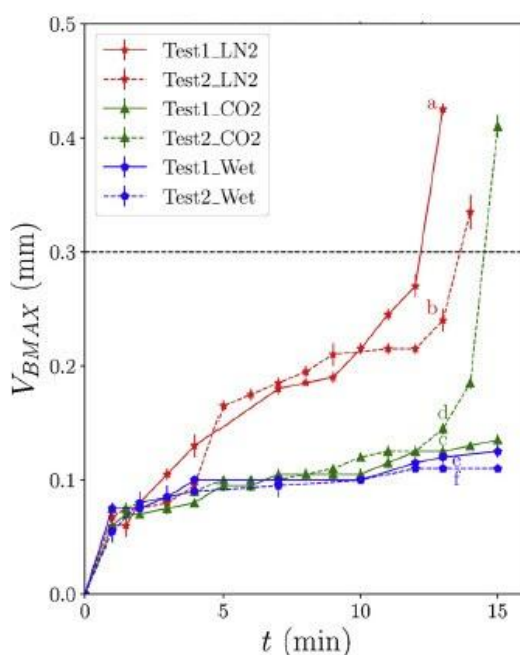
Rys. 2.22. Wpływ kierunku i ciśnienia dopływu cieczy chłodząco-smarującej na trwałość narzędzia [47]

Arrazola i inni [48], badali korelację między sygnałami pochodzącymi wyłącznie z czujnika sił, a zużyciem powierzchni przyłożenia narzędzia i integralnością powierzchni podczas toczenia stopu Inconel 718. Na podstawie przeprowadzonych badań, autorzy zarejestrowali wzrost sił skrawania wraz z ewolucją zużycia powierzchni przyłożenia narzędzia. Zaznaczyli także, że siła odporowa jest składową, która odznacza się największą

wrażliwością na stan narzędzia. Toubhans i inni [49], opracowali model sił skrawania dla toczenia wykończeniowego z uwzględnieniem ewolucji sił skrawania w czasie trwałości narzędzia. Przedstawili wpływ zużycia ostrza i parametrów skrawania na ewolucję sił skrawania w czasie obróbki. Autorzy potwierdzają, że głównymi mechanizmami zużycia ostrza są ścieranie i adhezja. Większość objawów zużycia pojawia się na powierzchni przyłożenia, również w postaci rozmazanego materiału, nacięcia oraz zapadania się krawędzi skrawającej. Zużycie powierzchni przyłożenia ma tendencję do nierównomiernego zużywania się w przypadku wzrostu wartości prędkości skrawania i posuwu. Autorzy zanotowali także wystąpienia zjawiska narostu w postaci gromadzonego się materiału na powierzchni natarcia podczas procesu skrawania. Szablewski [66] badał wpływ prędkości skrawania na zużycie ostrzy wykonanych z węglików spiekanych oraz z ceramiki narzędziowej. Autor dowiódł, że prędkość skrawania ma bardzo duży wpływ na zużycie ostrza oceniane parametrem VB_C . Dla ostrzy wykonanych z ceramiki narzędziowej zużycie ostrza intensyfikowało się wraz ze wzrostem wartości prędkości skrawania. Natomiast w przypadku ostrzy z węglików spiekanych charakter i wartość zużycia ostrza jest w dużej mierze uzależniona od zastosowanych powłok przeciwzużyciowych na narzędziu. W przypadku niektórych badanych narzędzi zużycie ostrza malało wraz ze wzrostem prędkości skrawania. Autor zauważa prawidłowość, że szerokość starcia powierzchni przyłożenia jest mniejsza podczas pracy narzędzia z prędkościami skrawania v_c , przy których na krawędzi skrawającej w obszarze powierzchni natarcia powstaje narost. Lotfi i inni [85] opracowali modele 3D płytek skrawających z węglików spiekanych i ceramiki narzędziowej w celu wykonania analizy metodą elementów skończonych pozwalającej przewidzieć zużycie powyższych narzędzi podczas toczenia Inconelu 625. Naukowcy jednocześnie wykonali badania eksperymentalne w celu potwierdzenia w testach uzyskanych wyników symulacji. Badania weryfikacyjne symulowanego zużycia potwierdziły zgodność z wynikami eksperymentalnymi. Ponadto badania wykazały, że głębokość skrawania ma największy wpływ na wytwarzaną temperaturę i naprężenia na powierzchni skrawającej narzędzia. Głównymi mechanizmami zużycia ostrza były wykruszenia krawędzi skrawającej w przypadku narzędzia ceramicznego. Natomiast podczas pracy narzędzia wykonanego z węglików spiekanych zauważono, że wzrost wartości posuwu powoduje przyrost zużycia kraterowego. Sivalingam i inni [86] badali wpływ sposobu chłodzenia opartego o system natryskiwania rozpylonym płynem (ang. Atomized Spray Cutting Fluid) w porównaniu do obróbki na sucho na zużycie ostrza oraz chropowatość powierzchni. Wyniki badań pokazały, że system chłodzenia poprzez

natryskiwanie rozpylonym płynem wpływa korzystnie na chropowatość powierzchni w porównaniu do obróbki na sucho. W obu przypadkach, głównym rodzajem zużycia było zjawisko zużycia ściernego i adhezyjnego narzędzia skrawającego wykonanego z węglików spiekanych. Zastosowanie ASCF także korzystnie wpłynęło na zwiększenie trwałości ostrza – zmniejszając jego zużycie. Obróbka w środowisku ASCF wykazała mniejsze ślady zużycia w postaci odprysków, narostu i pęknięć krawędzi skrawającej, w porównaniu do obróbki na sucho we wszystkich badanych warunkach skrawania. Zastosowanie tego typu chłodzenia korzystnie wpływa również na wibracje zmniejszając ich wartość w porównaniu do obróbki na sucho. Chaabani i inni [87] badali także wpływ dwóch rodzajów chłodzenia kriogenicznego (ciekłym azotem – LN_2 i dwutlenkiem węgla – LCO_2) w odniesieniu do standardowego chłodzenia na zużycie ostrza, chropowatość powierzchni, mikrostrukturę warstwy wierzchniej, oraz profil naprężeń szczątkowych. Testy wykonano w oparciu o proces toczenia stopu Inconel 718 do momentu osiągnięcia czasu obróbki 15 min. Badania wykazały, że obróbka z konwencjonalnym doprowadzeniem cieczy chłodząco-smarującej dała najlepsze rezultaty biorąc pod uwagę zużycie ostrza. Obróbka w środowisku z chłodzeniem dwutlenkiem węgla dały podobne rezultaty pod względem zużycia ostrza do 13 min czasu pracy narzędzia, natomiast później nastąpiło drastyczne zwiększenie zużycia ostrza. Natomiast obróbka w warunkach z chłodzeniem ciekłym azotem dała najgorsze wyniki pod względem trwałości narzędzia, ponieważ gwałtowny wzrost zużycia nastąpił już po 2 min i 6 min czasu pracy, odpowiednio dla przeprowadzonego testu (Rys. 2.23). Głównymi obserwowanymi mechanizmami degradacji ostrza było zużycie adhezyjne oraz zużycie ściernie. Częstki materiału obrabianego przyklejały się na powierzchni natarcia w pobliżu krawędzi skrawającej tworząc narost, który nie jest zjawiskiem stabilnym i powoduje wykruszenia krawędzi skrawającej oraz łuszczenie się powłoki. Zjawiska te w dalszym stopniu przyczyniły się do powstania krateru. Peng i inni [88] badali wpływ użycia ultradźwiękowego wibracyjnego skrawania przy dużych prędkościach w celu poprawy skrawalności materiału Inconel 718 narzędziami z węglików spiekanych. Naukowcy wykazali, że obróbka ultradźwiękowa wibracyjna w porównaniu do konwencjonalnej, pozwala wydłużyć trwałość o 250% dzięki zmniejszonemu zużyciu i siłom skrawania w zakresie prędkości skrawania 80 – 240 m/min. Metoda ta obniża również temperaturę w strefie skrawania. Autorzy zwracają uwagę, że głównymi mechanizmami zużycia narzędzia w przypadku obróbki konwencjonalnej są; zużycie adhezyjne, ściernie, a także wykruszenia krawędzi skrawającej. Wspomniane formy zużycia

podczas obróbki ultradźwiękowej wibracyjnej są znacznie zredukowane, co według badaczy jest zasługą lepszego dostępu cieczy chłodząco-smarującej do strefy skrawania.



Rys. 2.23. Przyrost zużycia powierzchni przyłożenia w funkcji czasu skrawania dla warunków z chłodzeniem konwencjonalnym, LN₂ oraz LCO₂ [86]

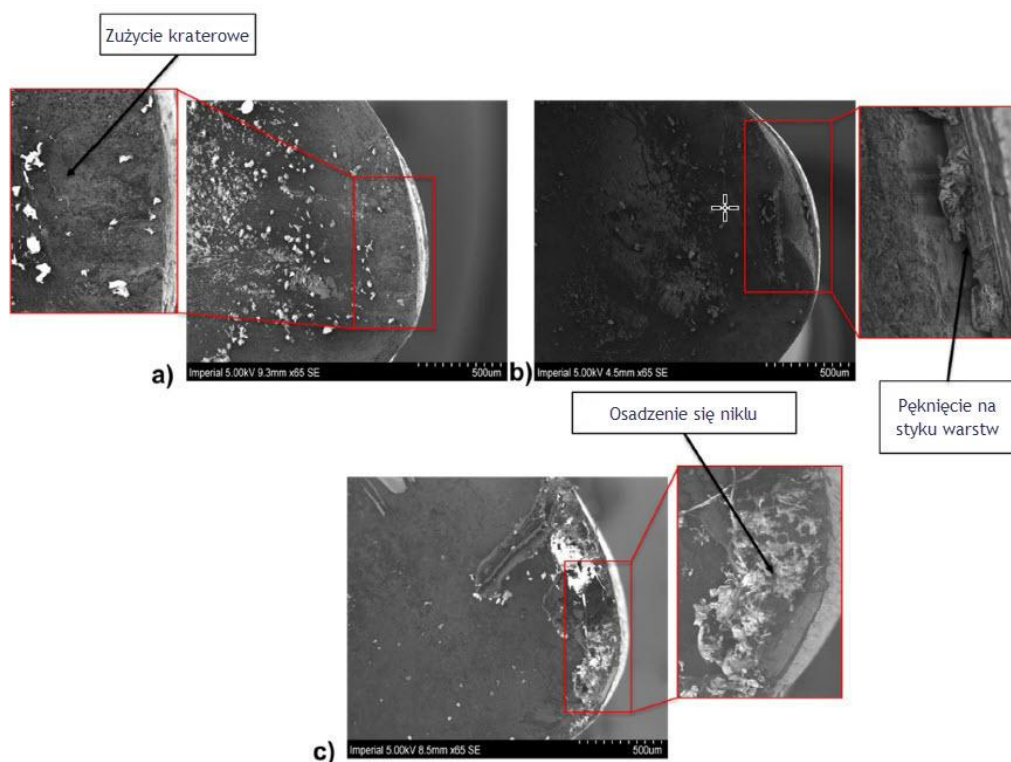
Rubaiee i inni [89], przedstawili w swojej pracy sposoby wielokierunkowej optymalizacji warunków skrawania dla frezowania walcowo – czołowego stopu Inconel 718. Optymalizacja była opracowywana biorąc pod uwagę prędkość skrawania, posuw w warunkach skrawania na sucho, z MQL, Nano MQL oraz kriogenicznie z użyciem CO₂. Zastosowano w pierwszej kolejności analizę wariancji. Natomiast później żeby zoptymalizować środowiska obróbki użyto dwóch zaawansowanych algorytmów optymalizacji:

1. Niezdominowany algorytm sortowania genetycznego NSGA-II
2. Optymalizację opartą na nauczaniu i uczeniu się TLBO

Obie metody wykazały się dużą wydajnością w przewidywaniu odpowiedzi. Obie metodologie pokazują, że prędkość skrawania 90 m/min, posuw 0,05 mm/obr w warunkach chłodzenia kriogenicznego CO₂ dają optymalne warunki obróbki stopu Inconel 718 pod względem chropowatości powierzchni, zużycia ostrza, siły skrawania oraz temperatury w strefie skrawania. Biorąc pod uwagę wszystkie środowiska chłodzenia, dominującymi mechanizmami zużycia ostrza były adhezja, zużycie ściernie, a także wykruszenia krawędzi

skrawającej. Autorzy zwracają uwagę, że choć przyjęte odpowiednie środowisko chłodzenia podczas obróbki może zmniejszyć zużycie ostrza, to nie jest w stanie zmienić jego postaci i charakteru. Yildirim i inni [90] skupili swoje badania wokół rozwoju nano-MQL polegającego na dodaniu nano cząstek hBN (sześciennego azotku boru) do MQL, porównując te warunki z czystym MQL i z obróbką na sucho podczas toczenia materiału Inconel 625. Autorzy analizowali trwałość narzędzia, chropowatość powierzchni, zużycie ostrza oraz temperaturę powierzchni styku narzędzie-wiór. Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że dodatek w proporcji 0,5 % objętości nano płynu z cząsteczkami hBN dało najlepsze wyniki w zakresie małego zużycia ostrza i chropowatości powierzchni oraz dużej trwałości narzędzia. Płyn obróbkowy zawierający 1% obj. hBN wytwarza najmniejszą temperaturę powierzchni styku narzędzie-wiór w porównaniu do pozostałych warunków chłodzenia. Grzesik i inni [91] badali zużycie narzędzi skrawających w operacjach toczenia wykończeniowego superstopu Inconel 718. W badaniach użyto trzy narzędzia skrawające z powłokami PVD TiAlN i AlTiN o różnych stosunkach stechiometrycznych. Zużycie narzędzi oparto o krzywe zużycia odniesione do czasu skrawania i objętości skrawanego materiału. Ponadto naukowcy rejestrowali postęp zużycia narzędzi wraz z ciągłymi pomiarami sił skrawania oraz wyznaczaniem ilości energii skrawania, a także współczynnika tarcia. Autorzy wykazali, że nałożenie powłok skutkuje uzyskaniem dłuższej żywotności narzędzia ok. 60min przy $v_c = 80$ m/min. Należy zwrócić uwagę, że powłoki o różnym stosunku stechiometrycznym Al/Ti prowadzą do różnych trwałości narzędzia. Największe zużycie na ostrzu występuje tam gdzie powłoka pogorszyła się lub została usunięta. Drugim zjawiskiem po zużyciu ściernym jest pojawiający się narost. Przyjęcie wysokości zużycia na powierzchni przyłożenia na poziomie $V/B_N = 0,2$ mm wydaje się być właściwe z praktycznego punktu widzenia dla obróbki materiału Inconel 718. Na podstawie badań szacuje się, że osadzona powłoka działa prawidłowo przez pierwsze 20 min, co można potwierdzić wartością współczynnika tarcia $\mu = 0,6$, co jest zgodne z literaturą [111]. Powyżej tego czasu wartość tego współczynnika wzrasta. Devillez i inni [67] w swojej pracy wykazali, że narzędzie wykonane z węglików spiekanych, powlekane AlTiN ze względu na wysoką twardość (3300 HV 0,05) w porównaniu z innymi narzędziami powlekanymi cechowało się dobrymi właściwościami przeciw tarciovym i mniejszym zużyciem ściernym. Autorzy pracy zaznaczyli jednak, że ze względu na krótki czas skrawania, zbadany został tylko pierwszy etap zużycia. Na tym etapie zaobserwowano zużycie adhezyjne, ścierne powierzchni przyłożenia, zużycie powierzchni natarcia w postaci krateru oraz wystąpienie wykruszeń krawędzi skrawającej i nacięcia (ang. notch wear) na wysokości

głębokości skrawania. Wszystkie z powyższych form zużycia wystąpiły na testowanych narzędziach; niepowlekanym oraz z powłoką TiAlN. Natomiast na narzędziu z powłoką AlTiN wszystkie wspomniane wyżej typy zużycia zostały znacznie ograniczone. Khanna i inni [92] badali zużycie narzędzia, w szczególności zużycie powierzchni przyłożenia i powstawanie krateru podczas toczenia materiału Inconel 718 narzędziami z węglików spiekanych. Próby zostały przeprowadzone w warunkach toczenia kriogenicznego, a wyniki odniesione były do testów wykonanych w warunkach na sucho i z chłodzeniem zalewowym. Wyniki eksperymentów pokazały ogromną poprawę trwałości narzędzia przy toczeniu kriogenicznym, w porównaniu z obróbką na sucho. Jednak trwałość ta jest porównywalna z trwałością narzędzia uzyskaną w warunkach obróbki z chłodzeniem zalewowym. Oceny obrazów zużycia narzędzi skrawających wykazały, że główną przyczyną zużycia powierzchni przyłożenia w przypadku toczenia na sucho jest zużycie ściernie. Natomiast w przypadku toczenia kriogenicznego i z chłodzeniem zalewowym, głównymi mechanizmami zużycia ostrzy była adhezja oraz wykruszenia. W przypadku zużycia kraterowego największe zużycie zauważono na powierzchni natarcia dla narzędzia pracującego w warunkach na sucho. W warunkach kriogenicznych wykryto pewne specyficzne wzniesienia związane ze zużyciem adhezyjnym (Rys. 2.24).



Rys. 2.24. Obrazy SEM przedstawiające mechanizm zużycia na płytkach skrawających użytych odpowiednio do toczenia: a) na sucho, b) z chłodzeniem zalewowym, c) kriogenicznego [92]

Także Khanna i inni [93] badali obrabialność Inconelu 718 z uwzględnieniem zastosowania zrównoważonych strategii chłodzenia tj. minimalnej ilości środka smarującego MQL, minimalnej ilości elektrostatycznego środka smarującego EMQL, ciekłego dwutlenku węgla LCO₂ w połączeniu z toczeniem wspomagany ultradźwiękami w celu zmniejszenia zużycia narzędzia podczas obróbki tego materiału. Autorzy podczas badań wykorzystali sześć różnych kombinacji strategii chłodzenia. Te strategie chłodzenia to LCO₂ + MQL (w tym przypadku LCO₂ jest stosowane na powierzchni natarcia, a MQL na powierzchni przyłożenia) MQL+LCO₂, EMQL+LCO₂, LCO₂+EMQL, EMQL+MQL i MQL+EMQL. Wyniki pokazują, że elektrostatyczne smarowanie minimalną ilością środka smarującego powierzchni przyłożenia oraz ciekły dwutlenek węgla zapewniony na powierzchni natarcia (ang. Rake: LCO₂, Flank: EMQL) znacznie zmniejszają zużycie narzędzia. Taki zestaw zmniejsza zużycie powierzchni przyłożenia o około 57% w porównaniu z zestawem (Rake: EMQL, Flank: LCO₂). Ścieranie, adhezja, formowanie się narostu i łuszczenie powłoki są znacząco niższe dla zestawu chłodzenia (Rake: LCO₂, Flank: MQL) i zestawu (Rake: MQL, Flank: EMQL). LCO₂ zapewnia skuteczne chłodzenie i usuwa ciepło ze strefy skrawania poprzez wymuszoną konwekcję, zwiększając wydajność obróbki. Z drugiej strony EMQL poprawia zwilżalność, przenikalność i zdolność oddzielania kropel w porównaniu z MQL, zapewniając skuteczniejsze warunki smarowania, które zmniejszają zużycie narzędzia. Oprócz technik chłodzenia, wibracje ultradźwiękowe dodatkowo poprawiają wydajność obróbki, umożliwiając przenikanie cieczy chłodząco-smarującej bardzo blisko krawędzi skrawającej w okresie rozłączania. Jeyapandiarai i inni [94] badali wpływ warunków skrawania na materiał obrabiany i narzędziowy podczas toczenia stopu Inconel 718. Badania te były prowadzone w celu lepszego zrozumienia aspektów skrawalności takich jak integralność powierzchni, siły skrawania, utwardzanie w wyniku obróbki oraz zużycie i trwałość narzędzi. Uzyskane wyniki badań pokazują, że niepowlukane narzędzia z węglików spiekanych pracowały właściwie w zakresie prędkości skrawania 10 – 30 m/min, natomiast przy prędkościach powyżej 40 m/min lepszym rozwiązaniem są narzędzia powlekane z węglików spiekanych. W przypadku obróbki z dużymi prędkościami płytki z CBN oraz ceramiczne, wzmocnione whiskerami są bardziej wydajne pod względem trwałości narzędzia. Pod względem trwałości narzędzia najlepszy jest kriogeniczny system chłodzenia. Fang i inni [76] badali wpływ zużycia krawędzi skrawającej ostrza narzędzia na siły skrawania i wibracje podczas toczenia wykończeniowego z dużymi prędkościami stopu Inconel 718. Autorzy przeprowadzili zestaw eksperymentów toczenia z płytkami skrawającymi, których promienie zaokrąglenia krawędzi skrawającej miały różne wartości

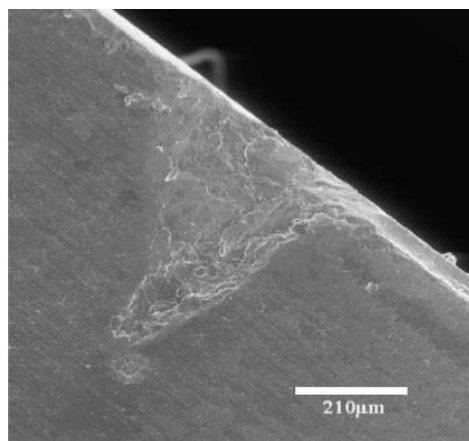
- w zakresie od 2 do 62 μm . Badania wykazały, że podczas toczenia z dużymi prędkościami stopu Inconel 718, profil krawędzi płytki skrawającej zmienia się dynamicznie w każdym punkcie krawędzi skrawającej narzędzia. Z powodu różnych warunków skrawania i różnych wartości początkowych profilu krawędzi skrawającej w każdym punkcie, zużycie krawędzi skrawającej narzędzia w każdym punkcie podąża za różnymi schematami zmienności. Degradacja krawędzi skrawającej narzędzia w obróbce 3D jest bardziej złożona niż podczas skrawania ortogonalnego 2D. Badania wykazały, że zużycie ostrza wzrasta wraz ze wzrostem promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej. W przypadku tej samej płytki skrawającej zużycie wzdłuż krawędzi wzrasta od punktu końcowego narzędzia (wierzchołek-naroże) w kierunku pozycji zbliżonej do zewnętrznej średnicy przedmiotu obrabianego ze względu na większą nieodkształconą grubość wióra i więcej odkształcenia plastycznego materiału obrabianego, które występuje w strefie ścinania. Wraz ze wzrostem zużycia krawędzi narzędzia podczas procesu skrawania wszystkie trzy składowe siły skrawania rosną. Bhatt i inni [95] przedstawili wyniki eksperymentalnego badania mechanizmów zużycia powłoki funkcyjnej węgiel wolframu (WC). W testach użyto narzędzia niepowlekane, powlekane (jednowarstwowo (TiAlN) PVD i trójwarstwowo (TiCN/Al₂O₃/TiN) CVD) podczas toczenia wykończeniowego Inconelu 718. Autorzy ocenili szybkość zużycia ostrza oraz jego mechanizmy dla zakresu prędkości skrawania $v_c = 50 - 100$ m/min, oraz zakresu posuwu $f = 0,075 - 0,125$ mm/obr przy stałej głębokości skrawania $a_p = 0,25$ mm. Stwierdzono, że zużycie ściernie i adhezyjne były najbardziej dominującymi mechanizmami zużycia, kontrolujące niszczenie i ostateczną awarię narzędzia WC. Stwierdzono, że trójwarstwowa (TiCN/Al₂O₃/TiN) powłoka CVD wykazuje najwyższą odporność na zużycie przy dużej prędkości skrawania 100 m/min i małej wartości posuwu, podczas gdy niepowlekane narzędzie WC zapewniało najlepszą wydajność przy stosunkowo niskim zakresie prędkości skrawania ($v_c = 50$ m/min) i posuw w zakresie pośredniej wartości. Narzędzie z jednowarstwową powłoką PVD (TiAlN), przewyższa inne narzędzia pod względem odporności na zużycie przy średniej wartości prędkości skrawania 75 m/min. Zhao i inni [96] badali wpływ zawartości glinu Al w powłoce TiAlN narzędzi z węglików spiekanych na zużycie i temperaturę skrawania podczas toczenia materiału Inconel 718. W badaniach tych wykorzystano narzędzia z powłokami Ti_{0.55}Al_{0.45}N oraz Ti_{0.41}Al_{0.59}N, w których jedyną zmienną była zawartość glinu Al., oraz dla porównania narzędzie niepowlekane do obróbki Inconelu 718 w warunkach na sucho. Wpływ zawartości Al na właściwości przeciwcierne i barierę cieplną powłoki TiAlN był wzajemnie analizowany. Scharakteryzowano zachowania tribologiczne narzędzi odpowiednio

w początkowej i końcowej fazie zużycia narzędzia. Narzędzie $\text{Ti}_{0.41}\text{Al}_{0.59}\text{N}$ wykazywało lepsze właściwości przeciwcierne, mniejszy efekt bariery termicznej i dłuższą trwałość narzędzia niż zrobiło to narzędzie niepowlekane i narzędzie $\text{Ti}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{N}$. Dla narzędzia $\text{Ti}_{0.41}\text{Al}_{0.59}\text{N}$ podczas pracy zarejestrowano mniejsze siły skrawania. Natomiast powłoka PVD narzędzia $\text{Ti}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{N}$ charakteryzowała się lepszym efektem bariery termicznej ze względu na niską przewodność cieplną. Zhang i inni [97] w swojej pracy wykonali badania, dotyczące obróbki Inconelu 718 podczas toczenia z dużymi prędkościami skrawania (120, 160 i 200 m/min). Autorzy użyli narzędzi z węglika wolframu o ujemnej i dodatniej geometrii, powlekanych warstwą TiAlN oraz narzędzia z węglika wolframu o ujemnej geometrii powlekanego warstwą bogatą w aluminium (Al, Ti) N. Różnice między tymi dwoma różnymi powłokami podczas toczenia z wysoką prędkością nadstopu 718 zostały wyjaśnione pod względem trwałości narzędzi, zużycia narzędzi oraz jakości obrabianej powierzchni. Wyniki eksperymentalne wskazały, że żywotność płytki z powłoką TiAlN o ujemnej geometrii była dłuższa niż płytki o dodatniej geometrii. Sugeruje to, że zwiększenie efektywnego bocznego kąta natarcia może skrócić żywotność narzędzi. Zużycie powierzchni przyłożenia było prawie identyczne pod względem mechanizmu zdominowanego przez zużycie adhezyjne i zużycie ściernie, dla trzech typów płytek, przy wszystkich testowanych prędkościach skrawania. Stwierdzono, że płytki o ujemnej geometrii z powłoką (Al, Ti)N mają znacznie dłuższą żywotność, niż płytki TiAlN , zarówno o geometrii dodatniej, jak i ujemnej, przy wszystkich testowanych prędkościach skrawania. Zużycie powierzchni przyłożenia w obszarze krawędzi skrawającej, uległo znacznej zmianie zarówno pod względem wielkości jak i charakteru zużycia, w zależności od rodzaju płytki i prędkości skrawania. Zużycie powierzchni natarcia było ograniczone głównie do obszaru skrawania. Po osiągnięciu granicy trwałości narzędzia, powłoki w obszarze skrawania były całkowicie zużyte, z wyjątkiem płytek z powłoką (Al, Ti)N testowanych przy prędkości skrawania 200 m/min. Hao i inni [98] badali morfologię i mechanizm zużycia narzędzia, podczas toczenia materiału Inconel 718 z wykorzystaniem narzędzia z węglików spiekanych powlekanego metodą PVD. Wyniki badań pokazały, że charakterystyka zużycia narzędzia zmienia się wraz z prędkością skrawania. Przy małej prędkości skrawania ($v_c = 20$ m/min), silne zjawisko adhezji doprowadziło do pęknięć między powłoką narzędzia a jego podłożem oraz do wykruszenia narzędzia. Przy prędkości skrawania $v_c = 32$ m/min nowo wygenerowany film tlenkowy przylegał do powierzchni narzędzia narażonej na ścieranie. Film tlenkowy pełnił rolę granicznej warstwy smarnej, co zmniejszało współczynnik tarcia powierzchni styku narzędzie-wiór i hamowało zużycie narzędzia. Przy dalszym zwiększeniu

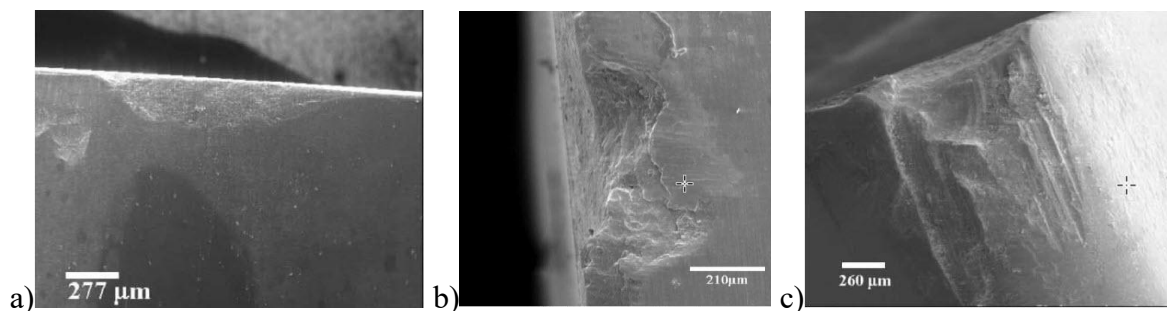
prędkości skrawania ($v_c = 45$ m/min), film smarujący został poważnie uszkodzony, co spowodowało powstanie dużej ilości pozostałości zużycia narzędzia. W materiale podłoża narzędzia wystąpiła reakcja utleniania się. Ze względu na reakcję utleniania się wolframu (W) i kobaltu (Co), powstałe tlenki takie jak Co_2O_3 , Co_3O_4 , WO_3 , CoWO_3 , WO_2 itp., osłabiły siłę adhezji pierwiastka kobaltu (Co) oraz zmniejszyły wytrzymałość narzędzia. Ilość pozostałości związanych z zużyciem ostrza zwiększyła się na powierzchni narzędzia, co nasiliło jego zużycie. Khohtali i inni [99] w swoim artykule skupili się na wpływie chłodzenia konwencjonalnego i HPC (ang. High Pressure Coolant) na zużycie narzędzi, podczas toczenia zgrubnego stopu Inconel 718, przy użyciu płytek powlekanych z węglików spiekanych. Autorzy przeprowadzili eksperymentalne badania przy zastosowaniu dwóch prędkości skrawania 35 i 45 m/min. Uzyskane wyniki dowodzą, że chłodzenie HPC umożliwia znaczną poprawę fragmentacji wiórów, zmniejsza generowane siły i prawie dwukrotnie zwiększa trwałość narzędzia. W porównaniu do chłodzenia konwencjonalnego – zalewowego, poprawę trwałości narzędzia aż o 110 % i 76 % uzyskuje się dzięki zastosowaniu systemu doprowadzania cieczy chłodząco-smarującej pod wysokim ciśnieniem HPC, przy obu testowanych prędkościach skrawania. Najmniejsze zużycie powierzchni przyłożenia obserwuje się przy chłodzeniu w warunkach HPC, gdzie można również zaobserwować płynniejszą ewolucję zużycia powierzchni przyłożenia. Wręcz przeciwnie, zużycie karbu jest bardziej widoczne w przypadku chłodzenia w środowisku HPC. Z badań powierzchni narzędzi metodą SEM i EDS wynika, że najbardziej oczywistym mechanizmem zużycia zaobserwowanym w tym badaniu jest adhezja. Przylegające warstwy pokrywają prawie całą strefę skrawania, co sugeruje, że adhezja odgrywa również rolę w zużyciu kraterowym, zużyciu karbu i zużyciu powierzchni przyłożenia. Połączenie niestabilności warstwy i przyspieszenia mechanizmu zużycia adhezyjnego pod wpływem mechanicznego działania HPC może wyjaśnić wyraźne karby powstałe w wyniku chłodzenia HPC. Zużycie karbu powstałe w wyniku chłodzenia HPC może być również związane z powstawaniem zadziórów. Tworzenie się BUL (ang. Built-Up Layer), czyli wybudowanej warstwy skrawanego materiału w wyniku adhezji na powierzchni przyłożenia narzędzia, chroni je przed nadmiernym zużyciem ściernym. Zastosowanie systemu chłodzenia HPC, może znacznie zmniejszyć BUE. Jednakże odpryski ostrza, spowodowane usuwaniem przyklejonego materiału na końcu narzędzia, są bardziej widoczne w przypadku chłodzenia w warunkach HPC, głównie ze względu na przyspieszenie mechanizmu adhezji pod działaniem strumienia pod ciśnieniem. Ezugwu i inni [100] w kolejnych badaniach przeprowadzili testy dotyczące toczenia stopu Inconel 718 za pomocą dostępnych

komercyjnie narzędzi z węglików spiekanych powlekanych techniką PVD, przy zastosowaniu zwykłego oraz wysokociśnieniowego chłodzenia sięgającego do 20,3 MPa. Rejestracji poddano i przeanalizowano czas pracy narzędzia, chropowatość powierzchni (Ra), zużycie narzędzia i siły działające na element obrabiany. Wyniki testów pokazują, że akceptowalną jakość powierzchni i poprawioną żywotność narzędzia można osiągnąć podczas obróbki stopu Inconel 718 przy zastosowaniu wysokich ciśnień cieczy chłodząco-smarującej. Obróbka wykańczająca stopu Inconel 718 za pomocą powlekanych narzędzi z węglików spiekanych, przy wykorzystaniu wysokociśnieniowego dostarczania cieczy chłodząco-smarującej, może zwiększyć żywotność narzędzia nawet o 350% przy wyższych prędkościach obróbki. Istnieje krytyczne ciśnienie dostarczanej cieczy chłodząco-smarującej, charakterystyczne dla określonych warunków skrawania, w którym osiągalna jest optymalna wydajność narzędzia. Obróbka przy ciśnieniu powyżej tego krytycznego poziomu niekorzystnie wpłynie na żywotność narzędzia. Zużycie wierzchołka narzędzia było dominującym modelem uszkodzenia narzędzia podczas obróbki, prawdopodobnie ze względu na zmniejszenie długości/powierzchni kontaktu wiór-narzędzie i narzędzie-część obrabiana. Typowymi rodzajami zużycia ostrza, było starcie powierzchni przyłożenia, zużycie naroża oraz nacięcie na linii głębokości skrawania, co jest charakterystyczne dla obróbki stopu 718. Wyraźne wykruszenia krawędzi skrawającej wystąpiły podczas obróbki z prędkością skrawania 60 m/min i posuwem 0,2 mm/obr, przy zastosowaniu konwencjonalnego przepływu cieczy chłodząco-smarującej. Shailesh Rao [77] badał wpływ wielkości promienia naroża na morfologię wióra, siły skrawania i zużycie narzędzia, podczas toczenia w warunkach na sucho materiału Inconel 718. Badania przeprowadzono przy stałej głębokości skrawania równej $a_p = 0,2$ mm i posuwie równym $f = 0,15$ mm/obr, dla czterech wartości prędkości skrawania v_c (65, 81, 95 i 106 m/min). Wyniki badań pokazały, że przy mniejszym promieniu naroża, powierzchnia natarcia narzędzia zużywała się podczas procesów skrawania. Ze względu na minimalny kontakt krawędzi narzędzia, zauważalne było zużycie powierzchni przyłożenia. Wzrost zużycia powierzchni przyłożenia oraz siły promieniowej skutkował intensywniejszym zużyciem narzędzia. Przy większym promieniu naroża ostrza zużycie powierzchni przyłożenia ulegało redukcji. Oprócz zużycia kraterowego powierzchni natarcia i starcia powierzchni przyłożenia, przy mniejszym promieniu naroża ostrza oraz większej sile skrawania zaobserwowano również wykruszenie i wyszczerbienie krawędzi skrawającej oraz przywieranie wiórów. W przypadku większego promienia naroża, zużycie narzędzia miało charakter ścierny oraz obejmowało wykruszenie krawędzi skrawającej. Coelho i inni [61] badali wpływ modyfikacji krawędzi skrawającej

oraz rodzaju materiału ostrza na zużycie ostrza, temperaturę na powierzchni natarcia, chropowatość powierzchni, mikrostrukturę warstwy wierzchniej, a także naprężenia szczątkowe. Do testów wykorzystano ostrza z ceramiki narzędziowej oraz polikrystalicznego azotku boru. Na podstawie przeprowadzonych badań zarejestrowano, że wszystkie narzędzia wykazywały zużycie w postaci wyżłobienia, co jest typowe podczas obróbki stopów niklu. Zużycie to pojawia się na krawędzi skrawającej na końcu głębokości skrawania. Wynika ono głównie z wysokiego gradientu naprężeń w tym miejscu, w połączeniu z utlenianiem wywołanym wysoką temperaturą. W przypadku narzędzi ceramicznych wyżłobienie było szersze, ale niezbyt głębokie, natomiast w narzędziach PCBN było głębsze i połączone z zużyciem powierzchni przyłożenia. Zużycie powierzchni przyłożenia było obecne we wszystkich testowanych narzędziach i przy zastosowanych warunkach skrawania. Wartości dla narzędzi ceramicznych wynosiły około 250–300 μm , podczas gdy dla narzędzi PCBN było to średnio około 300–350 μm po jednym przejściu na długości 185 mm. Wśród wszystkich testowanych krawędzi nie zaobserwowano znaczących różnic w zużyciu powierzchni przyłożenia, jednak zmodyfikowana krawędź (M) wykazywała bardziej równomierne i stopniowe zużycie. Zazwyczaj na okrągłych płytkach o tej geometrii obserwowano także mniejsze wyżłobienia. Okrągłe płytki wykonane z ceramiki na bazie tlenku glinu (C50) okazały się najlepsze pod względem zużycia narzędzia (Rys. 2.25 i 2.26).



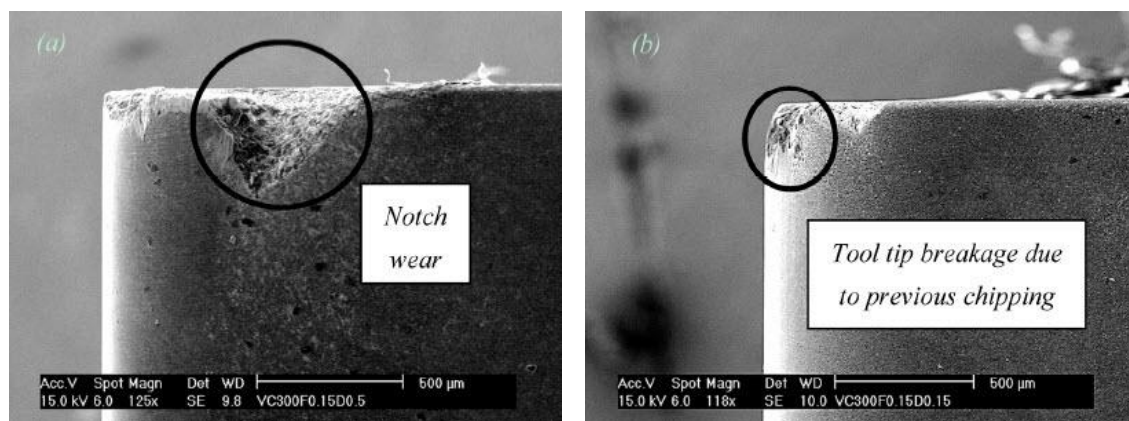
Rys. 2.25. Obraz SEM przedstawiający zużycie w postaci nacięcia (ang. notch) na ostrzu z ceramiki C50 po toczeniu materiału Inconel 718 [61]



Rys. 2.26. Obrazy SEM przedstawiające zużycie: a) powierzchni przyłożenia ostrza wykonanego z ceramiki C50, b) powierzchni przyłożenia ostrza wykonanego z ceramiki C70, c) powierzchni przyłożenia ostrza wykonanego z PCBN P50, po toczeniu materiału Inconel 718 [61]

Zhou i inni [43] badali wpływ ostrzy z powlekanego i niepowlekanego regularnego azotku boru na zużycie ostrza, chropowatość powierzchni, mikrostrukturę warstwy wierzchniej i uszkodzenia warstwy wierzchniej w warunkach toczenia wykończeniowego z użyciem trzech różnych prędkości skrawania. Wyniki badań pokazały, że ostrze powlekane z CBN prezentuje dłuższą trwałość o około 20% przy prędkości skrawania 250 m/min. Trwałość ostrzy z powlekanego i niepowlekanego CBN przy prędkościach skrawania 300 m/min i 350 m/min jest na podobnym poziomie. Podstawowym wnioskiem autorów jest stwierdzenie, że trwałość narzędzia zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości skrawania. Costes i inni [64] studiowali wpływ prędkości skrawania na objawy zużycia ostrzy skrawających wykonanych z CBN. Udowodnili oni, że przy prędkościach skrawania $v_c = 250 - 300$ m/min, ostrza wykazują najlepszą odporność na zużycie. Autorzy następująco opisali przebieg mechanizmów degradacji ostrza. Podczas skrawania materiał obrabiany, pod wpływem wysokiej temperatury i naprężeń, ulega powierzchniowemu uplastycznieniu, co powoduje rozprzestrzenianie się stopu w obszarze kontaktu pomiędzy ostrzem narzędzia a materiałem obrabianym (na powierzchniach natarcia i przyłożenia). Ze względu na chemiczne powinowactwo pierwiastków obu materiałów, część Inconelu 718 dyfunduje do narzędzia, tworząc nowe związki o odmiennych właściwościach fizycznych. Nowo powstała warstwa ma mniejszą odporność niż pierwotny materiał narzędziowy i zostaje usunięta w wyniku mechanizmów skrawania, zabierając ze sobą elementy ostrza narzędzia (spoiwo i ziarna CBN). Powoduje to odsłonięcie powierzchni podłoża, na której może osadzić się nowa warstwa. Proces ten powtarza się cyklicznie i bardzo szybko. W związku z tym dominującymi mechanizmami zużycia narzędzia skrawającego CBN podczas obróbki są kolejno: adhezja, następnie dyfuzja, a na końcu ścieranie. Cantero i inni [63] badali wydajność narzędzi PCBN dostarczonych przez czterech różnych producentów narzędzi

oraz nowy rodzaj materiału JP2 (Bidemic) z firmy NTK, odpowiadający właściwościami narzędziom CBN podczas toczenia wykończeniowego materiału Inconel 718, w warunkach na sucho. Autorzy przeprowadzili testy w różnych warunkach skrawania, oceniając ewolucję sił skrawania, chropowatość powierzchni oraz zużycie ostrzy. W celu określenia warunków odniesienia testom poddano również narzędzie z węglików spiekanych. Narzędzia z PCBN testowano w zakresie parametrów; $v_c = 200$ m/min i $v_c = 300$ m/min, $f = 0,15$ mm/obr i $a_p = 0,15$ mm, $a_p = 0,25$ mm i $a_p = 0,5$ mm. Narzędzie z węglików spiekanych osiągnęło trwałość do 29 min przy małych prędkościach skrawania w zakresie 35 – 50 m/min, dlatego autorzy potwierdzili zasadność obróbki wykończeniowej Inconelu 718 na sucho tym narzędziem. Dla wszystkich testów wykonanych z narzędziami z PCBN i JP2 najczęstszym zużyciem była adhezja, wykruszenie, nacięcie i krater. Spośród wszystkich rodzajów zużycia, nacięcie (karb) prowadził do najczęstszej wymiany narzędzia. W wszystkich zastosowanych warunkach skrawania trwałość narzędzia była krótsza niż 2 min. Autorzy stwierdzili, że obróbka Inconelu 718 na sucho z dużymi prędkościami skrawania nie jest opłacalna przemysłowo. Ważnym wnioskiem jest również to, że zwiększenie głębokości skrawania także prowadzi do zmniejszenia trwałości narzędzia. Należy także zaznaczyć, że narzędzia charakteryzujące się bardziej wytrzymałą krawędzią skrawającą (fazowane i honowane o szerokości 50 μ m lub okrągłe, honowane o promieniu 35 μ m) mają nieco dłuższą trwałość, niż narzędzia z zaokrągloną i honowaną krawędzią o promieniu 25 μ m (Rys. 2.27).



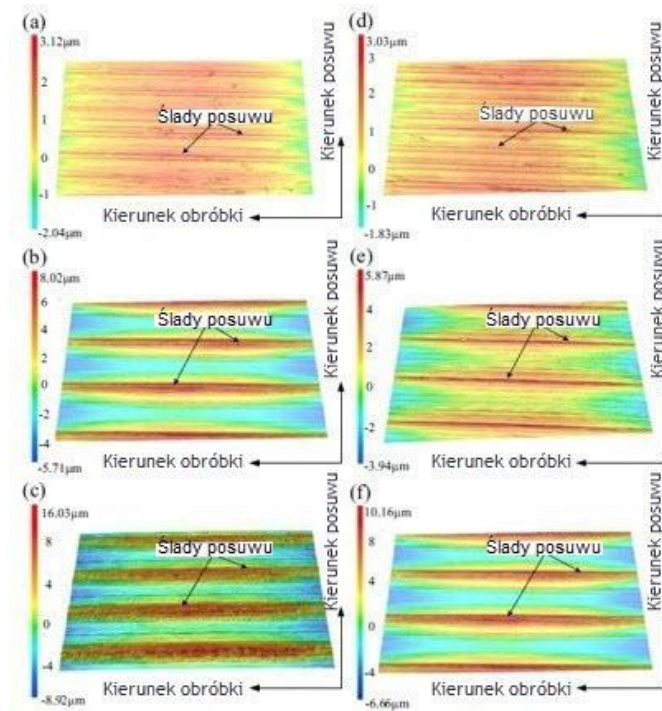
Rys. 2.27. Obrazy SEM ostrzy wykonanych z PCBN firmy Seco, przedstawiające typowe rodzaje zużycia charakterystyczne dla obróbki materiału Inconel 718: a) nacięcie, b) wykruszenia krawędzi skrawającej [63]

Khan i inni [72] przedstawili wyniki badań po toczeniu wykończeniowym Inconelu 718, przy użyciu płytek PCBN o małej zawartości azotku boru. Testy wykorzystywały zmodyfikowaną ortogonalną macierz czynnikową L36 Taguchiego, która oceniała wpływ

kształtu/geometrii płytki skrawającej (okrągła, typu C), przygotowanie krawędzi narzędzia (doszlifowane, fazowane i honowane), ciśnienie cieczy chłodząco-smarującej (10, 100bar), powłokę narzędzia (niepowlekane, TiAlN+TiN), prędkość skrawania (150, 300, 450 m/min) i posuw (0,05; 0,10; 0,20 mm/obr.) przy stałej głębokości skrawania 0,2 mm, na trwałość narzędzia. W badaniach wykazano, że przy najmniejszej prędkości skrawania (150 m/min) średnia trwałość narzędzia przy zastosowaniu płytki okrągłej była ok. 5 razy dłuższa w porównaniu z narzędziem typu C. Zużycie powierzchni przyłożenia było dominującym rodzajem zużycia w większości testów, wywołanym w wyniku ścierania, natomiast narost materiału przedmiotu obrabianego był także wyraźnie zauważalny. Gdy prędkość skrawania wzrosła do 300 m/min, obecność rowków i BUE zmniejszyła się, co prowadzi do porównywalnej wydajności między narzędziami typu C i narzędziami okrągłymi. Jednak podczas zwiększania prędkości do 450 m/min zdarzały się katastrofalne złamania płytki, wykruszenia i pęknięcia termiczne, a trwałość narzędzia nie przekraczała 3,5 min. Wykresy efektów głównych wskazywały na użycie niepowlekanych płytek okrągłych z przygotowaniem krawędzi skrawającej E25 przy prędkości skrawania 150 m/min, posuwie 0,05 mm/obr. i ciśnieniu płynu 10 bar, dawało najdłuższą żywotność narzędzia. Obliczenia ANOVA wykazały, że prędkość skrawania, posuw i geometria narzędzia miały znaczący wpływ na trwałość narzędzia z odpowiednimi PCR 36,6 %, 17,3 % i odpowiednio 11,5 %. Choć nie był to statystycznie istotny czynnik, użycie cieczy chłodząco-smarującej pod wysokim ciśnieniem (100 bar), było czasami szkodliwe dla trwałości narzędzia, szczególnie przy małych prędkościach skrawania. Soo i inni [73] badali wpływ różnych powłok na narzędziach PCBN na skrawalność stopu Inconel 718 w warunkach z zastosowaniem cieczy chłodząco-smarującej. Badania zostały wykonane przy stałej głębokości skrawania i posuwu, ale przy trzech wartościach prędkości skrawania 200, 300 i 450 m/min. Wyniki badań pokazały, że powłoka TiSiN zapewniła wzrost trwałości narzędzia o 40 % w porównaniu do niepowlekanych ostrzy PCBN, przy prędkości skrawania 200 m/min. Natomiast przy prędkości skrawania 300 m/min zastosowanie powłok nie przyniosło żadnych korzyści związanych z żywotnością narzędzia. Dalszy wzrost prędkości skrawania również nie dał korzystnych efektów, a wręcz obniżył trwałość wszystkich badanych narzędzi. Zużycie narzędzia w postaci adhezji, oraz wcięcia na głębokości skrawania, były głównym typem degradacji ostrza podczas toczenia przy prędkości 200 m/min, natomiast jednolite zużycie powierzchni przyłożenia i kraterowe powierzchni natarcia, były dominujące przy wyższych prędkościach skrawania.

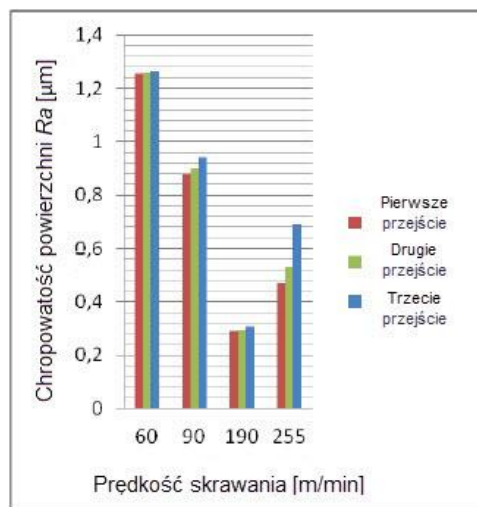
2.9. Chropowość oraz topografia powierzchni obrabianej po toczeniu stopu Inconel 718

Chropowość i topografia powierzchni należą do zbioru nierówności powierzchni, które określa się terminem struktury geometrycznej powierzchni (SGP) [74]. Struktura geometryczna powierzchni obejmuje także kierunkowość struktury oraz błędy kształtu i falistość. Chropowość i topografia powierzchni są istotnymi cechami geometrycznymi powierzchni, którym przypisuje się wpływ na prognozowanie właściwości eksploatacyjnych powierzchni funkcjonalnych [101]. W przypadku powierzchni części pracujących w silniku lotniczym, cechy te mają również bardzo duży wpływ na przepływ powietrza w silniku. Dlatego podczas obróbki części z tak trudno obrabialnych materiałów jak nadstop 718, uzyskanie odpowiedniej jakości powierzchni nastręcza niekiedy wiele trudności, na co wskazało wielu badaczy w swoich pracach. Hua i Liu [102] przeprowadzili testy toczenia materiału Inconel 718 na sucho, stosując trzy różne prędkości skrawania, trzy różne wartości posuwu oraz dwa rodzaje płytek skrawających z różnymi promieniami naroża. Badania wykazały, że zmiana prędkości skrawania nie ma istotnego wpływu na chropowość powierzchni. Jednocześnie autorzy potwierdzili, że większy promień naroża płytki jest bardziej efektywny w poprawie jakości powierzchni w porównaniu z mniejszym promieniem. Podobną zależność zaobserwowano przy zmniejszeniu wartości posuwu (Rys. 2.28). Badania nad wpływem prędkości skrawania na chropowość powierzchni podczas toczenia Inconelu 718 przeprowadzili także D'Addona i inni [59]. W swoich eksperymentach stosowali różne prędkości skrawania i mierzyli chropowość powierzchni po każdym z trzech przejść narzędzia. Zaobserwowali, że dłuższy kontakt krawędzi skrawającej z materiałem prowadzi do pogorszenia jakości powierzchni, jednak różnice między pierwszym a trzecim przejściem nie były znaczące. Ponadto stwierdzili, że zwiększenie prędkości skrawania początkowo poprawia chropowość powierzchni, ale po przekroczeniu pewnej wartości następuje jej pogorszenie, co tłumaczą gwałtownym zużyciem krawędzi skrawającej. Dla przyjętych warunków badań, autorzy uzyskali najmniejszą wartość chropowości powierzchni definiowaną parametrem Ra przy prędkości skrawania 190 m/min (Rys. 2.29). Podobne wnioski dotyczące wpływu parametrów skrawania na jakość powierzchni dostrzegli Jafarian i Umbrello [103]. Celem ich badań było wyznaczenie optymalnych wartości parametrów skrawania, pod kątem uzyskania najkorzystniejszych rezultatów dotyczących chropowości powierzchni i zużycia narzędzia za pomocą sztucznej sieci neuronowej.



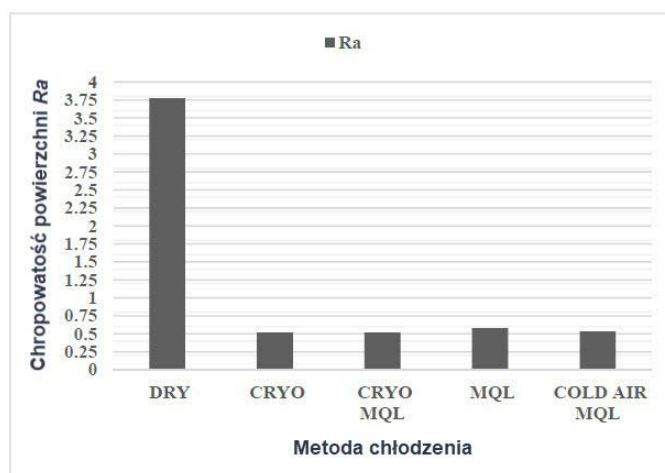
Rys. 2.28. Topografia powierzchni uzyskana przy obróbce z promieniem naroża $r = 0,4 \text{ mm}$ dla: a) $f = 0,05 \text{ mm/obr}$, b) $f = 0,15 \text{ mm/obr}$, c) $f = 0,25 \text{ mm/obr}$, oraz z promieniem naroża $r = 0,8 \text{ mm}$ dla: d) $f = 0,05 \text{ mm/obr}$, e) $f = 0,15 \text{ mm/obr}$, f) $f = 0,25 \text{ mm/obr}$ [102]

Wszystkie próby obróbki wykazały, że zwiększenie prędkości skrawania oraz zmniejszenie głębokości skrawania i posuwu prowadzi do lepszej jakości powierzchni. Wykazano również, że dla każdego parametru skrawania zwiększenie czasu obróbki skutkuje uzyskaniem większej wartości chropowatości powierzchni. Wpływ posuwu na chropowatość powierzchni był intensywny, gdy czas obróbki przekraczał 180 sekund.



Rys. 2.29. Różnice w chropowatości powierzchni dla różnych prędkości skrawania [59]

Natomiast wpływ głębokości skrawania i prędkości skrawania był dominujący dla chropowatości powierzchni, przy mniejszych wartościach czasu obróbki (poniżej 140 sekund). Wpływ cieczy chłodząco-smarującej na jakość powierzchni został zbadany przez Kumara i współautorów [45]. Potwierdzili oni dobrze znaną tezę, że brak chłodzenia powoduje zdecydowane pogorszenie jakości powierzchni stopu na bazie niklu. Wykorzystując narzędzie z węglików spiekanych, udowodniono również przewagę metody chłodzenia mgłą olejową – MQL (Minimum Quantity Lubrication) nad tradycyjną metodą chłodzenia. Obróbka w stanie mokrym oraz MQL, oprócz obniżenia temperatury w strefie skrawania, zapewnia pożądaną kruchość wióra, co przyczynia się do poprawy jakości obrabianej powierzchni. Nieco rozszerzone badania przeprowadzili Mehta, Hemakumar i inni [5], wykonując eksperymenty z różnymi kombinacjami systemów chłodzenia, takimi jak MQL, chłodzenie kriogeniczne i chłodzenie zimnym powietrzem. Z raportu wynika, że najlepszą jakość powierzchni uzyskano przy połączeniu MQL i chłodzenia kriogenicznego, gdzie wyniki były o około 85% lepsze w porównaniu do toczenia na sucho (Rys. 2.30). Peng i współautorzy [88, 104] badali porównawczo wpływ konwencjonalnego toczenia z wysokoprędkościowym skrawaniem wspomagany wibracjami ultradźwiękowymi (ang. HUVC) na chropowatość powierzchni. Badania wykazały, że zastosowanie HUVC miało pozytywny wpływ na wartości parametrów Ra , Rz i Rt . HUVC (ang. High Ultrasonic Vibration Cutting) poprawia topografię powierzchni oraz chropowatość.

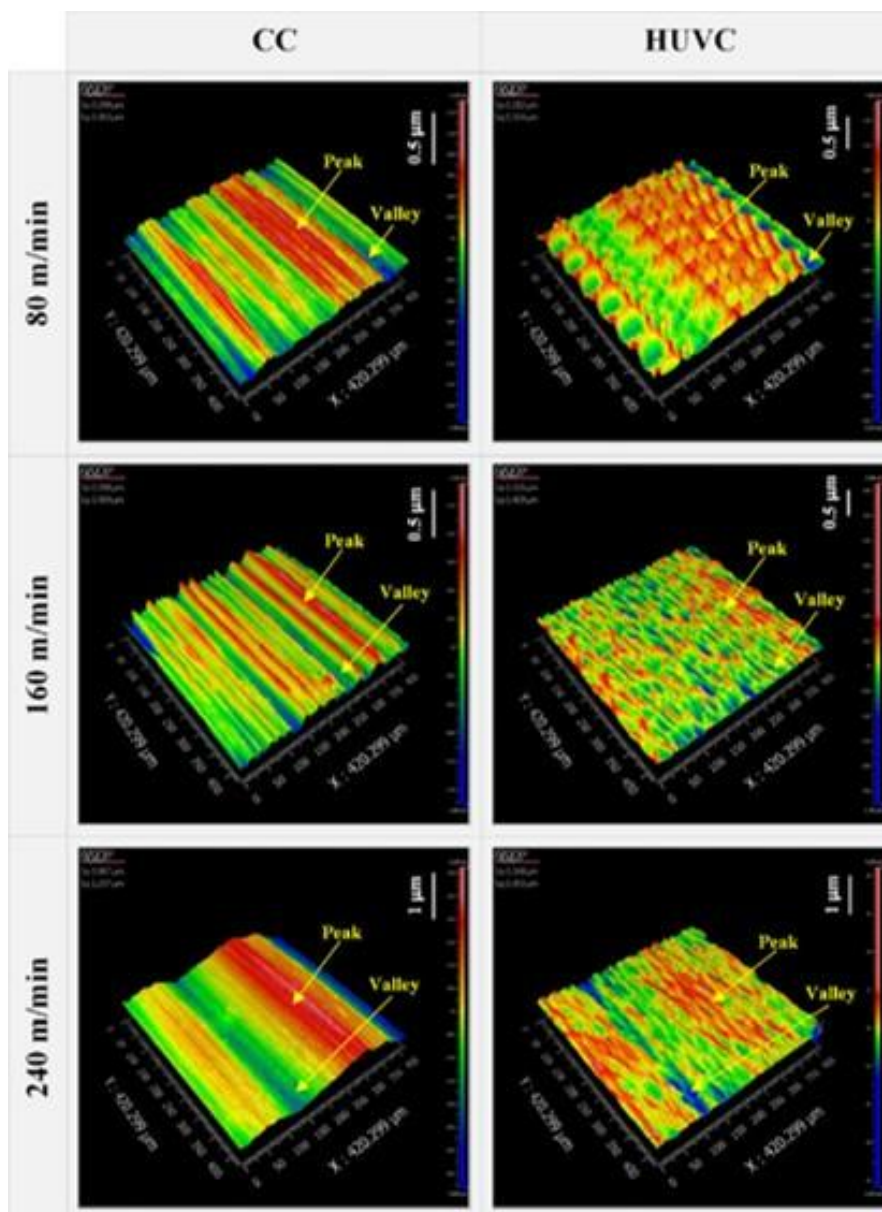


Rys. 2.30. Porównanie chropowatości powierzchni przy różnych metodach chłodzenia [5]

Autorzy zwracają uwagę, że w początkowym etapie obróbki, kiedy narzędzie nie jest zużyte nie ma większych różnic w uzyskanej chropowatości zarówno w wyniku skrawania konwencjonalnego jak i HUVC. Natomiast kiedy narzędzie jest częściowo zużyte, obróbka HUVC pozwala uzyskać mniejsze wartości chropowatości powierzchni w porównaniu do

obróbki konwencjonalnej. Korzystny wpływ HUVVC na jakość powierzchni, staje się bardziej wyraźny wraz ze wzrostem ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej. Przy prędkości skrawania wynoszącej 80 m/min i użyciu częściowo zużytego narzędzia, wskaźniki chropowatości powierzchni Ra , Rz i Rt w przypadku HUVVC zostały zmniejszone odpowiednio o 22,45%, 25,36% i 41,08% w porównaniu do konwencjonalnego skrawania (Rys. 2.31). Pawade i inni [81] badali wpływ geometrii krawędzi skrawającej oraz parametrów obróbki między innymi na chropowatość powierzchni. Autorzy zwrócili uwagę, że z podstawowej teorii obróbki skrawaniem wiadomo, iż posuw oraz promień naroża narzędzia odgrywają istotną rolę w chropowatości obrabianej powierzchni, gdy krawędź skrawająca jest ostra. Jednak gdy krawędź skrawająca nie jest ostra lub została zmodyfikowana, jak w przypadku przeprowadzonych testów poprzez sfazowanie, wówczas zaczynają decydować inne czynniki, które wpływają na chropowatość powierzchni. Uważa się, że nagromadzona objętość materiału przed krawędzią skrawającą, rozciąga się również poza punkt narzędzia i tłumi wpływ jego geometrii oraz posuwu na chropowatość powierzchni. Zaobserwowano, że chropowatość powierzchni jest wyższa przy mniejszej prędkości skrawania. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania do 475 m/min chropowatość powierzchni maleje. Zatem przy większej objętości materiału usuwanego na jednostkę czasu ilość nagromadzonego materiału jest większa, co skuteczniej tłumi wpływ promienia krawędzi skrawającej i posuwu. W konsekwencji jakość powierzchni ulega poprawie. Yazid i inni [46] zbadali wpływ parametrów skrawania oraz warunków obróbki na integralność powierzchni podczas toczenia wykańczającego stopu Inconel 718 w trzech warunkach skrawania (na sucho, MQL 50 mL/h i MQL 100 mL/h). Eksperymenty wykazały, że metoda chłodzenia MQL zapewnia lepszą chropowatość powierzchni w porównaniu do obróbki na sucho. Przy prędkościach skrawania, wynoszących 90 i 120 m/min, metoda MQL 50 mL zapewnia lepszą chropowatość powierzchni niż obróbka na sucho oraz MQL 100 mL. Ramanujam i współautorzy [83] przeprowadzili badania nad statystycznym podejściem do optymalizacji parametrów toczenia na sucho stopu Inconel 718, oceniając takie wskaźniki wydajności jak siła skrawania, chropowatość powierzchni oraz zużycie narzędzia. Eksperymenty wykazały, że posuw jest najistotniejszym parametrem wpływającym na wartość Ra , natomiast prędkość skrawania ma nieistotny wpływ na chropowatość powierzchni. Sharman i inni [47] zbadali wpływ zastosowania ultra-wysokiego ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej (UHPC) między innymi na integralność powierzchni podczas toczenia wykańczającego stopu Inconel 718. Wyniki wykazały, że zastosowanie UHPC nie

ma ani korzystnego, ani negatywnego wpływu na chropowatość powierzchni, niezależnie od tego, czy używane były nowe, czy zużyte narzędzia.

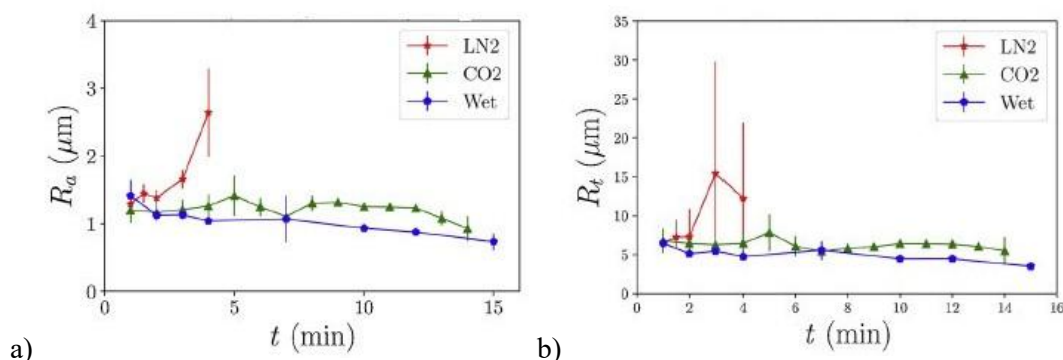


Rys. 2.31. Porównanie topografii powierzchni uzyskanej w wyniku konwencjonalnej obróbki (ang. CC) oraz wspomaganiej wibracjami ultradźwiękowymi (ang. HUVF) częściowo zużytego narzędzia, dla trzech prędkości skrawania i przy; $f = 0,005 \text{ mm/obr}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$ [104]

Arrazola i inni [48] w swoich badaniach wykazali, że wartości chropowatości powierzchni rosły wraz ze zużyciem powierzchni przyłożenia narzędzia, aż do osiągnięcia wartości 0,15 mm. Dla zakresu zużycia od 0,15 do 0,40 mm trend zmian chropowatości powierzchni nie był już tak wyraźny, a w niektórych przypadkach zaobserwowano nawet jej spadek. Szablewski i inni [105] badali wpływ głębokości skrawania na chropowatość powierzchni podczas toczenia średnicy zewnętrznej i wytaczania średnicy wewnętrznej w materiale

Inconel 718. Testy pokazały, że głębokość skrawania ma wpływ na chropowatość powierzchni szczególnie podczas wytaczania. Zwiększenie głębokości skrawania utrudniło dostarczenie cieczy chłodząco – smarującej do strefy skrawania. Autorzy zwracają uwagę, że źródłem takiego stanu rzeczy były kłębiące się wióry, które w przypadku obróbki tego typu materiałów i przy stosunkowo małych wartościach głębokości skrawania są trudne do złamania. Deshpande i inni [106] badali możliwość oszacowania chropowatości powierzchni biorąc pod uwagę nie tylko parametry obróbki ale także siły skrawania, wibracje i hałas podczas obróbki materiału Inconel 718. W badaniach użyto płytki skrawające z węglików spiekanych poddane i niepoddane obróbce kriogenicznej. Autorzy udowodnili, że użycie zmodyfikowanych modeli regresji pozwala oszacować prognozowaną chropowatość powierzchni biorąc pod uwagę parametry skrawania z wyjątkiem głębokości skrawania, oraz biorąc pod uwagę siły skrawania, wibracje i hałas. Cakiroglu [107] badał obrabialność stopu Inconel 718 oraz możliwość poprawy parametrów skrawania w trzech różnych warunkach obróbki podczas toczenia wykończeniowego tj. na sucho, przy użyciu MQL oraz z użyciem rurki z komorą wirową. W badaniach ustalono optymalne parametry skrawania dla danych warunków obróbki na podstawie oceny temperatura strefy skrawania, siły skrawania oraz chropowatości powierzchni. Najniższą wartość chropowatości powierzchni uzyskano dla warunków obróbki z użyciem MQL. Analiza wariancji wykazała, że czynnikami, które mają największy wpływ na uzyskiwaną chropowatość powierzchni są prędkość posuwu i warunki skrawania z wartościami PCR odpowiednio 88,05 % i 8,83 %. Zhou i inni [43] podczas swoich badań nad wpływem powlekanego i niepowlekanego regularnego azotku boru na chropowatość powierzchni stopu 718, uzyskali niższe wartości parametru Ra dla powierzchni obrobionej ostrzem niepowlekanym CBN. Autorzy zauważają, że jest to spowodowane większą tendencją do tworzenia narostu w przypadku narzędzia powlekanego CBN. Z kolei przyczynę narostu badacze upatrują w większej wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej na powlekanym narzędziu CBN oraz w wyższej temperaturze skrawania na styku narzędzia z obrabianym materiałem, co jest efektem niższej przewodności cieplnej powlekanego narzędzia CBN w porównaniu z niepowlekanym. Chaabani i inni [87] w wyniku przeprowadzonych badań udowodnili, że w przypadku chropowatości powierzchni, mierzone parametry Ra i Rt wykazywały podobny trend zarówno w przypadku konwencjonalnej metody chłodzenia, jak i w warunkach chłodzenia LCO_2 , osiągając niższe wartości w porównaniu do strategii z LN_2 . Ponadto, w przypadku tej ostatniej metody, odnotowano najwyższe wartości chropowatości powierzchni, co było spowodowane przywieraniem wiórów (Rys. 2.32). Khanna i inni [92]

doszli do wniosku, że wartości parametru R_a wzrastają wraz ze wzrostem wartości współczynnika usuwania materiału. Autorzy najlepsze wyniki wykończenia powierzchni



Rys. 2.32. Przyrost chropowatości powierzchni w warunkach na mokro (ang. Wet), LN₂ i LCO₂:

a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości R_a , b) całkowita wysokość profilu chropowatości R_t [87]

uzyskali podczas obróbki stopu Inconel 718 w warunkach chłodzenia kriogenicznego, następnie podczas toczenia w warunkach z chłodzeniem zalewowym. Z kolei najgorszą jakość powierzchni uzyskano w warunkach obróbki na sucho.

2.10. Mikrostruktura warstwy wierzchniej po skrawaniu stopu Inconel 718

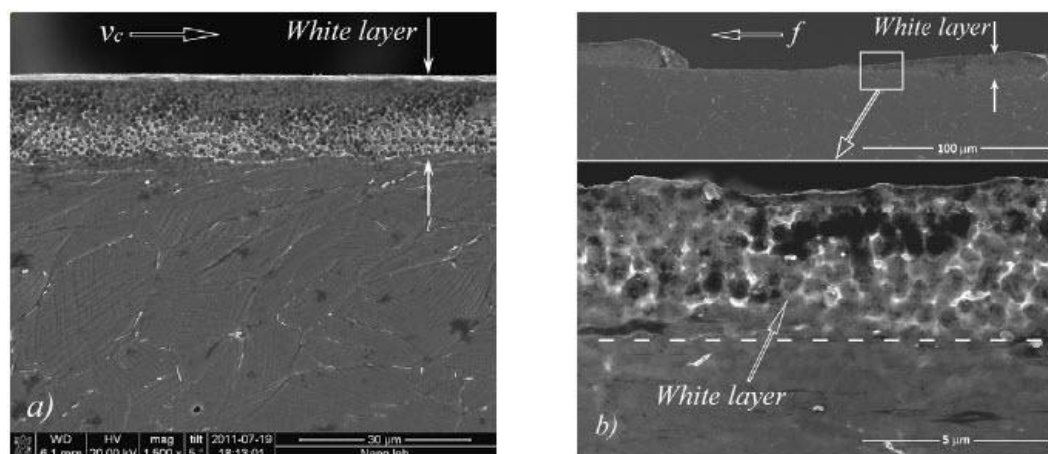
Warstwa wierzchnia to część materiału, przylegająca do powierzchni wraz z powierzchnią, której własności fizyczne różnią się od reszty materiału nazywanej rdzeniem [108]. Jest częścią struktury geometrycznej powierzchni SGP, której opis znajduje się w normie PN-EN ISO 25178 [109]. Charakterystyka metrologiczna SGP, dotyczy profilu 2-wymiarowego i 3-wymiarowego nierówności powierzchni oraz wykresu liniowego udziału nośnego. Opis technologicznej warstwy wierzchniej związany jest z oddziaływaniem zjawisk zachodzących podczas procesu technologicznego na własności takie jak [108]:

- wielkość i częstotliwość występowania deformacji ziaren,
- rozkład twardości w funkcji odległości od powierzchni,
- rozkład naprężeń własnych (szczątkowych) w zależności od głębokości,
- występowanie tzw. białej warstwy (ang. white layer).

Wszystkie z powyższych właściwości mają bardzo duży wpływ na walory eksploatacyjne części maszyn, a przede wszystkim na ich wytrzymałość zmęczeniową. Szczególną uwagę przywiązuje się do wymienionych cech technologicznej warstwy wierzchniej TWW, w przypadku krytycznych części silników lotniczych. Tego typu komponenty bardzo często

produkuje się według zatwierdzanych procesów technologicznych, ponieważ mają one wpływ na bezpieczeństwo lotu. Producenci silników lotniczych posiadają ściśle określone wymagania techniczne dotyczące TWW w stosunku do poddostawców komponentów.

Badaniami mikrostruktury warstwy wierzchniej powierzchni obrabianej stopu Inconel 718 zajmowało się wielu naukowców. Bushlya i inni [110] badali wpływ zużycia narzędzia i parametrów obróbki na intensywność tworzenia się białej warstwy w czasie obróbki stopu 718. Eksperymentalna praca autorów doprowadziła do wniosków, że zużycie narzędzia, obróbka na sucho i prędkość skrawania okazały się głównymi czynnikami prowadzącymi do intensyfikacji białej warstwy. Biała warstwa składa się z nanokrystalicznych ziaren o wielkości od 50 do 150 nm. Jej skład fazowy zawiera fazy obecne w materiale wyjściowym. Zmniejszenie rozmiaru ziarna przypisano głównie dynamicznej rekrytalizacji oraz podziałowi ziarna w wyniku intensywnych odkształceń plastycznych obszaru przypowierzchniowego. Czynniki technologiczne, takie jak stopień krawędzi skrawającej w wyniku zużycia narzędzia oraz intensywny przepływ boczny materiału, zostały uznane za odpowiedzialne za promowanie mechanizmów dynamicznej rekrytalizacji oraz intensywnych odkształceń plastycznych, które prowadzą do powstawania białej warstwy (Rys. 2.33).

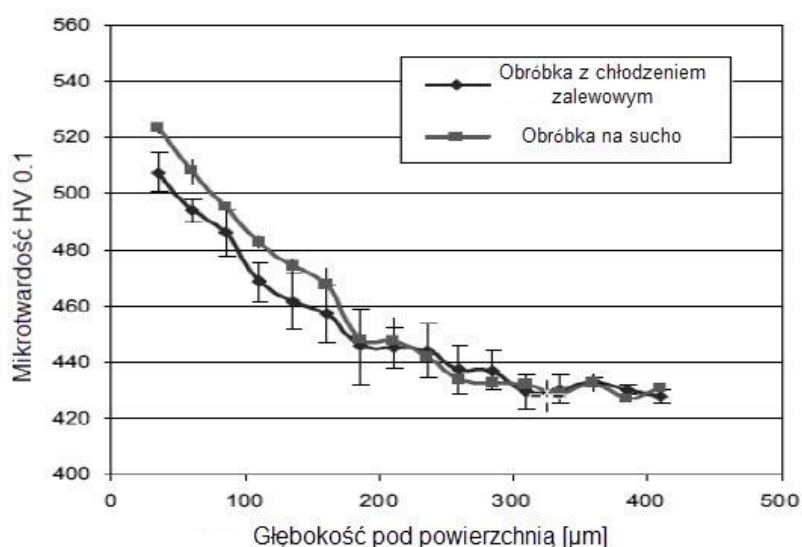


Rys. 2.33. a) Biała warstwa i deformacja warstwy podpowierzchniowej w kierunku prędkości skrawania, b) nieregularność rozkładu białej warstwy w kierunku posuwu [110]

Yazid i inni [46] na podstawie przeprowadzonych badań doszli do podobnych wniosków, że kąt poślizgu mikrostruktury oraz głębokość jego wpływu są większe podczas obróbki w warunkach na sucho. Dodatkowo autorzy twierdzą, iż intensywność zmian mikrostruktury w warunkach obróbki na sucho przełożyła się na duże wartości twardości, co wskazuje na silne umocnienie materiału w porównaniu z próbkami obrabianymi

w warunkach MQL. Eksperymenty przeprowadzone przez Sharman i innych [47] doprowadziły do wniosków, że uszkodzenia mikrostrukturalne warstwy podpowierzchniowej spowodowane obróbką obejmowały zdeformowane granice ziaren w kierunku skrawania, popękane cząstki węglików oraz wnęki powierzchniowe. Tego typu defekty są powszechnie obserwowane podczas obróbki Inconelu 718. Podczas skrawania nowym narzędziem występowała stosunkowo niewielka deformacja plastyczna granic ziaren (średnio 7 μm). Natomiast powierzchnie obrabiane zużytymi narzędziami wykazywały znacznie większy poziom deformacji granic ziaren (średnio 18 μm). Wyniki pokazują również, że zastosowanie UHPC nie ma ani korzystnego, ani negatywnego wpływu na poziom deformacji mikrostrukturalnej obrabianego materiału, uzyskanej podczas skrawania zarówno nowymi, jak i zużytymi narzędziami. Arrazola i inni [48] na podstawie swoich badań udowodnili, że wady integralności powierzchni pojawiały się losowo od początku testów obróbki. Natomiast znacznie częściej występowały przy wyższych wartościach czasu obróbki, tj. przy wartościach zużycia odpowiadających szerokości starcia powierzchni przyłożenia narzędzia wyższych niż 0,15 mm. W przeprowadzonych testach również pojawiły się typowe wady, takie jak utwardzenie przez zgniot, wyrywanie materiału, rozmazywanie materiału, zakucia i przyklejone wióry. Sivalingam i inni [86] na podstawie przeprowadzonych badań udowodnił, że w porównaniu do obróbki na sucho system chłodzenia poprzez natryskiwanie rozpylonym płynem, dla badanych warunków obróbki spowodował wzrost mikrotwardości warstwy wierzchniej. Taki wynik badań autorzy uzasadniają pochłanianiem ciepła z obrabianej powierzchni przez natryskiwanie rozpylonym płynem i jednoczesnym chłodzeniem strefy kontaktu narzędzie-wiór. Chaabani i inni [87] w swoich badaniach potwierdzili, że poziomy zużycia narzędzia mają wpływ na głębokość odkształcenia podpowierzchniowego, a także zmianę mikrostruktury. Autorzy zwracają uwagę, że rozciągające naprężenia szczątkowe są głównie związane z efektem obciążenia cieplnego, natomiast ściskające naprężenia szczątkowe są indukowane przez wzrost obciążenia mechanicznego i przepływ odkształcenia plastycznego. Wyniki badań potwierdziły, że obróbka w warunkach kriogenicznych wykazała lepsze wyniki w porównaniu do konwencjonalnych warunków w odniesieniu do profilu naprężeń szczątkowych. W przypadku obu metod chłodzenia kriogenicznego odnotowano występowanie ściskających naprężeń szczątkowych. Natomiast podczas chłodzenia metodą konwencjonalną profil naprężeń szczątkowych, wykazał ich rozciągający charakter, co autorzy przypisują słabszej wydajności chłodzenia w przypadku tej metody. Do podobnych wniosków doszedł Xavier, Jeyapandiarai i inni [44, 94], którzy w swoich pracach

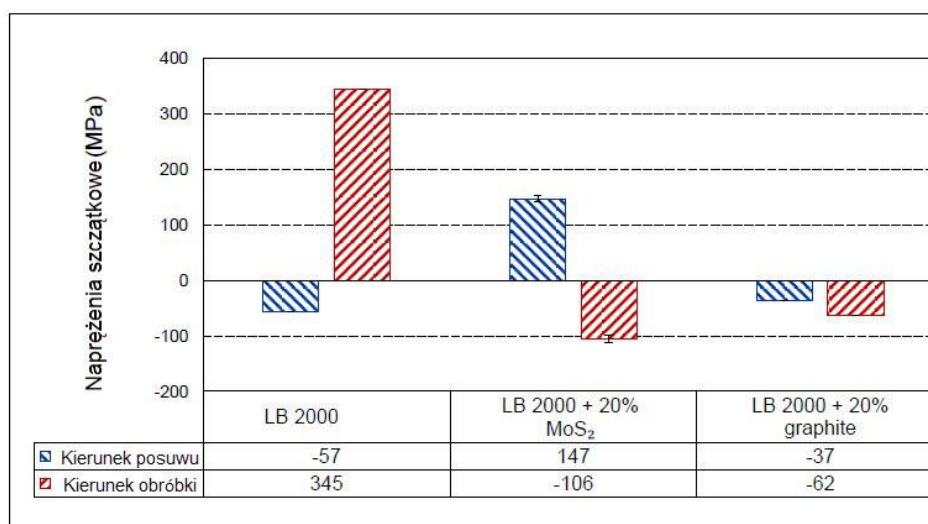
poruszając termin integralności powierzchni odnoszą się do jej mikrotwardości, mikrostruktury oraz występowania naprężeń szczątkowych. Autorzy zwracają uwagę, że kluczowym jest tutaj zredukowanie zjawiska umocnienia przez zgmiot, które bardzo często towarzyszy obróbce stopu 718. W celu ograniczenia umacniania powierzchniowego zalecane jest minimalizowanie powierzchni kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym. Znacznie zdeformowana struktura materiału w warstwie wierzchniej skutkuje podwyższeniem jej mikrotwardości oraz wystąpieniem naprężeń szczątkowych, które mogą obniżyć żywotność komponentu (Rys. 2.34). Konkludując, naukowcy stwierdzili, że chłodzenie zalewowe odgrywa kluczową rolę w obróbce skrawaniem, skutecznie redukując siły skrawania oraz mikrotwardość na obrabianej powierzchni. Ponadto w wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że system chłodzenia MQL daje minimalne wartości naprężeń szczątkowych dla wszystkich testowanych płytek i przy wszystkich testowych prędkościach skrawania. Potwierdzono także tezę, że naprężenia szczątkowe rozciągające są wynikiem efektu cieplnego powstającego podczas obróbki, natomiast naprężenia ściskające wynikają z oddziaływań mechanicznych. Przeprowadzone przez autorów badania pokazały także, że prędkość skrawania jest głównym czynnikiem wpływającym na indukowane naprężenia szczątkowe. Przy małych prędkościach skrawania na obrabianej powierzchni występują naprężenia rozciągające, które zmieniają charakter na ściskające w głębokościach podpowierzchniowych. Przy wyższych prędkościach skrawania indukowane



Rys. 2.34. Mikrotwardość stopu Inconel 718 po obróbce, mierzona na różnych głębokościach [94]

naprężenia własne mają charakter wyłącznie ściskający. Zatem głównymi czynnikami odpowiedzialnymi za powstawanie naprężeń ściskających są prędkość skrawania i geometria narzędzia. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania naprężenia mają charakter bardziej ściskający. Zahoor i inni [112] badali wpływ różnych metod chłodzenia na integralność powierzchni Inconelu 718 podczas frezowania frezem palcowym. Badania były prowadzone w warunkach na sucho, metodą zalewową z użyciem oleju mineralnego, oraz metodą zalewową z użyciem biodegradowalnego oleju na bazie estrów roślinnych Mecagreen. Na podstawie badań autorzy dowiedli, że w przypadku mikrotwardości, środowisko obróbki suche i zalewowe ale na bazie oleju mineralnego powodują większe wartości mikrotwardości występujące na głębokości do 130 μm . Obróbka w warunkach zalewowych z użyciem oleju biodegradowalnego wykazuje znacznie mniejsze wartości mikrotwardości w warstwie wierzchniej, porównywalne do wartości materiału rodzimego. Zmiany mikrostrukturalne w przypadku obróbki na sucho i z chłodzeniem olejem mineralnym występują w bardzo małym stopniu, natomiast na powierzchni obrobionej w warunkach z olejem biodegradowalnym praktycznie nie widać zmian. Obróbka w warunkach chłodzenia zalewowego z olejem biodegradowalnym powoduje powstanie naprężeń szczątkowych ściskających, natomiast obróbka na sucho i w oleju mineralnym powoduje powstanie naprężeń rozciągających. Marques i inni [113] badali integralność powierzchni (chropowatość, mikrotwardość, mikrostrukturę i naprężenia szczątkowe) przy toczeniu Inconelu 718 w środowisku z zastosowaniem stałych środków smarnych (grafitu i dwusiarczku molibdenu) rozproszonych w oleju na bazie roślinnej LB 2000, który został dostarczony do strefy skrawania metodą MQL. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że na charakter mikrotwardości miały wpływ środowiska obróbki, głównie w obecności MoS_2 , w którym wystąpiło zmiękczenie w obszarach bliższych obrabianej powierzchni i szerokiego hartowania w odległości do 300 μm pod powierzchnią obrabianą. Bardziej regularny charakter mikrotwardości zaobserwowano po obróbce w środowisku z rozpuszczonym grafitem. Obróbka w obecności stałych smarów zazwyczaj powoduje powstawanie naprężeń ściskających. Po obróbce w warunkach z obecnością grafitu nie zaobserwowano żadnych naprężeń własnych rozciągających (Rys. 2.35). Zhang i inni [97] wykonali badania dotyczące toczenia materiału Inconel 718 ostrzami z węglików spiekanych z powłokami TiAlN oraz $(\text{Al}, \text{Ti})\text{N}$, odnosząc się między innymi do uzyskanej mikrotwardości powierzchni obrobionej. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy dowiedli, że mikrotwardość powierzchni toczonej była zawsze wyższa niż mikrotwardość materiału wyjściowego. Wzrost mikrotwardości był największy dla powierzchni obrobionej

plytką o ujemnej geometrii z powłoką (Al, Ti)N spośród trzech testowanych typów płytek. Naukowcy zwracają również uwagę na to, że różnice w twardości przy różnych czasach skrawania wynikają ze zmian w geometrii narzędzia, zwłaszcza kąta natarcia, spowodowanych zużyciem krawędzi skrawającej.



Rys. 2.35. Naprężenia szczątkowe zarejestrowane po obróbce stopu Inconel 718 ostrzem z węglików spiekanych w różnych środowiskach obróbki, przy prędkości skrawania 50 m/min, posuwie 0,1 mm/obr. i głębokości skrawania 0,5 mm [113]

Zużycie ostrza zmniejszało kąt natarcia, co prowadziło do zwiększenia umocnienia warstwy wierzchniej. Chwalczuk [3] prowadził badania, które dotyczyły warstwy wierzchniej stopu Inconel 718 po toczeniu ze wspomaganie laserowym. Autor dowiódł, że sekwencyjne laserowo wspomagane toczenie zmienia strukturę warstwy wierzchniej tego materiału, co ma korzystny wpływ na jego skrawalność. Przetopiona warstwa stopu 718 uzyskuje formę struktury dendrytycznej, która cechuje się lepszą skrawalnością w odniesieniu do początkowej, austenitycznej struktury materiału. Dendrytyczna struktura nadstopu ma stałą wartość twardości, niezależnie od początkowej twardości materiału. Toubhans i inni [49] rozpatrywali również wpływ zużycia narzędzia i parametrów skrawania na rodzaj naprężeń szczątkowych oraz ich głębokość. Opracowane przez badaczy profile naprężeń szczątkowych uzyskane przy użyciu zużytych narzędzi wykazują wysoce ścisłający charakter podpowierzchniowo w połączeniu z podwyższonym naprężeniem rozciągającym blisko obrabianej powierzchni. Dodatkowo badania wykazały, że zużycie ma ograniczony wpływ na kształt profili naprężeń szczątkowych do momentu, gdy zużycie powierzchni przyłożenia VB pozostaje poniżej wartości krytycznej między 0,15 mm a 0,2 mm.

2.11. Temperatura i siły skrawania podczas toczenia stopu Inconel 718

2.11.1 Temperatura występująca podczas toczenia stopu Inconel 718

Obecnie na podstawie przeprowadzonych doświadczeń ustalono, że podczas skrawania materiałów konstrukcyjnych ponad 99,5 % pracy skrawania zamieniane jest w ciepło. Ilość ciepła wydzielana przez konwersję energii skrawania w jednostce czasu można w przybliżeniu opisać wzorem [114]:

$$Q = F_c v_c \Delta t \text{ [J]} \quad (2.8)$$

Gdzie: F_c – siła skrawania, v_c – prędkość skrawania.

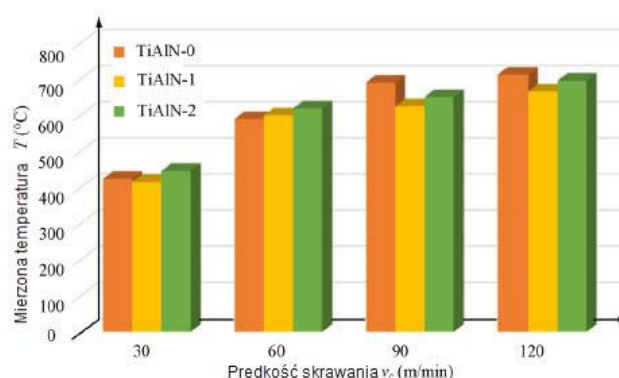
Źródłem ciepła jest praca skrawania, która obejmuje następujące prace składowe:

- praca odkształceń plastycznych i dekohezji materiału skrawanego, potrzebna do tworzenia wióra,
- praca sił tarcia występujących na powierzchni natarcia,
- praca sił tarcia występujących na powierzchni przyłożenia,
- praca odkształceń plastycznych poprzedzających poślizg i przenikających do warstwy wierzchniej.

Wydzielone ciepło zostaje odprowadzone z wiórem, pochłaniane przez ostrze narzędzia, absorbowane do materiału obrabianego, a także unoszone do atmosfery otoczenia i przejmowane przez ciecz chłodząco-smarującą. Znajomość rozkładu ciepła ma istotne znaczenie ze względu na trwałość ostrza, uzyskiwaną dokładność wymiarowo-kształtową, jak również na jakość powierzchni i właściwości warstwy wierzchniej. W zależności od intensywności źródeł ciepła i strumieni cieplnych w strefie skrawania powstaje złożone pole temperatury, które obejmuje obszary odkształceń plastycznych i nasilonego tarcia. Spośród technologicznych parametrów skrawania największy wpływ na temperaturę w strefie skrawania mają kolejno prędkość skrawania, posuw i głębokość skrawania [114].

Zhao i inni [115] badali wpływ grubości powłoki TiAlN na temperaturę skrawania podczas toczenia stopu 718 w warunkach na sucho. Naukowcy przeprowadzili testy narzędziami z węglików spiekanych z powłoką PVD TiAlN o grubości 1 μm i 2 μm . Testy wykazały, że grubsza powłoka spowodowała wzrost temperatury o 19 – 30 $^{\circ}\text{C}$ w porównaniu z cieńszą powłoką w zakresie prędkości skrawania 30 - 120 m/min. Wyniki pokazały także, że narzędzie z powłoką PVD TiAlN o grubości 1 μm , było bardziej odpowiednie do toczenia

na sucho Inconelu 718 w zakresie prędkości skrawania 90 - 120 m/min, uzyskując lepszy efekt przeciwcieniowy powłoki i niższą temperaturę skrawania (Rys. 2.36).



Rys. 2.36. Wartości temperatury skrawania dla narzędzi z powłoką $\text{Ti}_{0,55}\text{Al}_{0,45}\text{N}$ o różnej grubości (TiAlN-1 – grubość 1 μm , TiAlN-2 – grubość 2 μm) [115]

Autorzy potwierdzają tezę Grzesika, że prędkość skrawania ma największy wpływ na temperaturę w obszarze skrawania. Yilmaz i inni [116] zbadali wpływ zastosowania zewnętrznego łamacza wióra na efektywną obróbkę stopu Inconel 718. Autorzy między innymi badali wpływ zastosowania zewnętrznego łamacza wiórów na temperaturę skrawania. Testy wykazały, że zastosowanie zewnętrznego łamacza wióra nieznacznie zmniejszyło siłę skrawania i temperaturę skrawania w zakresie od 3% do 15%. Dla przeprowadzanych prób najwyższe wyniki temperatury skrawania w przypadku toczenia konwencjonalnego uzyskano w granicy 450 °C. Natomiast podczas obróbki z użyciem zewnętrznego łamacza wióra wartości temperatury skrawania sięgały 400 °C. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) wskazały, że głębokość skrawania była najistotniejszym parametrem obróbki w konwencjonalnej obróbce Inconelu 718, wpływającym na siłę skrawania, temperaturę w strefie obróbki i chropowatość powierzchni. Cakiroglu [107] w wyniku swoich badań ustalił optymalne parametry skrawania dla danych warunków obróbki między innymi na podstawie oceny temperatury strefy skrawania. Na podstawie przeprowadzonych testów ustalono, że najlepsze warunki skrawania, biorąc pod uwagę temperaturę w strefie skrawania, uzyskano podczas chłodzenia z użyciem MQL przy $v_c = 70$ m/min i $f = 0,075$ mm/obr. Zarejestrowana temperatura strefy skrawania podczas obróbki w środowisku MQL wynosiła 301 °C, gdzie dla porównania temperatura zarejestrowana w czasie obróbki w warunkach na sucho wynosiła 455 °C. Z wyniku przeprowadzonej analizy wariancji wynika, że największy wpływ na temperaturę w strefie skrawania mają kolejno metoda chłodzenia, a następnie prędkość skrawania. Lotfi i inni [85] również badali

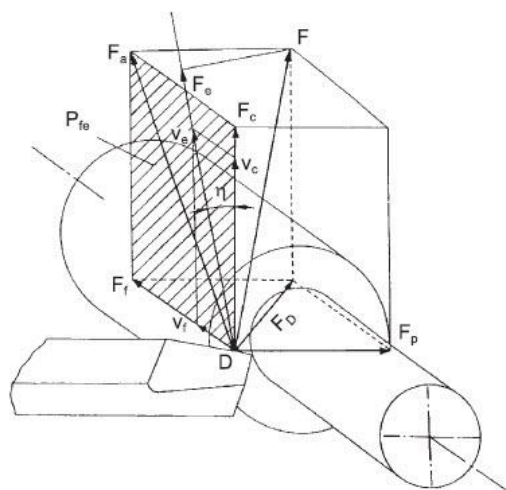
temperaturę w strefie skrawania podczas obróbki materiału Inconel 625. Przeprowadzone badania wykazały, że głębokość skrawania ma największy wpływ na wytwarzaną temperaturę i naprężenia na powierzchni skrawającej narzędzia. Jest to spowodowane tym, iż wzrost wspomnianego parametru, powoduje zwiększenie zapotrzebowania na energię potrzebną do odkształcenia plastycznego materiału podczas skrawania, która zamieniana jest w ciepło. Ponadto cechą charakterystyczną takich materiałów jak Inconel jest niska przewodność cieplna, co sprzyja wzrostowi temperatury w strefie skrawania, ponieważ niewielka ilość ciepła podczas obróbki jest absorbowana przez przedmiot obrabiany. Yin i inni [117] przedstawili nowatorską technikę poprawy skrawalności Inconelu 718 poprzez nałożenie powierzchniowo czynnego środka przewodzącego ciepło (SACM – surface active thermal conductive medium) na powierzchnię przedmiotu obrabianego przed obróbką. Autorzy wykazali, że SACM może poprawić odprowadzanie ciepła i obniżyć temperaturę skrawania. Zaleca się stosowanie trzech rodzajów SACM, w tym smaru silikonowego przewodzącego ciepło (SG), kleju (GL) i ciekłego grafenu (GR), które nakłada się na powierzchnię Inconelu 718. Wpływ SACM na poprawę obrabialności Inconelu 718 weryfikowano poprzez pomiar i analizę temperatury skrawania, chropowatości powierzchni i sił skrawania z zastosowaniem SACM i bez. Wyniki pokazują, że minimalna siła skrawania, temperatura skrawania i chropowatość powierzchni obrabianej przy użyciu GR SACM zostały zmniejszone odpowiednio o 11%, 12% i 23% w porównaniu z wynikami bez użycia SACM. Na efekt przenoszenia ciepła SACM wpływa jego przewodność cieplna. Najniższą temperaturę skrawania uzyskano dzięki wysokiej przewodności cieplnej GR. Diaz-Alvarez i inni [118] skupili się na pomiarze i predykcji temperatury podczas skrawania stopu Inconel 718. Autorzy wykazali, że dla zakresu prędkości skrawania $60 \div 180$ m/min i posuwu 0,05, 0,08 i 0,1 mm/obr wraz ze wzrostem prędkości skrawania, temperatury osiągane na nowo obrobionej powierzchni zmniejszają się przy wyższych wartościach posuwu. Przyrost posuwu prowadzi do zmniejszenia temperatury w analizowanym zakresie prawdopodobnie ze względu na dłuższy czas potrzebny do propagacji ciepła w poprzek grubości nieobrobionego wióra usuniętego w kolejnym przejściu. Dla małych wartości posuwów bliskich wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej zauważono najwyższy poziom temperatury występującej na obronionej powierzchni. Jest to spowodowane tym, że przy małych wartościach posuwu, pomimo pozytywowej geometrii ostrza efektywny kąt natarcia ma wartości negatywowe.

2.11.2 Siły skrawania występujące podczas toczenia stopu Inconel 718

W celu realizacji procesu skrawania niezbędne jest pokonanie przez narzędzie oporu, który stawia obrabiany materiał. Przeciwwstawienie się wspomnianemu oporowi, wiąże się z wywarcie w układzie narzędzie-przedmiot obrabiany odpowiednio usytuowanej i dużej siły, którą nazywa się całkowitą siłą skrawania. Na kierunek działania tej siły oraz jej wartość mają wpływ kierunki ruchów skrawania, właściwości obrabianego materiału, stereometrii ostrza narzędzia oraz rodzaju operacji technologicznej [114]. Rozkład geometryczny całkowitej siły skrawania (Rys. 2.37) w ortogonalnym układzie współrzędnych na kierunki ruchów skrawania dokonuje się według zależności:

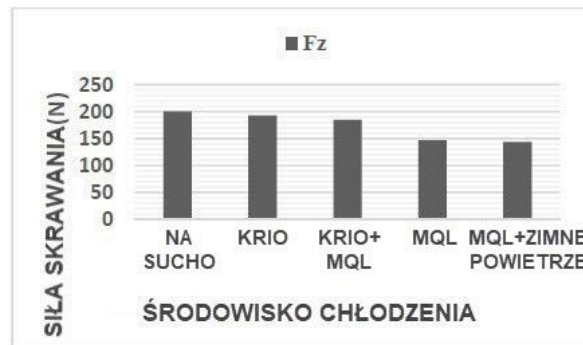
$$\bar{F} = \bar{F}_c + \bar{F}_f + \bar{F}_p \quad (2.9)$$

Gdzie: F_c – rzut siły całkowitej na kierunek ruchu głównego, F_f – rzut siły całkowitej na kierunek ruchu posuwowego, F_p – rzut całkowitej siły skrawania na kierunek prostopadły do płaszczyzny P_{fe} (siła odporowa).



Rys. 2.37. Rozkład całkowitej siły skrawania dla toczenia wzdłużnego wg PN-EN ISO 3002 [114]

Mehta i inni [5] badali wpływ środowiska obróbki między innymi na siły skrawania podczas toczenia materiału Inconel 718. Wyniki badań pokazały, że środowisko MQL zmniejsza główną siłę skrawania o 26.5%, natomiast połączenie zimnego powietrza i MQL o 28% w porównaniu z warunkami obróbki na sucho (Rys. 2.38). W przypadku składowej posuwowej i promieniowej (odporowej) siły skrawania najniższe ich wartości zarejestrowano dla środowiska obróbki MQL z zimnym powietrzem. Natomiast największe ich wartości zanotowano dla kriogenicznych warunków chłodzenia obróbki (Rys. 2.39).



Rys. 2.38. Porównanie wartości głównej siły skrawania w różnych warunkach chłodzenia [5]

Pawade i inni [81] badali wpływ geometrii krawędzi skrawającej na siły skrawania podczas toczenia nadstopu 718. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy dowiedli, że wartość głównej składowej siły skrawania była dwa, do trzech razy większa w porównaniu do pozostałych składowych. Dodatkowo wartość wszystkich trzech składowych siły była mniejsza przy większej testowanej prędkości skrawania równej 475 m/min.



a)



b)

Rys. 2.39. Porównanie wartości składowych siły skrawania w różnych warunkach chłodzenia:

a) składowa posuwowa, b) składowa promieniowa [5]

Naukowcy zwrócili również uwagę, że przygotowanie krawędzi skrawającej także wpływa na wartość sił skrawania. Ramanujam i inni [83] zbadali podejście statystyczne do optymalizacji parametrów toczenia na sucho stopu Inconel 718 w celu oceny między innymi takich parametrów wydajnościowych, jak siła skrawania. Badania dowiodły, że posuw

i głębokość skrawania są parametrami o największym znaczeniu dla sił skrawania. Arrazola i inni [48] na podstawie przeprowadzonych badań, po toczeniu stopu 718 udowodnili, że sygnał składowej odporowej siły skrawania jest najbardziej wrażliwy na zużycie narzędzia oceniane parametrem VB_B . Yilmaz i inni [116], na podstawie przeprowadzonych badań podczas toczenia materiału Inconel 718 udowodnił, że zastosowanie zewnętrznego łamacza wiórów spowodowało obniżenie sił skrawania w zakresie od 3% do 15% w stosunku do konwencjonalnej obróbki. Ponadto autorzy potwierdzili tezę Ramanujam, że głębokość skrawania jest parametrem technologicznym mającym największe znaczenie dla sił skrawania podczas toczenia konwencjonalnego tego materiału. Toubhans i inni [49] również badali wpływ zużycia ostrza na ewolucję sił skrawania. Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że składowa odporowa siły skrawania F_p jest najbardziej wrażliwa na zużycie ostrza (Rys. 2.40), co potwierdza rezultaty prac uzyskane przez Arrazola.



Rys. 2.40. Ewolucja składowych siły skrawania w czasie trwałości narzędzia przy $v_c = 70$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 0,5$ mm [49]

Deshpande i inni [106] na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że wzrost siły skrawania prowadzi do większej amplitudy drgań i dźwięku, co negatywnie wpływa na jakość wykończenia powierzchni. Podobnie, zwiększenie posuwu powoduje wzrost siły skrawania, co pogarsza jakość powierzchni. Yin i inni [117] w wyniku przeprowadzonych badań udowodnili, że siły skrawania zostały radykalnie zmniejszone dzięki obecności SACM w wyniku połączonego efektu tłumienia falistego przepływu/fałdowania wiórów i zmniejszonej energii powierzchniowej przedmiotu obrabianego, co jest typową cechą efektu mechanochemicznego. Dai i inni [119] badali wpływ perforacji krawędzi skrawającej tj. krawędzi zaokrąglonej i krawędzi fazowanej z wykorzystaniem analitycznych modeli na przewidywane i mierzone siły skrawania przy toczeniu materiału Inconel 718 z użyciem okrągłych płytek skrawających. Siły skrawania i siły krawędziowe były oszacowane za

pomocą zmodyfikowanego modelu Johnsona-Cooka, stanowiąc model uwzględniający efekty wielkości i efekty krawędzi. Wyniki badań pokazują, że siły skrawania i właściwe siły krawędziowe zmniejszają się wraz ze wzrostem UCT (ang. Uncut Chip Thickness – grubości nieodkształconego wióra). W celu określenia wpływu efektów wielkości, promienia krawędzi i fazowania, zbadano cechy sił skrawania w oparciu o opracowane modele, symulacje MES oraz wyniki skrawania. Można stwierdzić, że prognozowany model uwzględniający efekt wielkości jest bardziej niezawodny i skuteczniejszy niż model, bez uwzględniania efektu rozmiaru. Yao i inni [75] badali zmiany siły skrawania oraz opracowali empiryczne modele siły skrawania w zależności od parametrów skrawania podczas toczenia poprzecznego materiału Inconel 718 narzędziami z węglików spiekanych oraz z ceramiki. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zgodnie z modelem siły skrawania, głębokość skrawania wywierała największy wpływ na siłę skrawania, posuw miał drugorzędny wpływ, a prędkość skrawania miała najmniejszy wpływ. Podsumowując autorzy stwierdzili, że wpływ parametrów geometrycznych narzędzia na siłę skrawania nie może być zignorowany. Promień naroża narzędzia i promień zaokrąglenia krawędzi narzędzia odgrywają tutaj ważną rolę. Shailesh Rao [77] badał wpływ wielkości promienia naroża między innymi na siły skrawania podczas toczenia w warunkach na sucho materiału Inconel 718. Wyniki badań pokazują, że siła skrawania maleje wraz ze wzrostem prędkości skrawania. Dzieje się tak na skutek zmniejszania termicznego materiału roboczego i redukcję utwardzania przez zgmiot. Siła promieniowa wzrasta wraz z prędkością skrawania. Dzieje się tak głównie za sprawą wzrostu długości krawędzi skrawającej i zwiększenie siły posuwowej. Zwiększenie promienia naroża powoduje większe odkształcenia plastyczne. Wzrost efektywnej negatywnej wartości kąta natarcia, powoduje wzrost siły promieniowej. Fang i inni [76] w swojej pracy potwierdzili tezy Toubhans i Arrazola, że wraz ze wzrostem zużycia krawędzi narzędzia podczas procesu skrawania wszystkie trzy składowe siły skrawania rosną. Wraz ze wzrostem wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, wszystkie trzy składowe siły skrawania zwiększają się.

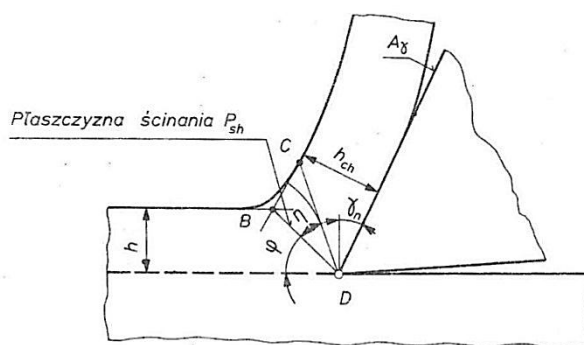
2.12. Proces tworzenia się wióra i jego rodzaje podczas toczenia stopu Inconel 718

Ostrze skrawające mające kształt klina pod wpływem siły skrawania jest wciskane w materiał powodując jego rozdzielenie. Powierzchnia natarcia ostrza narzędzia wywiera nacisk na materiał podlegający obróbce, powodując oddzielenie się warstwy skrawanej

w postaci elementów wióra. Rozdzielenie odkształconego materiału można dokonać zasadniczo dwoma różnymi sposobami:

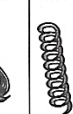
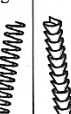
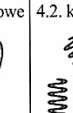
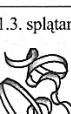
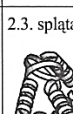
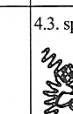
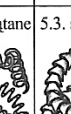
- przez naruszenie spójności materiału
- przez odkształcenie plastyczne bez naruszenia spójności materiału

Kształtowanie się wiórów może przebiegać z powodu przekroczenia wytrzymałości rozdzielczej skrawanego materiału, co powoduje powstawanie wiórów odrywanych. Jednakże, jeżeli kształtowanie wiórów zachodzi w warunkach przekroczenia granicy plastyczności na ścinanie, to powstają wówczas wióry elementowe, schodkowe lub ciągłe [35, 36, 114]. Przekształcanie warstwy skrawanej w wiór wywołuje silne odkształcenie wzdłuż linii, która wyznacza położenie płaszczyzny poślizgu (ścinania) (Rys. 2.41).



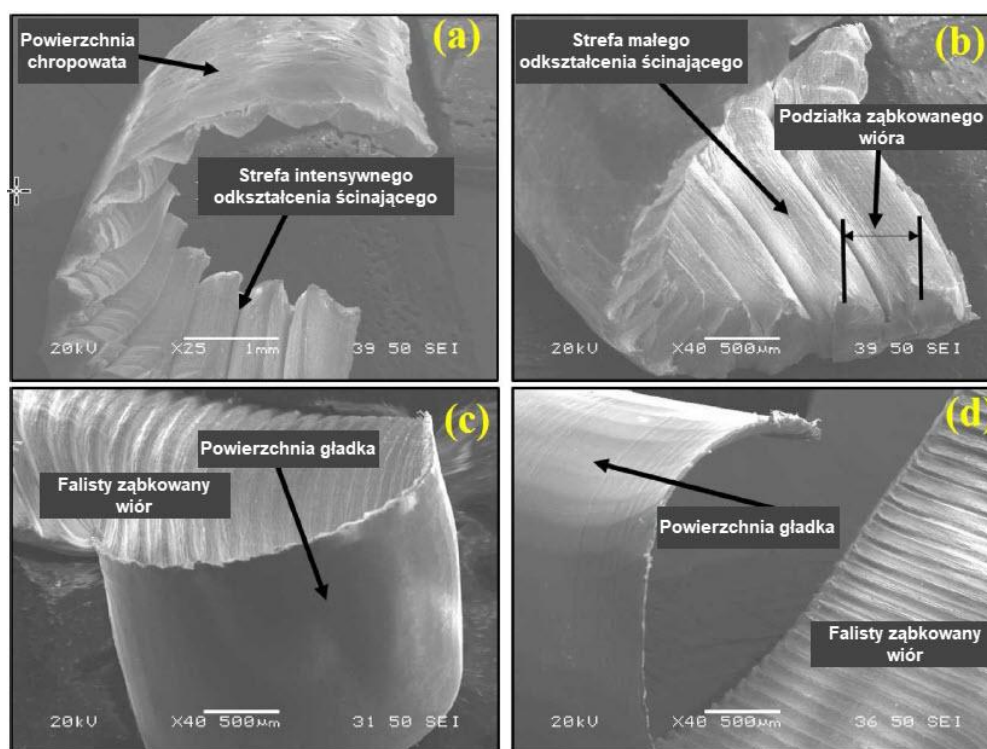
Rys. 2.41. Geometria strefy tworzenia wióra [36]

Kształt i oznaczenie wiórów sklasyfikowane jest w normie PN-ISO 3685 (Rys. 2.42).

1. Wióry wstęgowe ^{*)}	2. Wióry rurowe ^{*)}	3. Wióry spiralne	4. Wióry śrubowe otwarte ^{*)}	5. Wióry śrubowe stożkowe ^{*)}	6. Wióry łukowe ^{**)}	7. Wióry elementowe	8. Wióry igłowe
1.1. długie 	2.1. długie 	3.1. płaskie 	4.1. długie 	5.1. długie 	6.1. związane 		
1.2. krótkie 	2.2. krótkie 	3.2. stożkowe 	4.2. krótkie 	5.2. krótkie 	6.2. luźne 		
1.3. splątane 	2.3. splątane 		4.3. splątane 	5.3. splątane 			

Rys. 2.42. Klasyfikacja kształtów wióra [35]

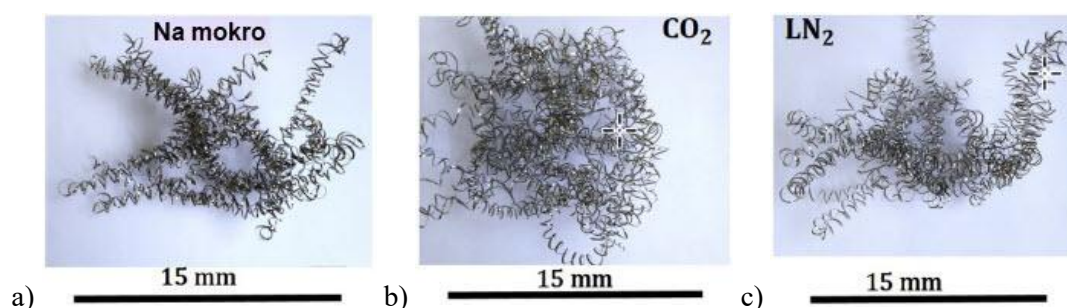
Yilmaz i inni [116] badali wpływ zewnętrznego łamacza wióra między innymi na łamanie wiórów podczas toczenia stopu Inconel 718 na sucho. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy zarejestrowali, że podczas obróbki konwencjonalnej powstawały długie splątane i rurkowate wióry. Zastosowanie zewnętrznego łamacza wióra spowodowało skuteczne łamanie długich wiórów. Na formowanie wióra największy wpływ miał zastosowany system łamacza wiórów oraz parametry skrawania. Przy małej prędkości skrawania, dużej szybkości posuwu i dużej głębokości skrawania zaobserwowano powstawanie wiórów w kształcie zębów piły o chropowatej powierzchni. Kształtowanie wiórów zmieniło się z szorstkiego typu zębów piły na gładki, falisty typ zębów piły o lepszej powierzchni wraz ze wzrostem prędkości skrawania (Rys. 2.43).



Rys. 2.43. Mikroskopowe obrazy SEM złamanych wiórów powstałych podczas obróbki wspomaganej zewnętrznym łamaczem wiórów przy: a, b) $v_c = 25$ m/min, $f = 0,22$ mm/rev, $a_p = 1,7$ mm, c, d) $v_c = 70$ m/min, $f = 0,13$ mm/rev, $a_p = 1,3$ mm [116]

Szablewski i inni [105] na podstawie przeprowadzonych badań dowiedli, że odprowadzenie wiórów ze strefy skrawania jest bardzo istotne, szczególnie podczas obróbki powierzchni wewnętrznych. Inconel 718 jest materiałem, podczas obróbki którego złamanie wiórów jest znacznie utrudnione. Powoduje to w konsekwencji ich kłębianie a przez to zakłócenie dostarczenia cieczy chłodziwo-smarującej do strefy skrawania. Chaabani i inni [87] podczas przeprowadzonych testów, które dotyczyły wpływu różnych warunków chłodzenia

kriogenicznego w odniesieniu do konwencjonalnego sposobu chłodzenia na zużycie ostrza i chropowatość powierzchni, zbadali także morfologię wiórów. Autorzy wykazali, że nie ma znaczących różnic w morfologii wiórów uzyskanej dla wszystkich warunków chłodzenia (Rys. 2.44). Rybicki i Szablewski [120] badali morfologię wiórów po toczeniu materiałów



Rys. 2.44. Morfologia wióra otrzymana przy zastosowaniu trzech strategii chłodzenia:

a) na mokro, b) z CO_2 , c) z LN_2 [87]

stosowanych w przemyśle lotniczym. Autorzy skupili się na ocenie kształtu zadziorów wiórów na podstawie ich wysokości oraz podziału. Na podstawie przeprowadzonych testów stwierdzono, że duże zadziory zwykle powstają przy mniejszych wartościach posuwu f oraz większych promieniach naroża r_e , ze względu na niestabilność formowania wióra w obszarach, gdzie grubość skrawania jest mniejsza niż minimalna. Z kolei pojawianie się małych zadziorów jest zazwyczaj związane z segmentacją wióra, gdy odległość między zadziorami jest równa odległości między segmentami wióra. Autorzy stwierdzili także, że Waspaloy i Inconel 718 charakteryzowały się największymi zadziorami, które występują niezależnie od wartości posuwu i promienia naroża. Khanna i inni [92] badali między innymi morfologię wiórów oraz jej zależność od zużycia ostrza i środowiska obróbki. Autorzy stwierdzili, że w przypadku toczenia na sucho stopu Inconel 718 zaobserwowano powstawanie wiórów ząbkowanych w wyniku lokalnego formowania się pasm ścinania adiabatycznego, spowodowanego zmiękczeniem cieplnym przy wysokiej temperaturze. Może to być związane z intensywnym zużyciem kraterowym obserwowanym podczas toczenia na sucho. Podczas obróbki na mokro ząbkowanie wiórów ulega znacznemu zmniejszeniu. Wióry powstałe podczas toczenia z chłodzeniem konwencjonalnym oraz w warunkach kriogenicznych były jednolite, stabilne, długie i luźno zwinięte. Naukowcy zwracają uwagę, że może to wynikać z intensywnego efektu chłodzenia w strefie skrawania. Cantero i inni [63] zwrócili uwagę, iż zużycie ostrza w postaci nacięcia prowadzi (przy określonych warunkach skrawania) do formowania gratu na obrabianym przedmiocie. W kolejnych przejściach grat ten jest eliminowany przez odłupywanie, co skutkuje

powstaniem wtórnego wióra. Chociaż wtórny wiór jest mniejszy niż wiór główny, może on w nieoczekiwany sposób uszkodzić narzędzie. Wtórny wiór dostarcza informacji na temat stanu zużycia narzędzia. Nie pojawia się on wówczas gdy narzędzie jest nowe.

2.13. Drgania w procesie skrawania oraz charakterystyka i zastosowanie oprawek narzędziowych wyposażonych w tłumik drgań

2.13.1 Drgania w procesie skrawania

Drgania układu OUPN w procesie skrawania to niezamierzone przemieszczenia względne jego elementów składowych, wywołane wzajemnymi przemieszczeniami pochodzącymi od sił i kinematyki skrawania. Z reguły są zjawiskiem niepożądanym [35, 51, 114]. Biorąc pod uwagę źródło wymuszenia drgania dzielimy na:

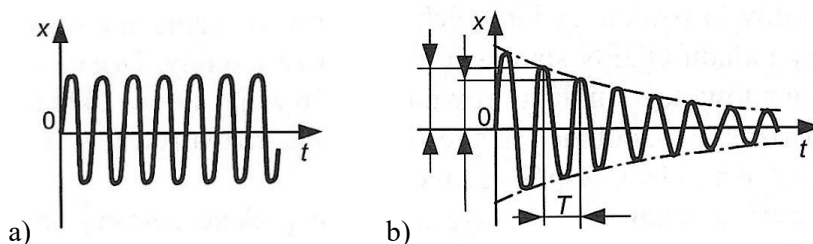
- swobodne (własne),
- wymuszone,
- samowzbudne.

Drgania swobodne wywołane są wówczas gdy na układ nie działa żadna siła wymuszająca. Zazwyczaj są spowodowane impulsem zewnętrznym, np. uderzeniem, wcięciem ostrza w materiał, zmianą warunków skrawania. W przypadku tego rodzaju drgań równanie ruchu układu drgającego ma postać [35, 114]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.0)$$

gdzie: m – masa [kg], c – stała tłumienia [N·s/m], k – stała sztywności [N/m], $\ddot{x}$ – przyspieszenie [m/s^2], $\dot{x}$ – prędkość [m/s], x – przemieszczenie [m].

Ten rodzaj drgań może wystąpić jako drgania tłumione, bądź nietłumione. Drgania tłumione charakteryzują się amplitudą, której wartość maleje w czasie. Natomiast drgania nietłumione to takie, których amplituda ma stałą wartość w funkcji czasu (Rys. 2.45).



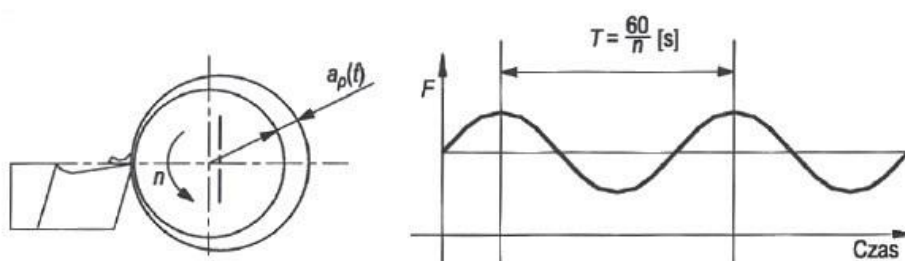
Rys. 2.45. Przykłady drgań swobodnych: a) nietłumionych, b) tłumionych [35]

Drgania wymuszone powstają wówczas kiedy na układ działa zmienne w czasie obciążenie wymuszające. Źródłem tego rodzaju drgań mogą być: niewyważenie elementów wirujących, nierównomierny rozkład naddatku na obróbkę, przerywany tryb pracy narzędzia. Równanie ruchu układu drgającego ma wtedy postać [35, 114]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_w \cos \omega t \quad (3.1)$$

gdzie: F_w – amplituda siły wymuszającej [N], ω – częstość siły wymuszającej [s^{-1}], t – czas [s].

Rysunek 2.46 prezentuje zmienność w czasie siły skrawania podczas toczenia.



Rys. 2.46. Wymuszenie drgań przez okresową zmianę siły skrawania podczas toczenia [114]

Należy zaznaczyć, że w przypadku tego rodzaju drgań istnieje możliwość powstania niekorzystnego zjawiska jakim jest rezonans. Jest to wzrost amplitudy drgań w pobliżu częstości drgań własnych.

Drgania samowzbudne to rodzaj drgań, które zachodzą przy braku oddziaływania na układ zewnętrznych sił o zmiennym charakterze. Ten rodzaj drgań jest wynikiem utraty stabilności przez układ OUPN. Strata wspomnianej stabilności jest najczęściej wynikiem:

- sprzężenia wewnętrznego w dynamicznym układzie OUPN i pomiędzy parametrami ruchów roboczych
- sprzężenia przez obróbkę po śladzie lub regenerację śladu

Na skutek sprzężeń wewnętrznych wierzchołek narzędzia wykonuje ruch względem przedmiotu obrabianego po torze zamkniętym. Od kierunku tego ruchu zależy czy wypadkowa praca skrawania będzie miał wartość dodatnią czy ujemną. Dodatnia wartość pracy skrawania sprzyja powstawaniu i podtrzymywaniu drgań samowzbudnych.

Drgania wywołane sprzężeniem przez obróbkę po śladzie, mogą powodować chwilowe przemieszczenie narzędzia, co wywołuje zmianę grubości warstwy skrawanej w czasie.

Konsekwencją takich anomalii jest powstająca na powierzchni obrabianej fala. Podczas następnego przejścia warstwa skrawana ma już zmienny przekrój co wywołuje fluktuację sił skrawania i może doprowadzić do powstania drgań [35, 114].

2.13.2 Charakterystyka i zastosowanie oprawek narzędziowych wyposażonych w tłumik drgań

W celu zwiększenia sztywności dynamicznej i ograniczenia drgań długich narzędzi skrawających a przez to uzyskanie stabilności przy większym wysięgu stosuje się różne techniki. Zaliczają się do nich:

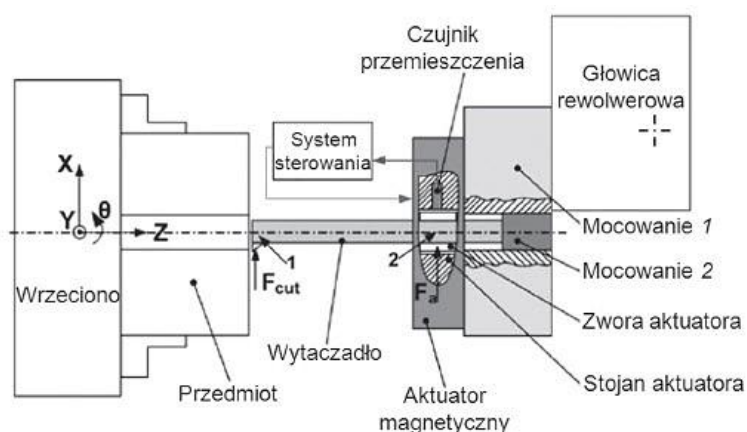
- Zastosowanie trzpieni anizotropowych z celowo oznaczonymi osiami sztywności w stosunku do kierunków działania sił składowych.
- Zastosowanie materiałów charakteryzujących się dużym modułem Young'a i dobrym tłumieniem takich jak węgliki spiekane.
- Użycie biernych absorberów dynamicznych z masami bezwładnościowymi, które nazywane są również trzpieniami ze wstępnym dostrajaniem (ang. passive dynamic vibration absorber, PDVA). Wewnątrz trzpienia wytaczadła znajdują się: masa tłumiąca *A*, wkładki gumowe *B*, oraz oleista ciecz *C* (Rys. 2.47).



Rys. 2.47. Trzpień wytaczadła z tłumikiem drgań konstrukcji firmy TEENESS (grupa SANDVIK) [35]

1. Użycie aktywnego sterowania drganiami za pomocą aktywnych tłumików drgań. W przypadku takiego rozwiązania potrzebne są czujniki drgań i elementy wykonawcze nazywane aktuatorami. Są to urządzenia, które

generują siły w kierunku przeciwnym do ugięcia narzędzia podczas wzbudzania drgań. Sygnał wyjściowy generatora w postaci siły jest przesunięty w fazie względem siły wymuszającej, co powoduje minimalizowanie drgań masy układu (Rys. 2.48) [35, 114].



Rys. 2.48. Przykład aktywnego tłumienia drgań samowzbudnych w trzpieniu wytaczadła z zastosowaniem bezkontaktowego aktuatora magnetycznego [114]

W przypadku biernych tłumików drgań inne rozwiązanie prezentuje firma Kennametal poprzez swój system Tuned Tooling TTS. Trzonek posiada wbudowaną specjalną wkładkę tłumiącą, która jest sterowana komputerowo. Po uderzeniu specjalnym młotkiem w narzędzie wywoływana jest fala drgająca. Zestaw czujników dokonuje pomiaru powstałych drgań a mechanizm nastawczy automatycznie przemieszcza masę tłumiącą tak, aby możliwie najskuteczniej wytłumić drgania [35, 114]. Ponadto producenci obrabiarek numerycznych przeznaczonych do obróbki wyposażają je w czujniki i systemy, które wykrywając drgania dostarczają sygnał do sterownika PLC. Po otrzymanych sygnałach PLC obrabiarki zaczyna zmieniać prędkość obrotową wrzeciona celem wytłumienia drgań. Przykładowymi oprogramowaniami są Machining Navi firmy Okuma, oraz iControl Advanced firmy WFL Millturn.

2.14. Podsumowanie analizy literatury i wnioski do badań

Aktualny stan wiedzy dotyczący obszaru konwencjonalnego skrawania stopu Inconel 718 można podsumować w sposób następujący:

1. Znane są możliwości i ograniczenia materiałów narzędziowych w kontekście zastosowania ich do konwencjonalnej obróbki stopu Inconel 718.
2. Rozwój materiałów narzędziowych zapewnił kontynuację dominacji płytek wieloostrzowych z węglików spiekanych, ceramiki narzędziowej oraz azotku boru w zakresie toczenia superstopów.
3. Nowe gatunki ceramiki w postaci kompozytów ceramicznych oraz materiałów odpowiadających azotkowi boru z serii Bidemic, umożliwiają zastosowanie większych prędkości skrawania w porównaniu z materiałami narzędziowymi starszej generacji takimi jak ceramika na bazie tlenku glinu [37, 63, 65].
4. Nowe gatunki powłok CVD np. $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$, oraz powłok PVD typu AlTiN pozwalają znacznie zwiększyć trwałość ostrzy z węglików spiekanych w porównaniu ze starszym rodzajem powłok typu TiAlN . Powłoki te pozwalają także na pracę z większymi prędkościami skrawania w porównaniu do starszych powłok TiN , czy TiAlN [41, 97].
5. Na chropowatość i topografię powierzchni obrobionej stopu 718 w przypadku początkowego etapu obróbki mają wpływ geometria i mikrogeometria ostrza, a także technologiczne parametry skrawania. Mikrogeometria ostrza jest uzależniona od rodzaju nanoszonej powłoki. Wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n ma znaczenie dla uzyskanej chropowatości powierzchni ponieważ wpływa ona na minimalną grubość warstwy skrawanej [77, 78, 79, 80]. W przypadku wpływu parametrów skrawania na chropowatość powierzchni największą rolę odgrywa posuw f , następnie prędkość skrawania v_c , natomiast najmniejszy wpływ przypisany jest głębokości skrawania a_p [59, 81, 83, 102, 103].
6. Biorąc pod uwagę dłuższy czas pracy narzędzia największy wpływ na chropowatość i topografię powierzchni ma wielkość i charakter zużycia ostrza. W przypadku małej wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej dłuższa praca narzędzia doprowadza do powstawania w przyspieszonym tempie mikrowykruszeń krawędzi skrawającej [78]. Wzrost zużycia powierzchni przyłożenia pogarsza jakość powierzchni, powodując wzrost jej chropowatości [48].

7. Środowisko obróbki ma wpływa na zużycie ostrza i jakość powierzchni. Niewątpliwie największe wartości zużycia narzędzia zarejestrowano podczas obróbki na sucho. Jest to spowodowane wzmożoną tendencją do tworzenia narostu, a także wzrostem temperatury w strefie skrawania [5, 83]. Najmniejsze zużycie ostrza zarejestrowano w warunkach z zastosowaniem cieczy chłodząco-smarującej oraz z aplikacją MQL [5, 87, 92].
8. Zużycie ostrza podczas toczenia wykończeniowego stopu Inconel 718 w największym stopniu zależy od rodzaju zastosowanej powłoki przeciwzużyciowej oraz technologicznych parametrów skrawania, z których prędkość skrawania v_c ma największe znaczenie [66, 67, 91, 94, 95, 97, 98].
9. Wpływ wartości ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej na zużycie ostrza podczas skrawania stopu 718 jest w dużej mierze zależny od rodzaju przeprowadzanej obróbki. W przypadku obróbki wykończeniowej nie zauważa się znacznej poprawy trwałości ostrza przy zastosowaniu wysokiego ciśnienia CCS. Natomiast doprowadzenie cieczy chłodząco-smarującej pod wysokim ciśnieniem podczas obróbki zgrubnej zwiększyło trwałość narzędzia, gdyż spowodowało lepszy jej dostęp do strefy skrawania oraz poprawiło fragmentację wióra [47, 84].

3. CEL I TEZY BADAWCZE PRACY

Nowoczesnym konstrukcjom silników lotniczych stawiane są wysokie wymagania dotyczące osiągnięć, przy jednoczesnym obniżeniu zużycia paliwa i emisji szkodliwych tlenków do otoczenia oraz ograniczeniu poziomu hałasu generowanego podczas lotu. Takie oczekiwania mają bezpośredni wpływ na sposób projektowania poszczególnych części w silniku. Oczywiście jednym z podstawowych wymagań dotyczących konstrukcji komponentu silnika lotniczego poza spełnieniem warunków wytrzymałościowych jest jego waga. Kryterium to determinuje jego cienkościenny kształt. Jeżeli do powyższych wymagań dołączymy jeszcze warunek konieczności pracy danej części w gorącej sekcji silnika, to wymusza zastosowania do jej produkcji stopów żaroodpornych.

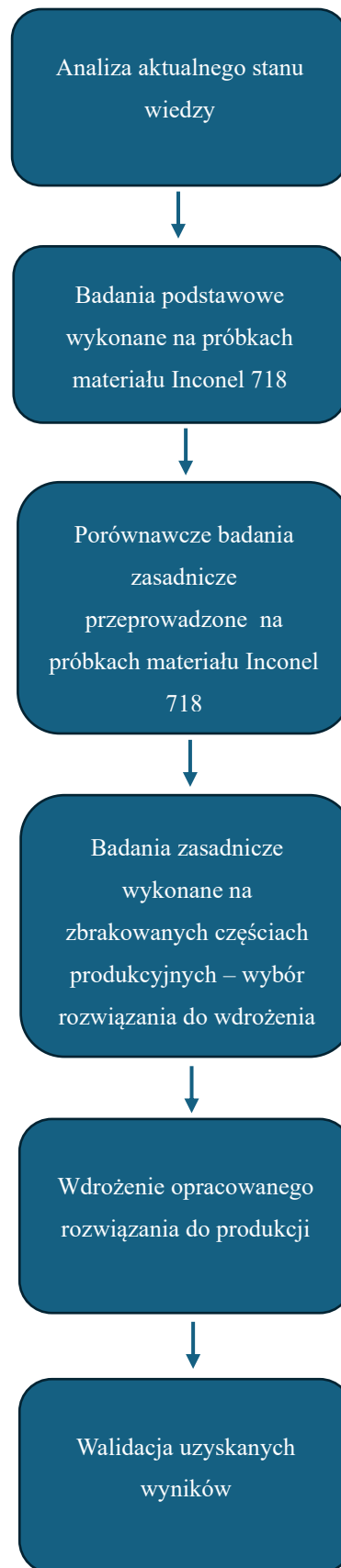
Tak zaprojektowane komponenty nastroczają wiele problemów pod względem technologicznym. Wdrożenie do produkcji takiego detalu, biorąc pod uwagę projektowanie procesu technologicznego, strategię obróbki i doboru narzędzi skrawających w firmach zajmujących się produkcją komponentów przeznaczonych do silników lotniczych trwają niejednokrotnie kilka lat.

Dodatkowymi wymaganiami charakteryzują się części krytyczne, których procesy technologiczne muszą zostać zatwierdzone i nie mogą ulegać zmianie w trakcie produkcji.

Celem badawczym pracy jest opracowanie rozwiązania technologicznego dla operacji toczenia wykończeniowego wewnętrznej powierzchni części cienkościennych o dużej smukłości wykonywanych z materiału Inconel 718, które wymagają użycia narzędzia o długim wysięgu i niestandardowo dużej trwałości ostrza. Przygotowana koncepcja pozwoli na powtarzalną produkcję takich komponentów zgodnie z wymaganiami wymiarowo – kształtowymi, chropowatości powierzchni oraz mikrostruktury warstwy wierzchniej obrobionej powierzchni.

Celem wdrożeniowym niniejszej pracy jest optymalizacja fragmentu procesu technologicznego części krytycznej, którą jest cienkościenny wał główny silnika lotniczego produkowany według zastrzonych wymagań.

Na rysunku 3.1 przedstawiono ogólny schemat realizacji badań oraz wdrożenia opracowanego rozwiązania.



Rys. 3.1. Schemat realizacji badań oraz wdrożenia opracowanego rozwiązania do produkcji

Przeprowadzona analiza literatury krajowej i światowej pozwala stwierdzić, że brakuje informacji na temat toczenia wykończeniowego stopu Inconel 718 narzędziami o długim zasięgu wyposażonymi w tłumik drgań. Ograniczone są także wiadomości na temat wpływu tego typu narzędzi na zużycie ostrza, oraz otrzymywaną chropowatość powierzchni obrobionej podczas toczenia wykończeniowego wspomnianego materiału.

Rozpoznanie problemu naukowego, przeprowadzone na podstawie studium literatury, pozwala uzasadnić celowość podjęcia badań mających charakter poznawczy i użytkowy.

Główne tezy rozprawy:

- 1. Wpływ zmiany mikrogeometrii ostrza skrawającego w funkcji czasu skrawania na dokładność wymiarową jest zależny od rodzaju zastosowanej oprawki narzędziowej.**
- 2. Wzrost ciśnienia roboczego cieczy chłodząco – smarującej powyżej 50 bar wpływa negatywnie na mikrostrukturę obrabianego materiału stopu Inconel 718.**

4. ZAKRES I WARUNKI PRZEPROWADZANYCH BADAŃ

4.1. Stanowisko badawcze

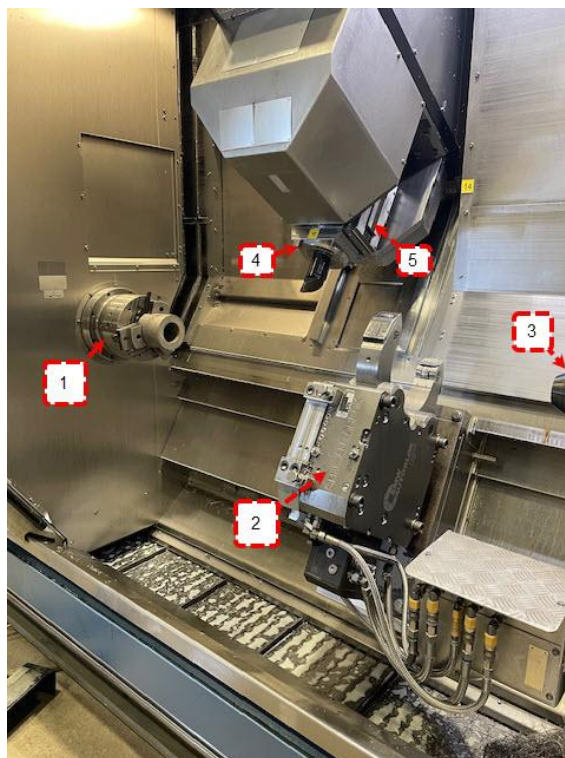
Badania toczenia przeprowadzono na poziomym centrum tokarsko-frezarskim M40 firmy WFL Millturn (Rys. 4.1). Jest to pięcio-osiowe centrum wielozadaniowe o przestrzeni roboczej 3000 mm przeznaczone do obróbki komponentów o dużej smukłości typu wały. Stanowisko to oprócz uchwytu hydraulicznego (1) wyposażone jest w podtrzymkę (2) oraz konik (3), służące do podparcia części podczas obróbki (Rys. 4.2).



Rys. 4.1. Stanowisko przeznaczone do badań – centrum wielozadaniowe M40 firmy WFL Millturn:

- 1 – przestrzeń robocza, 2 – magazyn długich narzędzi zamocowanych w adaptery pryzmatyczne,
- 3 – magazyn standardowych narzędzi

Głowica narzędziowa (4) obrabiarki wyposażona jest w gniazdo z chwytem Capto C6. Obrabiarka posiada możliwość pracy w zarówno w trybie toczenia jak i frezowania. W momencie rozpoczęcia pracy w trybie tokarskim gniazdo głowicy zostaje zablokowane. Ponadto obrabiarka posiada możliwość indeksowania narzędzi tokarskich w dwóch pozycjach kątowych 0° i 180° . Po przejściu do trybu frezowania gniazdo narzędziowe zostaje odblokowane, umożliwiając załączenie prędkości obrotowej wrzeciona narzędziowego. Z prawej strony głowicy narzędziowej, będącej w pozycji pionowej wykonane są prowadnice trapezowe (5) w kształcie jaskółczego ogona. Ich zadaniem jest ustalenie i zamocowanie adaptera pryzmatycznego służącego do osadzania długich narzędzi, przeznaczonych do obróbki powierzchni wewnętrznych (wytaczadeł, pogłębiaczy, wiertel do głębokiego wiercenia). Adapter pryzmatyczny jest autorskim rozwiązaniem konstrukcyjnym firmy WFL Millturn, przeznaczonym do osadzania w nim narzędzi o długim wysięgu dedykowanych do obróbki powierzchni wewnętrznych (Rys. 2.51).



Rys. 4.2. Przestrzeń robocza obrabiarki M40 firmy WFL Millturn: 1 – uchwyt tokarski hydrauliczny, 2 – podtrzymka hydrauliczna, 3 – konik, 4 – głowica narzędziowa, 5 – prowadnice trapezowe (jaskółczy ogon)

Ponieważ dolna powierzchnia adaptera jest wzdłużnie przecięta, więc pozwala mocować trzonki narzędzi przeznaczonych do obróbki otworów np. wytaczaków bezpośrednio w adapterze lub poprzez tuleję redukcyjną dociskaną przy pomocy śrub na zasadzie rozprężnej tulei zaciskowej (Rys. 4.3). Adapter podczepiony jest w czasie pracy pod głowicą przy pomocy prowadnic trapezowych. Dodatkowo połączony jest on od przodu z kołnierzem, do którego jest przymocowane gniazdo ze złączem Capto C6, które w czasie pracy jest także zaciśnięte w głowicy narzędziowej w celu usztywnienia całego zestawu narzędziowego. Poprzez złącze Capto i dalej wewnętrznymi kanałami w adapterze, a później wewnątrz trzonka wytaczaka, transportowana jest ciecz chłodząco-smarująca bezpośrednio na ostrze skrawające. Obrabiarka M40 wyposażona jest także w system doprowadzania cieczy chłodząco-smarującej do strefy skrawania pod wysokim ciśnieniem. Maksymalna wartość ciśnienia możliwa do uzyskania wynosi 150 bar. Wysięg trzonka wytaczaka z tłumikiem drgań wynosi 700 mm.



Rys. 4.3. Zestaw narzędziowy przeznaczony do obróbki powierzchni wewnętrznych, podczepiony pod głowicą narzędziową: 1 – adapter pryzmatyczny, 2 – trzonek wytaczaka z tłumikiem drgań, 3 – głowiczka narzędziowa ze złączem SL

4.2. Materiały obrabiane przeznaczone do badań

Badania przeprowadzono na próbkach stopu Inconel 718 (DIN 2.4668, AMS 5662), oraz w ostatniej fazie na częściach brakowych. Skład chemiczny materiału przedstawiono w tabeli 4.1. Próbki materiału zostały odcięte od półfabrykatów powierzonych przez firmę PWA, przeznaczonych do produkcji części, których proces technologiczny podlega optymalizacji na podstawie niniejszych badań.

Tabela 4.1. Skład chemiczny stopu Inconel 718 [6].

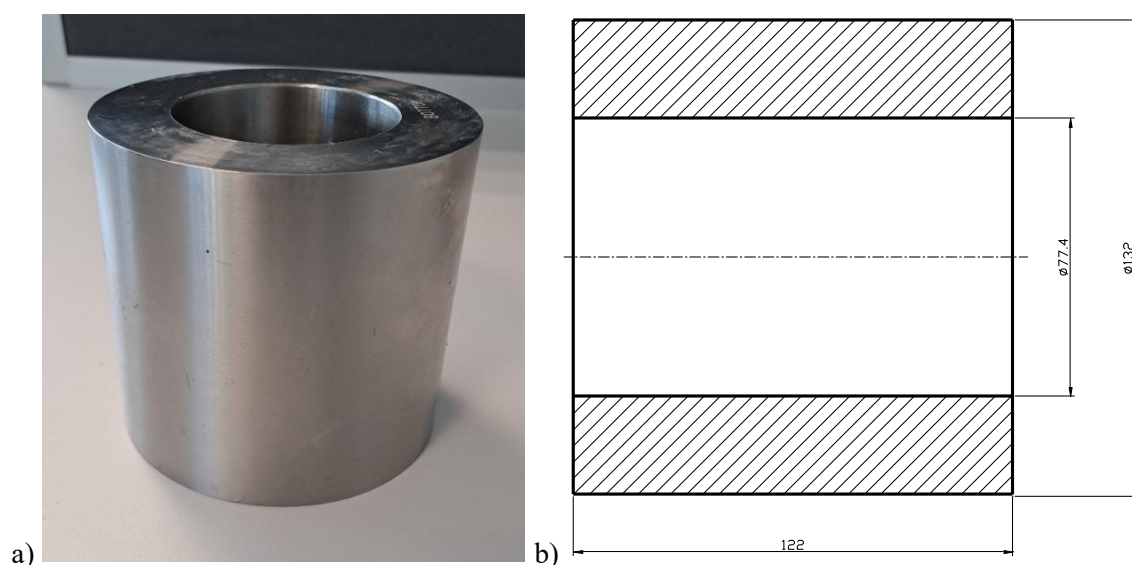
Stop	Skład chemiczny (%)									
	Al	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Ti	Nb	Ni
Inconel 718	0,52	0,021	0,11	19,06	0,02	18,15	3,04	0,93	5,08	53

Materiał, z którego zostały wykonane próbki do badań, oraz z którego są produkowane części jest dostarczany w formie tulei cylindrycznej. Półfabrykat został poddany obróbce cieplej, której warunki przedstawiono w tabeli 4.2. Wynikiem tak przeprowadzonego procesu było uzyskanie twardości 45 ± 2 HRC.

Tabela 4.2. Warunki przeprowadzonej obróbki cieplnej stopu 718 dla materiałów zastosowanych w badaniach [17].

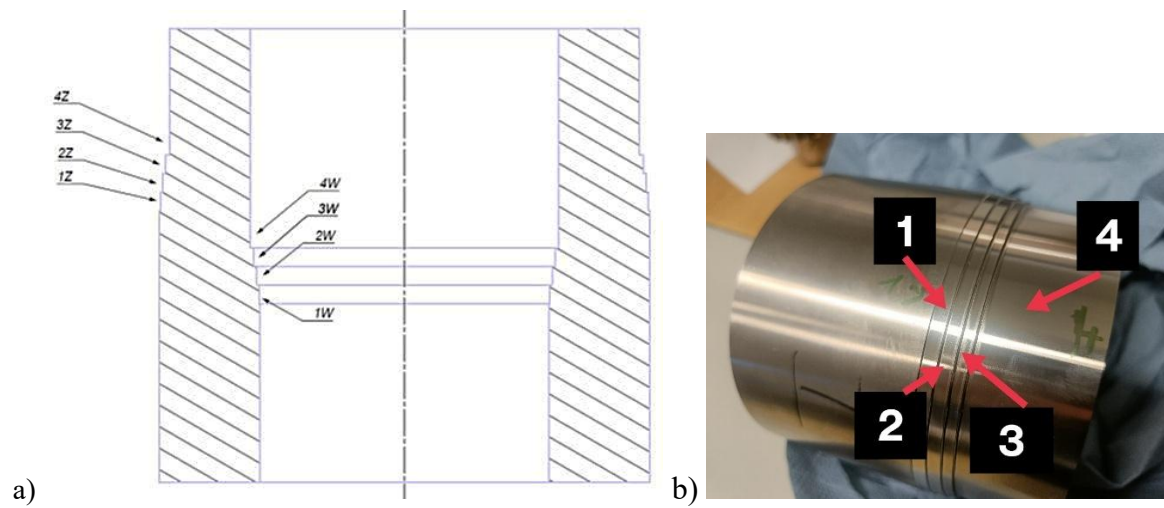
Proces obróbki cieplnej	Czas [h]	Temperatura [°C]
Przesycanie	1	954
Starzenie (utrzymanie we wskazanej temperaturze)	8	718
Starzenie (chłodzenie do wskazanej temperatury)	2,5	621
Starzenie (utrzymanie we wskazanej temperaturze)	8	621

Badania podstawowe oraz pierwsza część badań zasadniczych została przeprowadzona na próbkach, które charakteryzowały się wymiarami; długość równa 122 mm, średnica zewnętrzna równa 132 mm, oraz średnica wewnętrzna równa 77.4 mm (Rys. 4.4 i Rys. 4.5).



Rys. 4.4. Próbką przeznaczona do badań; a) widok próbki, b) rysunek próbki

Natomiast druga część badań zasadniczych prowadzona była na częściach brakowych w celu utworzenia warunków w pełni odpowiadających warunkom produkcyjnym. Uproszczony kształt części przedstawiono na rysunku 4.6.



Rys. 4.5. Rysunek (a) i widok (b) próbki po wykonanych testach (1Z – pierwsza powierzchnia badana zewnętrzna, 1W – pierwsza powierzchnia badana wewnętrzna)

4.3. Narzędzia, materiały narzędziowe, parametry skrawania oraz geometria ostrzy stosowanych w badaniach

W badaniach zastosowano płytki skrawające o kształcie V z węglików spiekanych, które zestawiono w tabeli 4.3. Wybór rodzaju płytek podyktowany był wymogiem kształtem wykonywanego otworu na części, który rozpoczyna się podcięciem. W badaniach zastosowano wyłącznie płytki wykonane z węglików spiekanych, ponieważ wcześniej do obróbki otworu komponentu, który jest przedmiotem badań stosowano płytki z regularnego azotku boru. Niestety narzędzia te losowo ulegały pęknięciom. Wybór tego typu narzędzi spowodowany był także obniżeniem oporów skrawania, ponieważ obróbka przebiega na długim wysięgu. Do mocowania płytek skrawających stosowano oprawkę przeznaczoną do toczenia powierzchni zewnętrznych typu Capto o cesze C6–SVHBL–45065–16HPA, oraz oprawkę antywibracyjną firmy Sandvik z serii Silent Tool do toczenia powierzchni wewnętrznych o cesze S–570–3C–70/80–1053–40CR. Oprawka antywibracyjna połączona była z główką do mocowania płytek skrawających o cesze SL–SVLBL–40–16HP.

Parametry skrawania zostały dobrane na podstawie wcześniejszych testów, które skupiały się wokół zużycia ostrza oraz uzyskiwanej dokładności wymiarowej, a także chropowatości powierzchni. Duże znaczenie odgrywała także wymagana trwałość narzędzia. Na etapie badań wstępnych oraz pierwszej części badań zasadniczych zastosowano następujące parametry skrawania; prędkość skrawania $v_c = 85$ m/min, posuw $f = 0,14$ mm/obr i głębokość skrawania $a_p = 0,2$ mm. Natomiast w drugiej części badań zasadniczych zastosowano dwa zakresy parametrów skrawania:

1. Prędkość skrawania $v_c = 85$ m/min, posuw $f = 0,14$ mm/obr i głębokość skrawania $a_p = 0,2$ mm.
2. Prędkość skrawania $v_c = 85$ m/min, posuw $f = 0,10$ mm/obr i głębokość skrawania $a_p = 0,2$ mm.

Tabela 4.3. Wykaz płytek skrawających zastosowanych w badaniach.

Lp	Oznaczenie	Producent	Rodzaj powłoki	Kąt przyłożenia α [°]	Promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej, r_n [μm]
1	VBGT 160408–UM S205	Sandvik	CVD (TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN)	5	35,127
2	VCGT 160408–MM4 WSM01	Walter	PVD (TiAlN)	7	12,44
3	VBGT 160408LF KCS10B	Kennametal	PVD (AlTiN)	5	29,944
4	VBMT 160408–LS MP9005	Mitsubishi	PVD ((Al, Ti)N)	5	27,045
5	VCMT 160408–SM IC804	Iscar	PVD (AlTiN)	7	52,865
6	VBGT 160408–UM S05F	Sandvik	CVD (TiCrN+Al ₂ O ₃ +TiN)	5	33,822
7	VBGT 160408–UM 1105	Sandvik	PVD (TiAlN)	5	19,029
8	VBGT 160408–UM 1115	Sandvik	PVD (TiAlN+TiAlN)	5	7,805

4.4. Warunki przeprowadzanych badań

Dane dotyczące warunków przeprowadzanych badań na poszczególnych etapach zawarto w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Warunki przeprowadzanych badań.

Badania podstawowe	
Oceniane czynniki	Warunki badań
• objawy zużycia ostrzy • chropowatość i topografia powierzchni • dokładność uzyskanych wymiarów • mikrostruktura warstwy wierzchniej	<u>Stanowisko:</u> Wielozadaniowe centrum tokarsko-frezarskie M40 <u>Materiał:</u> Inconel 718 – próbka <u>Parametry skrawania:</u> $v_c = 85$ m/min, $f = 0,14$ mm/obr, $a_p = 0,2$ mm <u>Płytki skrawające:</u> VBGT 160408-UM S205 VBGT 160408-UM S05F

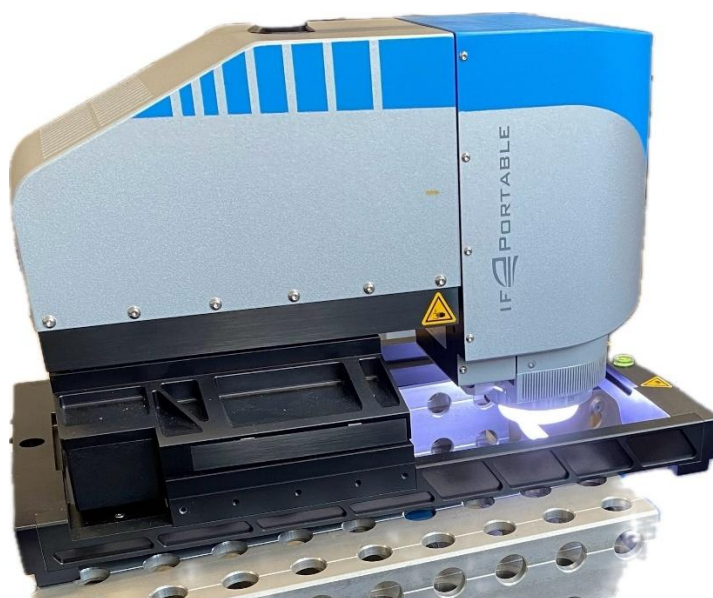
	VBGT 160408-UM 1105 VBGT 160408-UM 1115 <u>Oprawka:</u> C6-SVHBL-45065-16HPA <u>Ciecz chłodząco-smarująca:</u> Ecocool Global 10 – 8% koncentrat emulsji na bazie oleju mineralnego i 92% wody. Ciśnienie 80 bar
Badania zasadnicze	
Oceniane czynniki	Warunki badań
• objawy zużycia ostrzy • chropowatość i topografia powierzchni • dokładność uzyskanych wymiarów • mikrostruktura warstwy wierzchniej	<u>Stanowisko:</u> Wielozadaniowe centrum tokarsko-frezarskie M40 <u>Materiał:</u> Inconel 718 – próbka oraz część produkcyjna <u>Parametry skrawania:</u> $v_c = 85 \text{ m/min}$, $f = 0,14 \text{ mm/obr}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$ <u>Płytki skrawające:</u> VBGT 160408-UM S205 VCGT 160408-MM4 WSM01 VBGT 160408LF KCS10B VBMT 160408-LS MP9005 VCMT 160408-SM IC804 <u>Oprawka:</u> C6-SVHBL-45065-16HPA S-570-3C-70/80-1053-40CR + SL-SVLBL-40-16HP <u>Ciecz chłodząco-smarująca:</u> Ecocool Global 10 – 8% koncentrat emulsji na bazie oleju mineralnego i 92% wody. Ciśnienie 80 bar
• objawy zużycia ostrzy • chropowatość powierzchni • dokładność uzyskanych wymiarów	<u>Stanowisko:</u> Wielozadaniowe centrum tokarsko-frezarskie M40 <u>Materiał:</u> Inconel 718 – część produkcyjna <u>Parametry skrawania:</u>

	$v_c = 85 \text{ m/min}, f = 0,1 \text{ mm/obr}, a_p = 0,2 \text{ mm}$ <u>Płytki skrawające:</u> VBGT 160408LF KCS10B <u>Oprawka:</u> S-570-3C-70/80-1053-40CR + SL-SVLBL-40-16HP <u>Ciecz chłodząco-smarująca:</u> Ecocool Global 10 – 8% koncentrat emulsji na bazie oleju mineralnego i 92% wody. Ciśnienie 80 bar
• mikrostruktura warstwy wierzchniej	<u>Stanowisko:</u> Wielozadaniowe centrum tokarsko-frezarskie M40 <u>Materiał:</u> Inconel 718 - próbka <u>Parametry skrawania:</u> $v_c = 85 \text{ m/min}, f = 0,14 \text{ mm/obr}, a_p = 0,2 \text{ mm}$ <u>Płytki skrawające:</u> VBGT 160408LF KCS10B <u>Oprawka:</u> C6-SVHBL-45065-16HPA <u>Ciecz chłodząco-smarująca:</u> Ecocool Global 10 – 8% koncentrat emulsji na bazie oleju mineralnego i 92% wody. Ciśnienie 80 bar i 10 bar

5. METODYKA BADAŃ

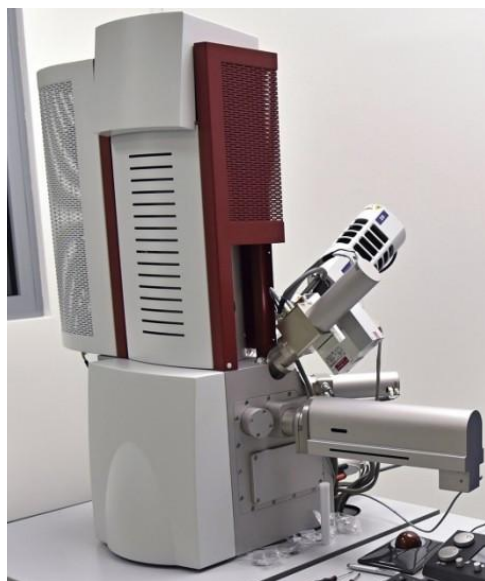
5.1. Ocena zużycia ostrza

Pomiar mikrogeometrii ostrzy ze zwróceniem szczególnej uwagi na wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej nowych ostrzy, oraz zużycie ostrzy skrawających wykonano mikroskopem optycznym 3D Portable RL firmy Bruker Alicona według standardu ISO 3685 (Rys. 5.1). Do oceny zużycia ostrza wykorzystano wskaźnik VB_C . Wskaźnik zużycia ostrza VB_C mierzono w funkcji czasu $VB_C = f(t)$. Pomiary zostały wykonane przy powiększeniu obiektywu 10x, gdzie poprzeczny obszar pomiarowy wynosił 4 mm^2 , natomiast najlepsza poprzeczna rozdzielczość topograficzna wynosi $2\text{ }\mu\text{m}$, zaś rozdzielczość pionowa wynosi 150 nm .



Rys. 5.1. Mikroskop optyczny 3D Portable RL firmy Bruker Alicona

Dodatkowym urządzeniem, na którym wykonano analizę EDS (ang. Energy Dispersive Spectroscopy) oraz pomiar zużycia ostrzy był skaningowy mikroskop elektronowy (ang. SEM) Mira 3 firmy Tescan (Rys. 5.2). Obrazy SEM wykonano przy napięciu 20 kV i powiększeniu 100x i 150x. Natomiast obrazy analizy EDS wykonano przy napięciu 12 kV i powiększeniu 150x.



Rys. 5.2. Skaningowy mikroskop elektronowy Mira 3 firmy Tescan

5.2. Ocena chropowatości i topografii powierzchni obrobionej

Chropowatość powierzchni oceniono stosując parametry Ra i Rz , które mierzono w tych samych punktach kontrolnych co średnicę (według normy PN-EN ISO 4287). Dla każdej próbki w określonym obszarze dokonano pomiaru w trzech miejscach na średnicy, rozłożonych co 120 stopni (Rys. 5.3) profilografometrem Surfcom 130A firmy Seimitsu (Rys. 5.4). Na wykresach zależności parametru Ra od spiralnej drogi skrawania naniesiono wartości średnie i przedziały ufności. Rozproszenie wyników pomiaru przedstawiono podając 90% przedziału ufności według zależności [121]:

$$\bar{x} \pm t_{\alpha,k} \cdot s(\bar{x}) \quad (5.1)$$

gdzie:

$\bar{x}$ – średnia arytmetyczna z próbek o liczebności n

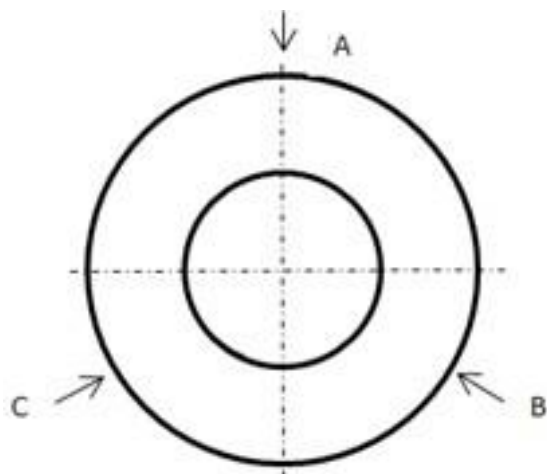
t – zmienna (wartość krytyczna) dla rozkładu t – Studenta

$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$ – błąd standardowy z próbek o liczebności n

$s(x)$ – odchylenie standardowe dla pojedynczego pomiaru

α – poziom istotności (przyjęto $\alpha = 0,1$)

k – liczba stopni swobody ($k = n - 1$)



Rys. 5.3. Metodyka pomiaru chropowatości i topografii powierzchni

Pomiar chropowatości wykonano przy następujących zestawach parametrów:

1. długość odcinka elementarnego $l_r = 0,25$ mm i odcinka pomiarowego $l_n = 2$ mm
2. długość odcinka elementarnego $l_r = 0,8$ mm i odcinka pomiarowego $l_n = 5,6$ mm



Rys. 5.4. Profilografometr Surfcom 130A firmy Seimitsu

Pomiary chropowatości prowadzone bezpośrednio przy obrabiarce były wykonywane za pomocą profilografometru MarSurf M300C firmy Mahr (Rys. 5.5). Pomiarów chropowatości dokonywano przy długości odcinka elementarnego $l_r = 0,8$ mm i odcinka pomiarowego $l_n = 5,6$ mm.



Rys. 5.5. Profilografometr MarSurf M300C firmy Mahr

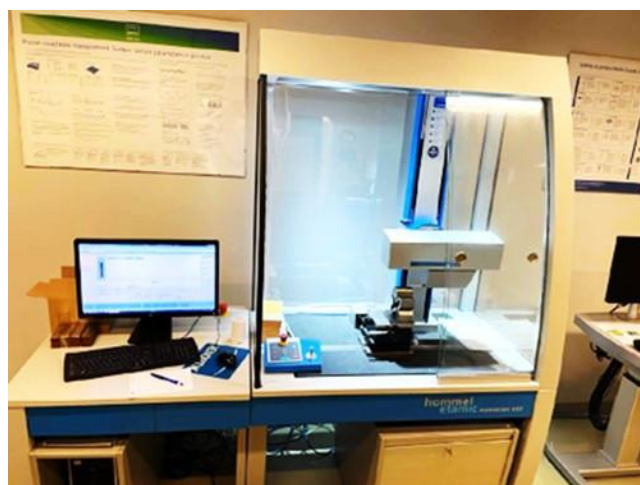
Teoretyczną wysokość mikronierówności powierzchni Rz_{to} określono stosując znaną zależność:

$$Rz_{to} = \frac{f^2}{8r_e} \quad (5.2)$$

Dla określenia teoretycznej wysokości mikronierówności R_{ato} wykorzystano zależność:

$$R_{ato} \approx 0,257 Rz_{to} \quad (5.3)$$

Według metodyki opisanej wcześniej i wskazanej na rysunku 5.3 została również zmierzona topografia powierzchni obrobionej urządzeniem Nanoscan 855 firmy Jenoptik (Hommel – Etamic) i zdefiniowana parametrem S_a i S_z . Parametry topografii mierzono z zastosowaniem filtra Gaussa na powierzchniach elementarnych o wymiarach $1,2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ i $5,21 \text{ mm} \times 4,95 \text{ mm}$, według standardu ISO 25178 (Rys. 5.6). Na wykresach zależności parametru S_a od spiralnej drogi skrawania naniesiono wartości średnie i przedziały ufności podane według zależności 3.2.



Rys. 5.6. Urządzenie do pomiaru topografii powierzchni Nanoscan 855 firmy Jenoptik (Hommel – Etamic)

5.3. Ocena uzyskiwanej dokładności wymiarowej

Otrzymane wymiary średnic zewnętrznych mierzono w dwóch przekrojach mikrometrem elektronicznym No.: 293-251 o zakresie pomiarowym 125 – 150 mm firmy Mitutoyo (Rys. 5.7).



Rys. 5.7. Mikromierz 125 – 150 mm firmy Mitutoyo

Wymiary średnic wewnętrznych mierzono średnicówką trójpunktową No.: 5109207 o zakresie pomiarowym 70 – 85 mm, oraz średnicówką zegarową No.: 511 – 703 o zakresie pomiarowym 50 – 150 mm firmy Mitutoyo (Rys. 5.8).



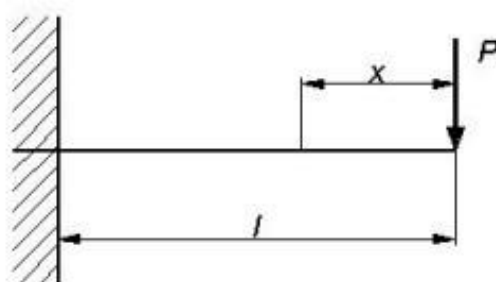
Rys. 5.8. Średnicówka zegarowa 50 – 150 mm firmy Mitutoyo

Ostatecznie wymiary końcowe otworu części mierzono na maszynie pomiarowej Accura II firmy Zeiss (Rys. 5.9).



Rys. 5.9. Maszyna pomiarowa Accura II firmy Zeiss

Dla wartości uzyskanych wymiarów podano wartości średnie oraz odchylenia standardowe. Ponieważ w badaniach użyto narzędzia o długim wysięgu, którego sztywność niewątpliwie nie była na takim samym poziomie jak w przypadku standardowej oprawki Capto, należało wziąć pod uwagę jego ugięcie w czasie prowadzonych testów. Postanowiono wstępnie zamodelować wartość ugięcia, korzystając z równania różniczkowego linii ugięcia (5.1) dla przypadku belki jednostronnie utwierdzonej (Rys. 5.10). Wartość odporowej siły skrawania, gdyż to ten rodzaj siły będzie miał największy wpływ na ugięcie, przyjęto w oparciu o prace [75, 106], a także [119] na poziomie 200 N.



Rys. 5.10. Rysunek pomocniczy dla obliczeń modelowych

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = -Mg(x) \quad (5.1)$$

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = -Px$$

gdzie:

$D = 70 \text{ mm} = 0,07 \text{ m}$ – średnica narzędzia

$R = 35 \text{ mm} = 0,035 \text{ m}$ – promień narzędzia

$E = 500 \text{ GPa} = 500000000 \text{ kPa}$ – moduł Younga dla węglików spiekanych (materiał narzędzia)

J – moment bezwładności

$l = 700 \text{ mm} = 0,7 \text{ m}$ – niepodparta długość narzędzia

Mg – moment zginający

$P = 200 \text{ N} = 0,2 \text{ kN}$ – siła

Całkowanie pierwsze

$$EJ \frac{dy}{dx} = -P \frac{x^2}{2} + c = -\frac{1}{2}Px^2 + c$$

Całkowanie drugie

$$EJy = -\frac{1}{2}P \frac{1}{3}x^3 + cx + d = -\frac{1}{6}Px^3 + cx + d$$

Warunki brzegowe

1. Jeżeli styczna do linii ugięcia belki jest pozioma w punkcie podparcia stałego, to pochodna jest równa zero.

$$x = l \quad y' = 0$$

2. Ugięcie w punkcie podparcia stałego jest równe zero.

$$x = l \quad y = 0$$

1.

$$EJ0 = -\frac{1}{2}Pl^2 + c$$

$$0 = -\frac{1}{2}Pl^2 + c$$

$$c = \frac{1}{2}Pl^2$$

2.

$$EJ0 = -\frac{1}{6}Pl^3 + \frac{1}{2}Pl^2l + d$$

$$0 = -\frac{1}{6}Pl^3 + \frac{1}{2}Pl^3 + d$$

$$0 = -\frac{1}{6}Pl^3 + \frac{3}{6}Pl^3 + d$$

$$0 = \frac{2}{6}Pl^3 + d$$

$$d = -\frac{2}{6}Pl^3$$

$$d = -\frac{1}{3}Pl^3$$

Równanie linii ugięcia

$$EJy = -\frac{1}{6}Px^3 + cx + d \quad (5.2)$$

$$y = -\frac{Px^3}{6EJ} + \frac{Pl^2x}{2EJ} - \frac{Pl^3}{3EJ}$$

Ugięcie

$$y(x=0) = -\frac{Pl^3}{3EJ} \quad (5.3)$$

Obliczenie momentu bezwładności

$$J = \frac{\pi R^4}{4}$$

$$J = \frac{\pi 0,035^4}{4}$$

$$J = 0.00000118 \, m^4$$

Obliczenie ugięcia

$$(x = 0) = -\frac{0,2 \times 0,7^3}{3 \times 500000000 \times 0,00000118} = \frac{0.0686}{1770}$$

$$y(x = 0) = -0,000038 \text{ m} = -0,038 \text{ mm}$$

Wyniki ugięcia badanego bezpośrednio na obrabiarce poprzez pomiar pierwszego przejścia, kształtowały się na poziomie $0,025 \div 0,035 \text{ mm}$. Trzeba pamiętać, że po założeniu nowego ostrza za każdym razem narzędzie zostało zmierzone. Należy jednak zauważyć, że geometrie płytek i mikrogeometrie ich ostrzy różniły się, co miało wpływ na rozbieżność wartości odporowej siły skrawania z przyjętą w obliczeniach. Dlatego różnice ugięć badanych na obrabiarce w stosunku do wartości modelowej, obliczonej przy użyciu równania (5.1) odbiegają do 34%. Dokładność wymiarową oraz jakość powierzchni oceniono w zależności od zastosowanej oprawki narzędziowej, a także charakteru zużycia ostrza. Dokładność otrzymanych wymiarów była sprawdzana poprzez pomiar średnic zewnętrznych mikrometrem elektronicznym, natomiast średnice wewnętrzne były kontrolowane średnicówką zegarową i trójpunktową. Każde z ostrzy na poszczególnych oprawkach wykonało 14 przejść, więc otrzymano drogę skrawania równą 1620 m [124]. Dla przyjętej strategii i parametrów obróbki, czas pracy każdego narzędzia wynosił 19 min. Pomiaru średnicy dokonano nieprzypadkowo po przejściu 2, 5, 9 oraz 14, dla każdego narzędzia.

5.4. Ocena mikrostruktury warstwy wierzchniej

Obrazy mikrostruktur wykonano za pomocą mikroskopu EPIPHOT 200 firmy Nikon, przy powiększeniu 500x. Próbki zostały zatopione w duracrylu i wytrawione odczynnikiem Kalling's po polerowaniu (Rys. 5.11).



Rys. 5.11. Mikroskop EPIPHOT 200 firmy Nikon

5.5. Ocena właściwości tribologicznych badanych ostrzy

Test zarysowania (ang. *scratch test*) wykonano na tribotesterze Bruker UMT2 przy następujących parametrach:

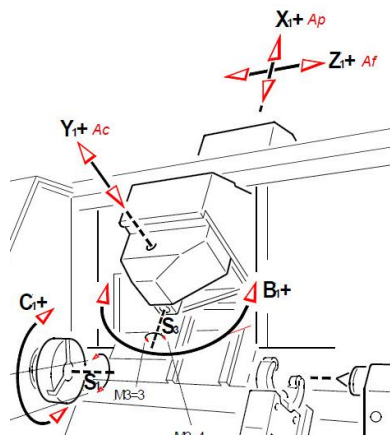
- Przyrząd: wgłębnik diamentowy, typu Vickersa, 120° i $r_e = 0,2$ mm,
- Obciążenie: narastające od 0,5 N do 35 N oraz narastające od 0,5 N do 15 N,
- Czas: 300 s,
- Długość ścieżki: 40 mm,
- Próbkę oraz wgłębnik przed każdym pomiarem oczyszczane były metanolem, a także sprężonym gazem.

Pomiar geometrii rysy oraz obserwacja zjawisk tribologicznych wykonana została za pomocą mikroskopu profilometrycznego Alicona.

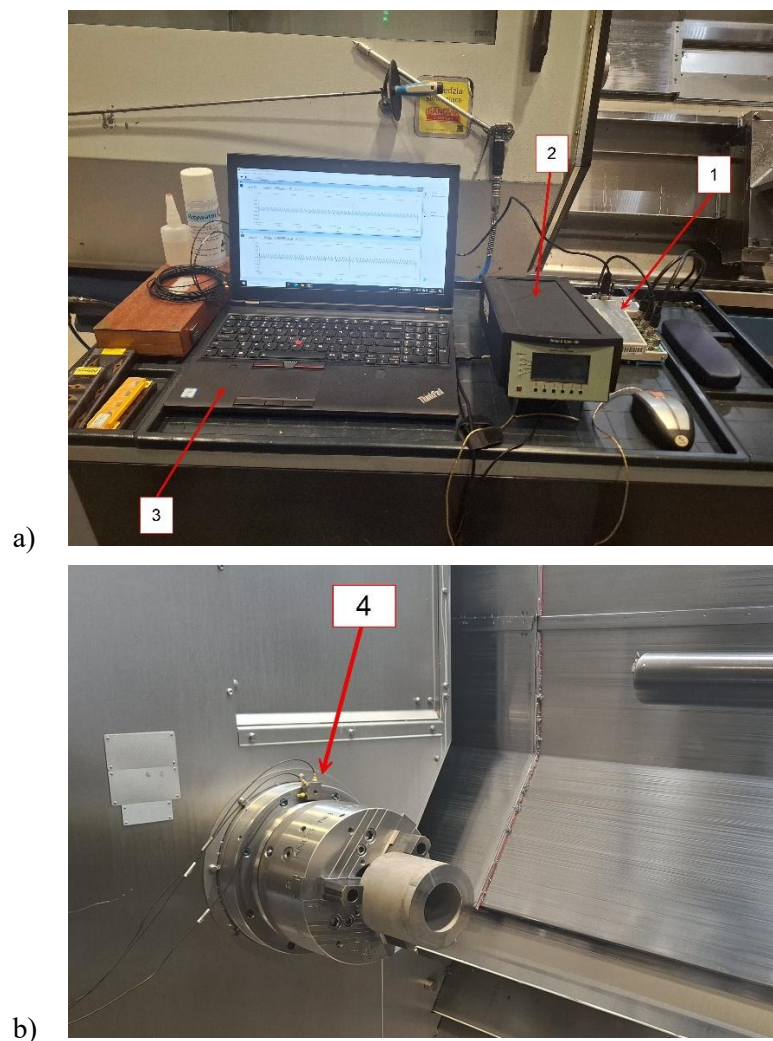
Na ostrzach użytych do badań dokonano pomiaru mikrotwardości naniesionych powłok. Do tego celu użyto nanotwardościomierz Picodentor Fischer HM500, którego zakres obciążenia wynosi 0,005 – 500 mN, natomiast zakres badanej twardości jest równy 0,001 – 120000 N/mm².

5.6. Pomiar drgań

W czasie procesu obróbki dokonano pomiaru przyspieszeń drgań. Mierzono przyspieszenia drgań w trzech kierunkach: X zgodnie z wektorem v_p , Y zgodnie z wektorem v_c i Z zgodnie z wektorem v_f (Rys. 5.12). Pomiar wykonano bezpośrednio na obrabiarce M40, podczas obróbki próbki materiału Inconel 718, a także części produkcyjnej z zastosowaniem wytaczadła antywibracyjnego (Rys. 5.13).



Rys. 5.12. Pomiar wibracji – kierunki pomiaru przyspieszeń drgań



Rys. 5.13. Pomiar wibracji: a) stanowisko do odczytu i przetwarzania sygnału wyposażone w 1 – przetwornik analogowo-cyfrowy firmy Advantec, 2 – wzmacniacz NEXUS firmy Bruel & Kjaer, 3 – komputer z oprogramowaniem, b) czujnik wibracji zamontowany na uchwycie obrabiarki

Do wykonania pomiarów wykorzystano piezoelektryczny czujnik przyspieszeń drgań firmy Bruel & Kjaer, model 4321 (4), połączony z przetwornikiem analogowo-cyfrowym (24 bitowym) firmy Advantec (1) oraz ze wzmacniaczem NEXUS firmy Bruel & Kjaer (2), który podłączony był do komputera z oprogramowaniem Analizator ADV01 (3).

5.7. Ocena kształtu wiórów

W celu oceny kształtu wiórów po toczeniu stopu Inconel 718 wykorzystano wióry, które otrzymano podczas badań zasadniczych. Wióry zostały sklasyfikowane według normy PN-ISO 3685 (PN-83/M-58350) [122].

6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

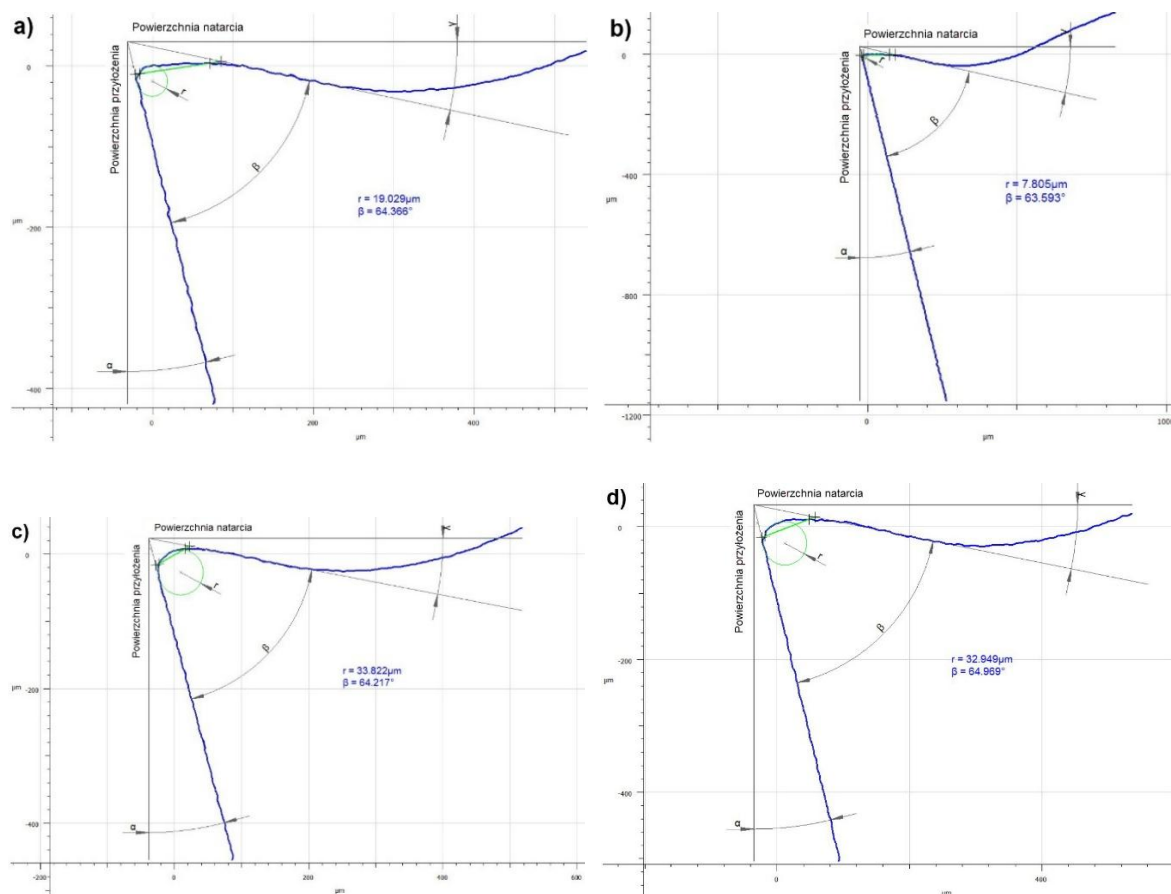
6.1. Badania wstępne przeprowadzone na próbkach materiału

W trakcie kilkuletnich obserwacji procesu obróbki otworu części, której dotyczy niniejsza praca zauważono, że zastosowanie płytek z regularnego azotku boru na długim wysięgu nie daje wymaganej stabilności procesu skrawania w materiale Inconel 718. W związku z tym, przyjęto założenie, że zastosowanie nowej generacji ostrzy z węglików spiekanych zapewni bardziej niezawodny proces skrawania podczas toczenia wykończeniowego części klasy wał silnika lotniczego.

Badania podstawowe miały na celu analizę w jakim kierunku należy pójść decydując się na wybór narzędzia skrawającego, zarówno pod względem rodzaju nanoszonej powłoki, jaki i poziomu odporności na ścieranie. Co może być decydującym czynnikiem chcąc zapewnić warunki technologiczne, w przypadku kiedy wymagana jest ponad standardowa trwałość narzędzia podczas obróbki wyżej wymienionego materiału. Wyselekcjonowano cztery płytki skrawające o identycznej geometrii VBGT 160408-UM, ale z powłokami naniesionymi różnymi metodami i o zróżnicowanym poziomie twardości i odporności na ścieranie. Badania miały charakter porównawczy skrawalności stopu Inconel 718 gdy zastosowana jest identyczna geometria ale różny substrat i powłoki. Płytki skrawające osadzono w oprawce typu Capto C6 – SVHBL – 45065 – 16HPA. Testom toczenia wykończeniowego poddano średnicę zewnętrzną próbek. Oceniono dokładność uzyskiwanych wymiarów, która jest jednym z najważniejszych wymagań, ponieważ w docelowym procesie ostrze pracuje na długim wysięgu. Ewaluacji poddano również zużycie ostrza oceniane wskaźnikiem VB_C , a także chropowatość powierzchni ocenianą parametrami Ra i Rz oraz topografię powierzchni ocenianą parametrami Sa i Sz i mikrostrukturę warstwy wierzchniej. Badania przeprowadzono z zastosowaniem toczenia wzdłużnego średnicy zewnętrznej. Ponieważ badania mają na celu opracowanie rozwiązania technologicznego dla toczenia powierzchni wymagających długiej drogi skrawania, narzędziami o długim wysięgu (10xD), dlatego każdą płytką wykonano 14 przejść o długości 40 mm odzwierciedlających wymaganą drogę jednego przejścia narzędzia na części produkcyjnej. Dla każdego narzędzia zostały wykonane 4 pomiary uzyskanych średnic po nieprzypadkowo określonych przejściach, co również odzwierciedla punkty kontrolne dla powierzchni obrobionej, której drogę skrawania ostrza odwzorowano.

6.1.1 Badania zużycia ostrzy

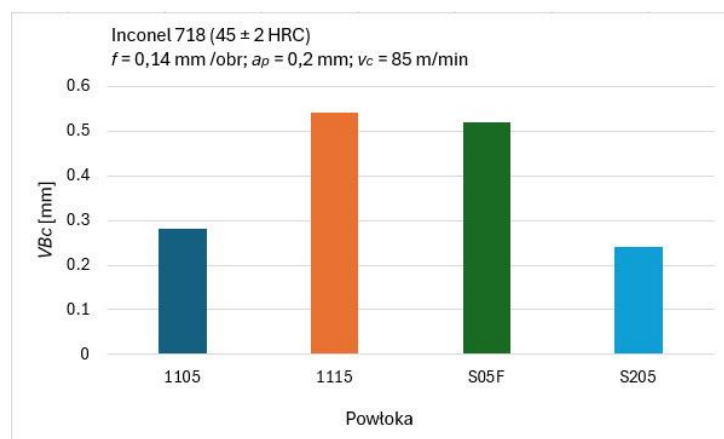
Na rys. 6.1 przedstawiono widok mikrogeometrii nowych ostrzy skrawających płytek VBGT 160408-UM zastosowanych w badaniach, które zostały zmierzone mikroskopem 3D Portable RL firmy Bruker Alicona.



Rys. 6.1. Porównanie mikrogeometrii badanych ostrzy ze szczególnym uwzględnieniem wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n : a) ostrze z powłoką 1105, b) ostrze z powłoką 1115, c) ostrze z powłoką S05F, d) ostrze z powłoką S205

Przedstawione na rysunku 6.1 obrazy ostrzy, pokazują, że pomimo identycznej makro geometrii płytek skrawających, która zawarta jest w ich oznaczeniu ISO różnica w mikrogeometrii jest znaczna. Szczególnie widoczne są różnice w wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n . Zrealizowane pomiary potwierdzają, że ostrza, których powłoki nanoszone są metodą PVD czyli 1105 i 1115 charakteryzują się mniejszymi wartościami promienia r_n , w porównaniu z ostrzami S05F i S205, których powłoki nanoszono metodą CVD. Analizując wpływ powłoki ostrza na jego zużycie, należy zwrócić uwagę, że każde z ostrzy pokonało bardzo długą spiralną drogę skrawania, równą 1620 m,

co przy zadanych parametrach obróbki odpowiada czasowi pracy 19 min, zważywszy na to, w jakim materiale pracowało. Na rys. 6.2 przedstawiono zużycie ostrza ocenione wskaźnikiem VB_C w zależności od zastosowanej powłoki na narzędziu.

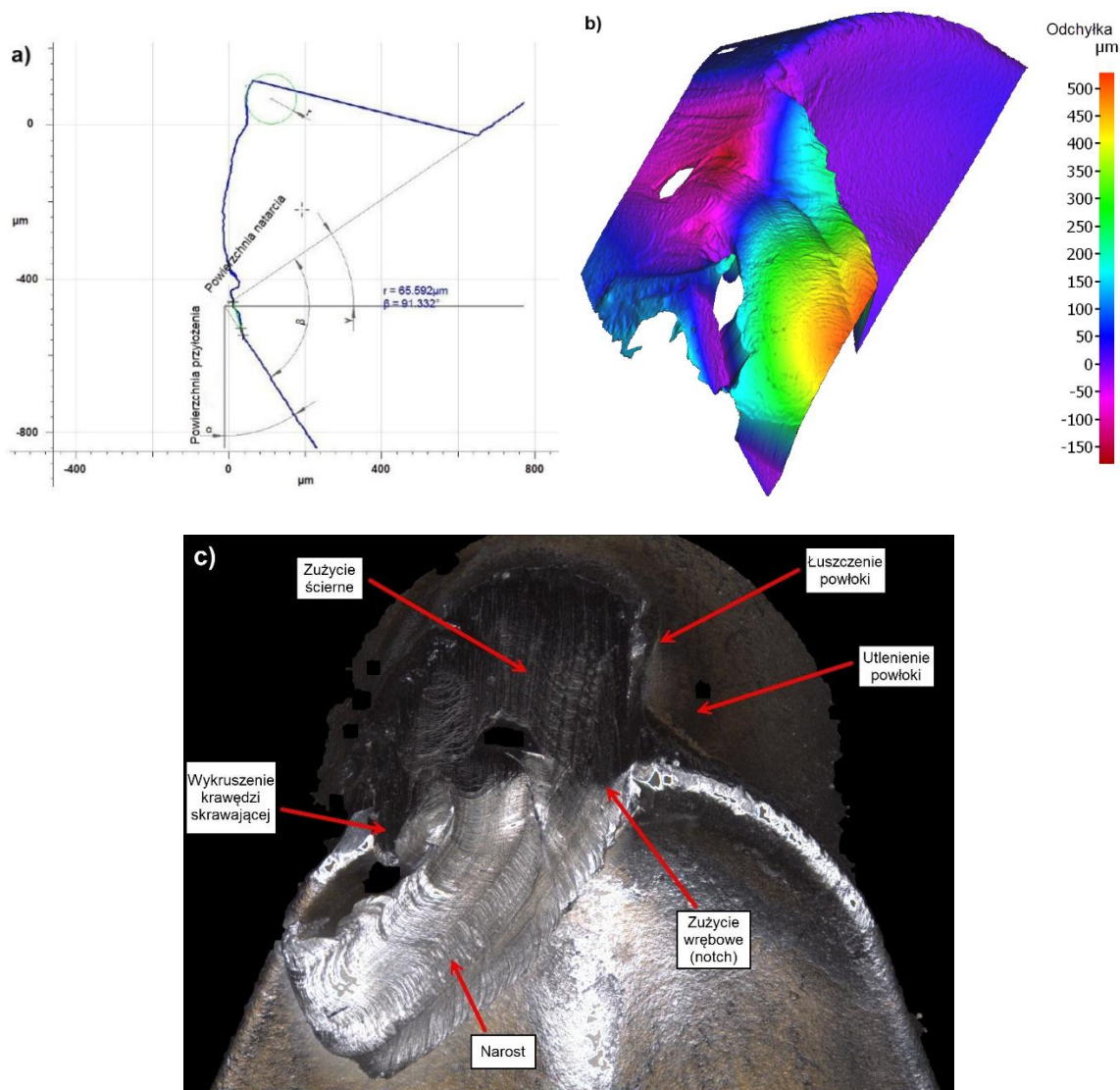


Rys. 6.2. Wpływ powłoki ostrza skrawającego na wskaźnik zużycia VB_C naroży płytek po toczeniu wykończeniowym stopu Inconel 718

Z wyników przedstawionych na wykresie wynika, że nie można przyjąć jednoznacznej odpowiedzi, iż metoda nanoszenia powłoki ma tutaj największe znaczenie. Pomimo zaleceń producentów narzędzi dotyczących powłok typu PVD jako dedykowanych do obróbki superstopów na osnowie niklu, z przeprowadzonych badań wynika, że to ostrze S205 charakteryzowało się najmniejszą wartością wskaźnika zużycia VB_C i jest to powłoka nanoszona metodą CVD. Należy jednak zaznaczyć, że powłoka 1105 również charakteryzowała się stosunkowo małą wartością wskaźnika VB_C pomimo długiego czasu obróbki.

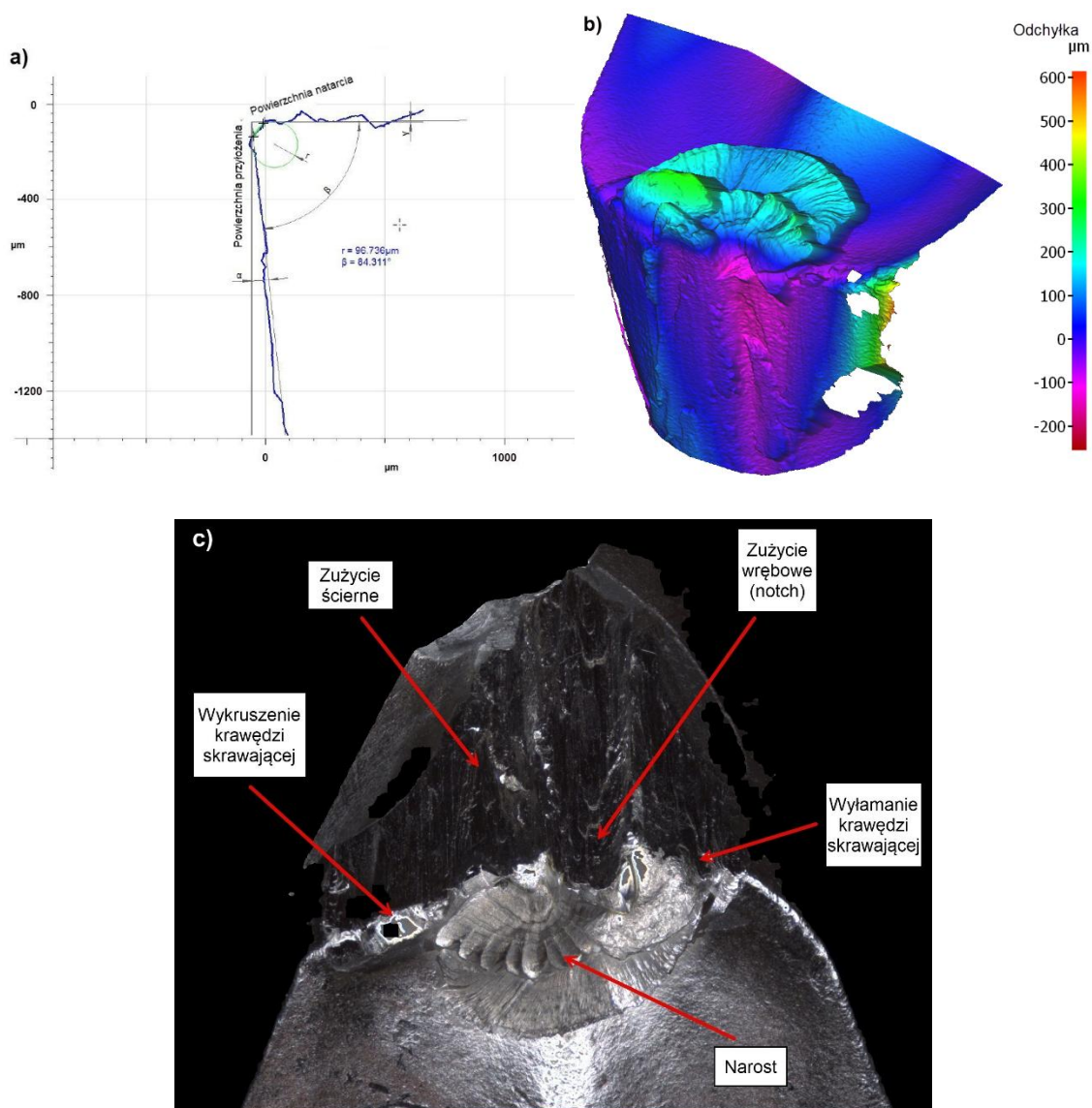
Objawy zużycia poszczególnych ostrzy (Rys. 6.3÷6.6) znacznie się między sobą różnią. Biorąc pod uwagę szerokość starcia na powierzchni przyłożenia oceniane parametrem VB_C , a także wygląd samego ostrza, można zauważyć znaczną różnicę pomiędzy powłokami z zakresu wyższych a niższych odporności na ścieranie, niezależnie od metody nanoszenia danej powłoki. Niewątpliwie duże zużycie nastąpiło na ostrzu z powłoką S05F, gdzie $VB_C = 520 \mu\text{m}$, co jest zaskakujące, ponieważ powłoka ta jest odporna na ścieranie i charakteryzuje się większą grubością z racji tego, że jest nanoszona metodą CVD. Przyczyną takiej degradacji ostrza mogła być stosunkowo duża wartość prędkości skrawania przyjęta w badaniach, a ponieważ jest to nieco starszy rodzaj powłoki więc w połączeniu z wymaganą drogą skrawania nastąpiło ścierne i wytrzymałościowe zużycie ostrza. Pojawił się tutaj również znaczny ubytek krawędzi skrawającej, na której zauważono wykruszenia

i wyszczerbienia. Zaobserwowano także zjawisko złuszczenia i utlenienia powłoki szczególnie widoczne na powierzchni przyłożenia.



Rys. 6.3. Obraz zużytego ostrza S05F po upływie 19 min czasu obróbki: a) profil przekroju poprzecznego ostrza, b) topografia ostrza, c) widok zużytej krawędzi skrawającej

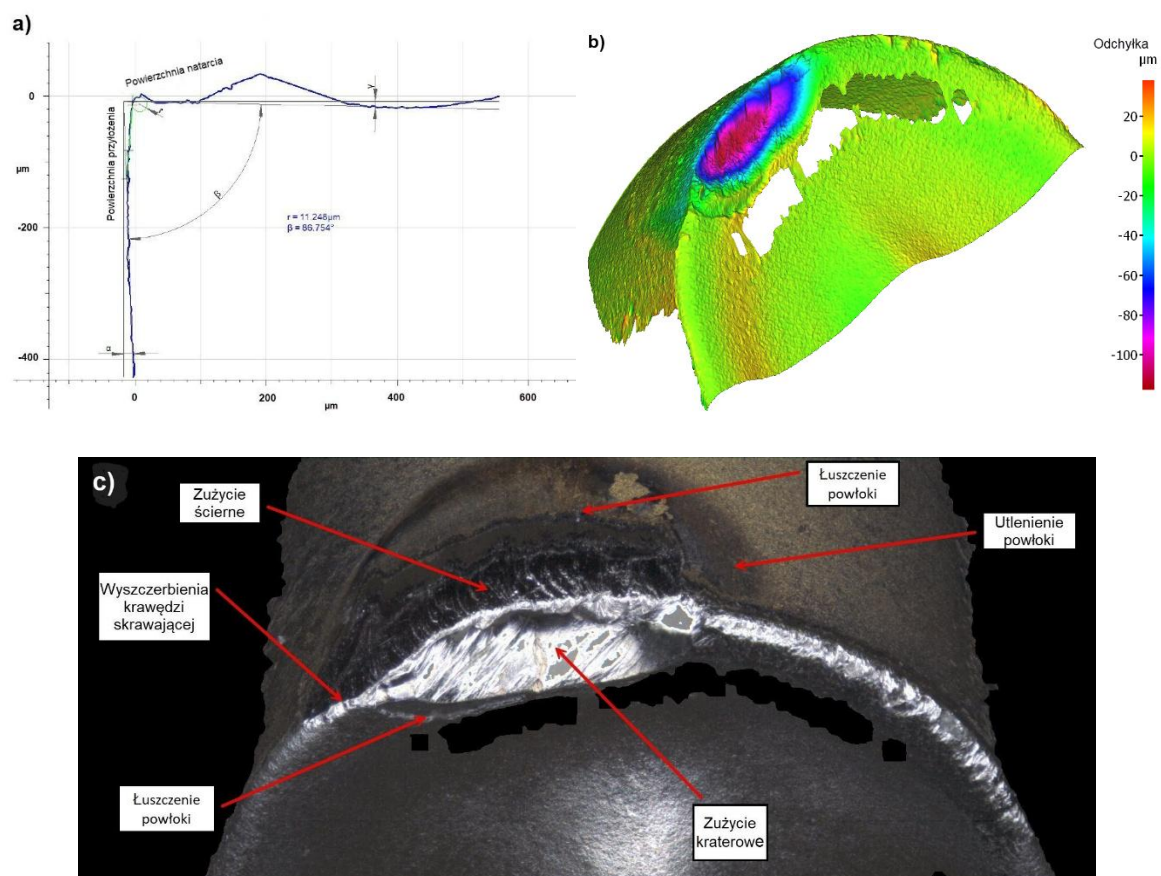
Należy także zauważyć, że na ostrzu z powłoką S05F pojawił się narost [43, 107], który prawdopodobnie był skutkiem skłonności materiału Inconel 718 do jego tworzenia, jak również wzrastającej intensywności zużycia adhezyjnego [87]. Analizując zużycie ostrza z powłoką 1115, dla którego $VB_C = 540 \mu\text{m}$ możemy zauważyć, że podczas pracy tego narzędzia wystąpiły podobne mechanizmy i rodzaje zużycia jak w przypadku ostrza z powłoką S05F.



Rys. 6.4. Obraz zużytego ostrza 1115 po upływie 19 min czasu obróbki: a) profil przekroju poprzecznego ostrza, b) topografia ostrza, c) widok zużytej krawędzi skrawającej

W przypadku ostrza z powłoką 1115 można również powiedzieć, że mamy do czynienia z degradacją ostrza. Zauważono tutaj drastyczne zużycie ściernie i wytrzymałościowe w postaci wyszczerbień i wyłamań. Nie mniej jednak należy zwrócić uwagę, że jest to powłoka PVD, która ma mniejszą grubość, a także niższą odporność na ścieranie w porównaniu do S05F. Wypada również zaznaczyć, iż wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej dla ostrza z powłoką 1115 była najniższa i wynosiła $r_n = 7,8 \mu\text{m}$, co sugeruje, że ostrze było bardzo ostre, ale miało najmniejszą wytrzymałość. Tak duże zużycie było również skutkiem zastosowania dużej wartości prędkości skrawania [85], jak również długości drogi, którą narzędzie musiało pokonać. Oceniając zużycie ostrza z powłoką S205,

dla którego $VB_C = 240 \mu\text{m}$, należy podkreślić, że jest to bardzo dobra i trwała powłoka CVD, która cechuje się wysoką odpornością na ścieranie i działanie wysokich temperatur w strefie skrawania, przy stosunkowo dużych prędkościach skrawania [88, 91]. Zużycie ostrza, które powstało w wyniku pracy tego narzędzia ma w zasadzie charakter ścierny. Wyżłobienie, które zaistniało w wyniku tarcia wióra o powierzchnię natarcia jest charakterystyczne dla materiału Inconel 718.

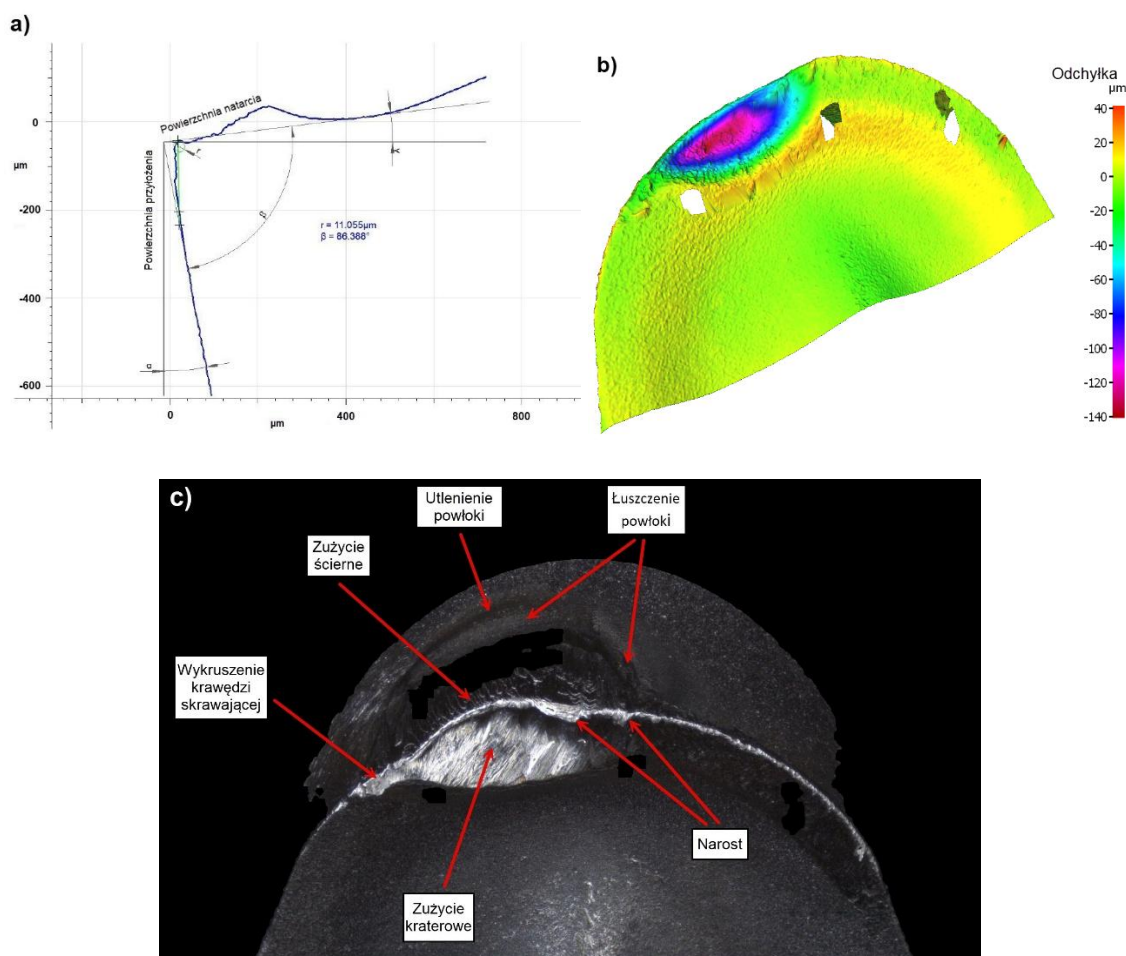


Rys. 6.5. Obraz zużytego ostrza S205 po upływie 19 min czasu obróbki: a) profil przekroju poprzecznego ostrza, b) topografia ostrza, c) widok zużytej krawędzi skrawającej

Zauważono również takie mechanizmy zużycia jak wykruszenia, a także łuszczenie i utlenianie powłoki szczególnie na powierzchni przyłożenia. Powłoka S205 bardzo dobrze zniosła warunki skrawania, biorąc pod uwagę zużycie ostrza, co przełożyło się na dokładność uzyskiwanych wymiarów oraz jakość powierzchni obrobionej, ocenianej parametrami Ra i Sa , opisanymi w dalszej części rozdziału.

Ostrze z powłoką 1105, dla którego $VB_C = 280 \mu\text{m}$, również prezentuje małe zużycie. Pomimo tego, że powłoka ta nanoszona jest metodą PVD, to charakteryzuje się wysoką

odpornością na ścieranie. Zużycie ostrza ma charakter zbliżony do tego, które wystąpiło na ostrzu z powłoką S205, w postaci wyłobienia w pobliżu krawędzi skrawającej i rozciągającego się na powierzchnię natarcia.



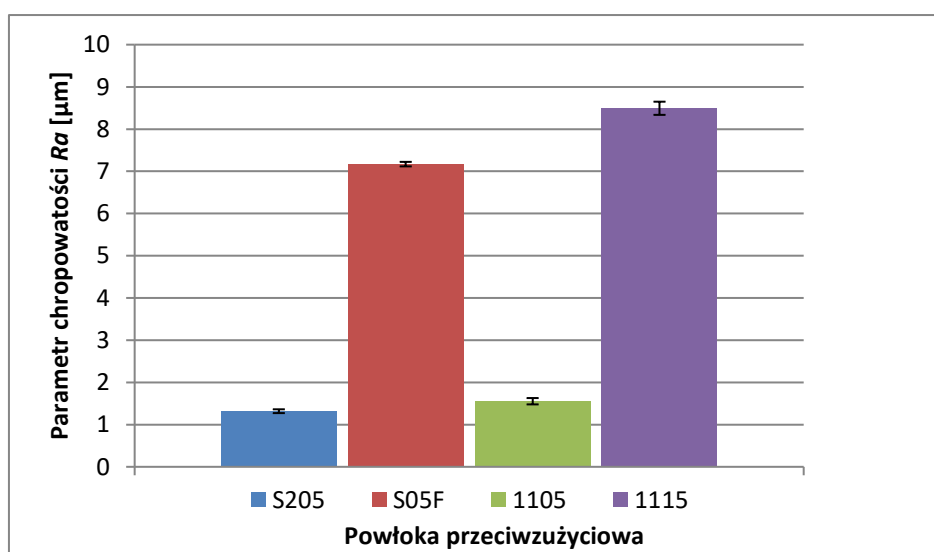
Rys. 6.6. Obraz zużytego ostrza 1105 po upływie 19 min czasu obróbki: a) profil przekroju poprzecznego ostrza, b) topografia ostrza, c) widok zużytej krawędzi skrawającej

W przypadku tego ostrza zauważono charakter ścierny zużycia. Niemniej jednak zarejestrowano również wykruszenia na krawędzi skrawającej, a także łuszczenie oraz utlenianie powłoki. Ponadto dostrzeżono przyłgnięty materiał w obszarze krawędzi skrawającej. Powłoka ta również zapewnia stosunkowo wysoką dokładność wymiarową, oraz jakość powierzchni biorąc pod uwagę przebytą drogę skrawania.

Odnosząc się do profilu przekroju poprzecznego wszystkich płytek skrawających, w przypadku ostrzy S205 i 1105 można zaznaczyć, że przebieg zużycia następował stopniowo i w dość stabilny sposób. Sukcesywnie z upływem czasu skrawania następowało cofanie się krawędzi skrawającej i zwiększanie jej czynnej długości. Odnosząc się do ostrzy S05F i 1115, wystąpiło tutaj katastroficzne zużycie ostrza.

6.1.2 Badania chropowatości i topografii powierzchni

Analizując wpływ powłoki ostrza na parametr chropowatości Ra można zauważyć, że najmniejsze wartości tego parametru zarejestrowano dla powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką CVD S205, dla której średnia wartość $Ra = 1,317 \mu\text{m}$. Pozytywnym wynikiem odznacza się także powierzchnia obrobiona ostrzem z powłoką PVD o wysokiej odporności na ścieranie 1105, której wartość średnią chropowatości uzyskano na zbliżonym poziomie, równą $Ra = 1,553 \mu\text{m}$. Zastanawiająca jest natomiast wysoka wartość parametru $Ra = 7,17 \mu\text{m}$ dla powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką S05F, gdyż jest to powłoka o stosunkowo dużej odporności na ścieranie (Rys. 6.7).



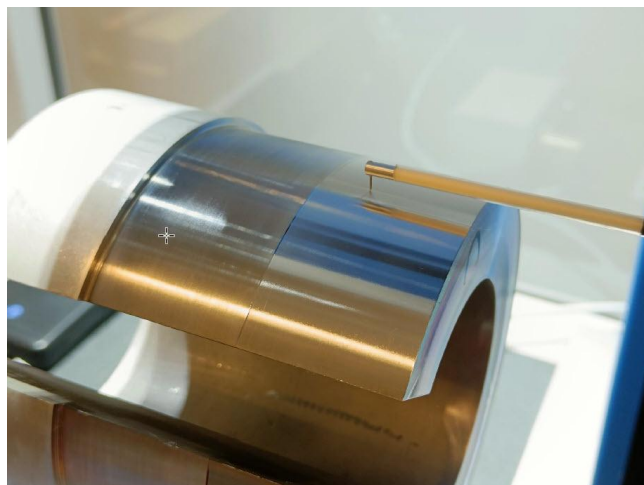
Rys. 6.7. Wpływ powłoki ostrza na średnią wartość parametru chropowatości Ra powierzchni obrobionej

W przypadku powierzchni obrobionej ostrzem 1115 uzyskano największą wartość chropowatości powierzchni, która wyniosła $Ra = 8,493 \mu\text{m}$. Niewątpliwie tak duże wartości parametru Ra uzyskane dla powierzchni obrobionych ostrzami S05F i 1115 należy przypisać katastroficznemu charakterowi zużycia ostrza. Krawędź skrawająca powyższych ostrzy została całkowicie zdegradowana, co spowodowało zmianę kontaktu ostrza z powierzchnią obrobioną z liniowego na powierzchniowy. Wystąpił wówczas wzrost tarcia powierzchni przyłożenia ostrza o powierzchnię obrobioną, co spowodowało podwyższenie temperatury w strefie skrawania. Jednocześnie i systematycznie pogarszały się właściwości skrawne ostrza spowodowane również dostającymi się cząsteczkami materiału obrabianego a także materiału ostrza do strefy skrawania (Rys. 6.8).

a)	ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = S205 A Ra = 1.293 μm ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = S205 B Ra = 1.346 μm ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = S205 C Ra = 1.313 μm
b)	ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = 1105 A Ra = 1.605 μm ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = 1105 B Ra = 1.533 μm ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = 1105 C Ra = 1.523 μm
c)	ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = S05F A Ra = 7.139 μm ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = S05F B Ra = 7.202 μm ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = S05F C Ra = 7.169 μm
d)	ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA Comment = 1115 A Ra = 8.512 μm ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA 1115 B Comment = Ra = 8.575 μm ACCURETECH Ver. 7.00 surf from 130A PROBKA 1115 C Comment = Ra = 8.392 μm

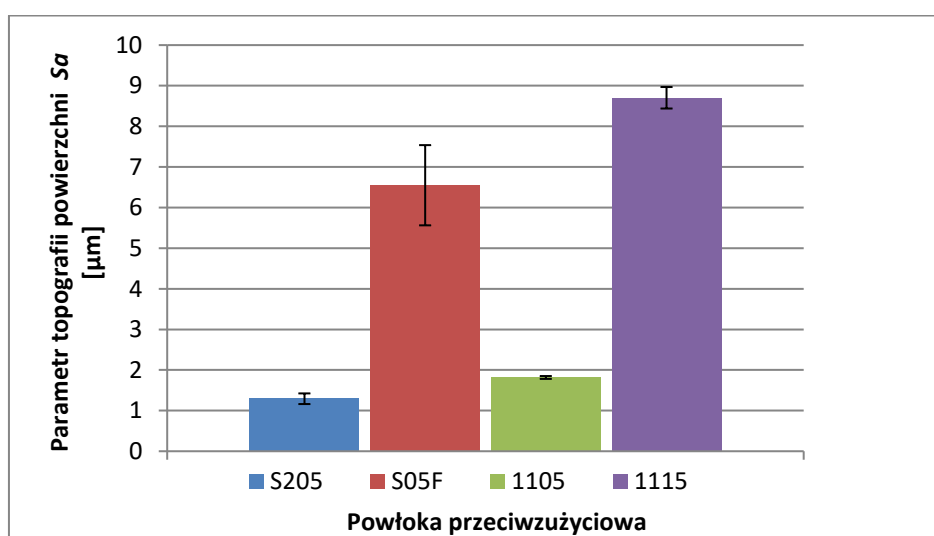
Rys. 6.8. Wydruki pomiaru parametru chropowości R_a powierzchni obrobionych próbki o wartościach najbardziej zbliżonych do średnich ostrzami: a) S205, b) 1105, c) S05F, d) 1115

Rozpatrując wpływ powłoki ostrza na topografię powierzchni ocenianą parametrem S_a można zauważyć, że wyniki pomiarów kształtują się podobnie jak w przypadku wartości chropowatości powierzchni (Rys. 6.9).



Rys. 6.9. Pomiar topografii powierzchni obrabianej próbki

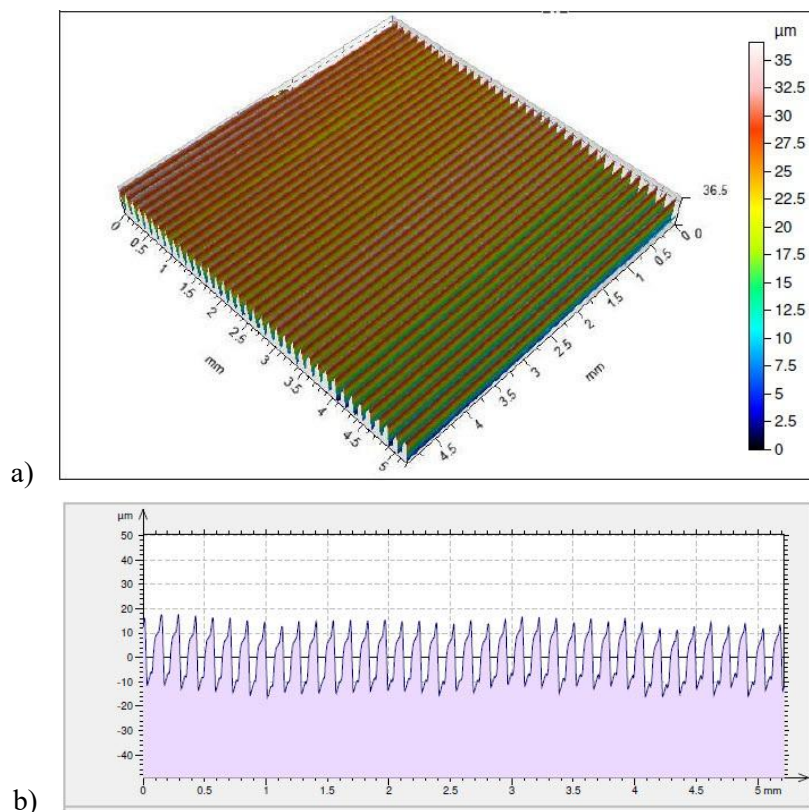
Najmniejszą wartość tego parametru uzyskano również dla powierzchni obrabianej ostrzem z powłoką S205 i wyniosła ona średnio $S_a = 1,293 \mu\text{m}$. Nieco większą wartość tego parametru zanotowano dla powierzchni obrabianej ostrzem z powłoką 1105, której wartość wyniosła $S_a = 1,816 \mu\text{m}$. Zdecydowanie większą wartość parametru S_a zarejestrowano dla powierzchni obrabianej ostrzem S05F, dla której $S_a = 6,55 \mu\text{m}$. Natomiast największą średnią wartość tego parametru uzyskano dla powierzchni obrabianej ostrzem z powłoką 1115 i wyniosła ona $S_a = 8,7 \mu\text{m}$ (Rys. 6.10).



Rys. 6.10. Wpływ powłoki ostrza na średnią wartość parametru topografii S_a powierzchni obrabianej

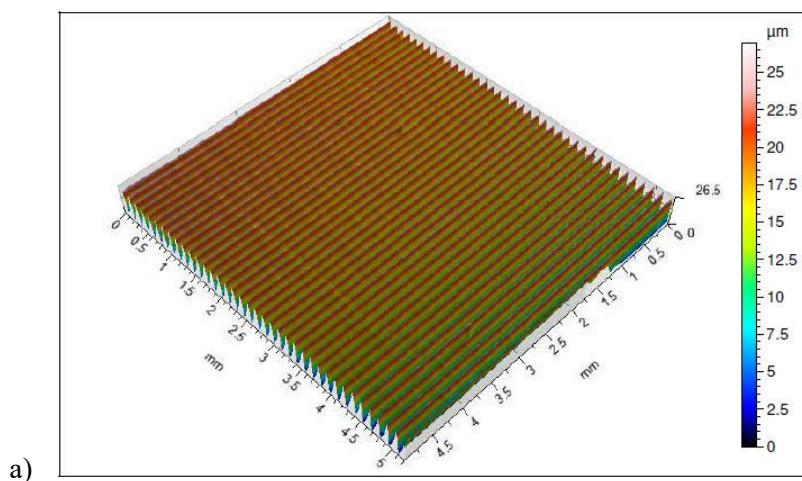
Należy zauważyć, że zarówno powłoki nanoszone metodą CVD jak i PVD z zakresu większych odporności na ścieranie, znacznie zapobiegają intensyfikowaniu się zużycia ostrza, co zdecydowanie przekłada się na jakość powierzchni obrobionej. Należy także zwrócić uwagę, że dla powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką 1115 mierzony parametr Sa odznaczał się znacznie większym rozrzutem otrzymywanych wyników, co świadczy o poważnych nieregularnościach opisywanej powierzchni. Tak duży rozrzut otrzymywanych wartości był najprawdopodobniej spowodowany z jednej strony silnym zużyciem ostrza, natomiast z drugiej strony większym spektrum badanej powierzchni podczas pomiaru topografii w porównaniu do pomiaru liniowego chropowatości powierzchni. Wszystkie analizowane mapy izometryczne badanych powierzchni charakteryzują się równomiernym rozkładem dolin i grzbietów. Na rysunkach 6.11÷6.14 przedstawiono obrazy, których wartości parametrów topografii były najbardziej zbliżone do wartości średnich. Powierzchnie te mają różne wysokości mikronierówności. Średnią wartość maksymalnej wysokości powierzchni $Sz = 37,9 \mu\text{m}$ zarejestrowano dla powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką 1115 (Rys. 6.11). Parametry Sp i Sv , czyli maksymalna wysokość pików powierzchni i maksymalna wysokość wgłębień powierzchni wynoszą odpowiednio $Sp = 19,27 \mu\text{m}$ i $Sv = 18,63 \mu\text{m}$. Kolejna analizowana powierzchnia została uzyskana po obróbce ostrzem z powłoką S05F (Rys. 6.12). Dla powierzchni tej średnia wartość parametru $Sz = 27,66 \mu\text{m}$, a parametry $Sp = 14,6 \mu\text{m}$ i $Sv = 13,06 \mu\text{m}$. Ostrza z powłokami 1115 i S05F wygenerowały powierzchnie, dla których zaobserwowano największe wartości parametrów chropowatości, cechowały się również największymi wartościami zużycia VB_c (temat zużycia ostrzy skrawających został omówiony w rozdziale 6.1.1). Ostrza z powłokami S205 i 1105, na których zarejestrowano około 50% mniejsze zużycie w porównaniu do ostrzy z powłokami 1115 i S05F, wygenerowały powierzchnie których parametry chropowatości są kilkukrotnie mniejsze. Najmniejsze wartości średnie parametrów $Sz = 7,1 \mu\text{m}$, $Sp = 3,85 \mu\text{m}$ i $Sv = 3,25 \mu\text{m}$ zarejestrowano dla powierzchni uzyskanej ostrzem S205 (Rys. 6.13), dla której wartość zużycia ostrza była najmniejsza. Nieco większe wartości parametrów $Sz = 11,17 \mu\text{m}$, $Sp = 5,91 \mu\text{m}$ i $Sv = 5,26 \mu\text{m}$ zaobserwowano dla powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką 1105 (Rys. 6.14), dla której zarejestrowane zużycie ostrza VB_c było o 40 μm większe w odniesieniu do ostrza z powłoką S205. Dla wszystkich badanych powierzchni zaobserwowano większe wartości parametrów Sp niż parametrów Sv , a zatem powierzchnie te cechują się większymi wartościami maksymalnych wysokości pików powierzchni.

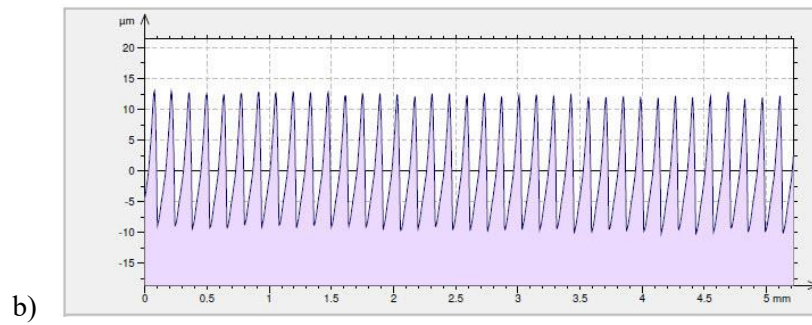
Porównując wartości parametrów chropowatości zarejestrowanych na powierzchniach po obróbce ostrzami z powłokami nałożonymi tą samą metodą powlekania narzędzi, tj. CVD (S05F, S205) i PVD (1105, 1115), można zauważyć, że parametry te uzyskane po obróbce ostrzem z powłoką S05F są ponad 3,5 krotnie większe niż po obróbce ostrzem z powłoką S205. Podobnie sytuacja wygląda w przypadku powłok 1115 i 1105. Parametry chropowatości zarejestrowane dla powierzchni uzyskanej ostrzem z powłoką 1115, także są 3,5 krotnie większe niż dla powłoki 1105.



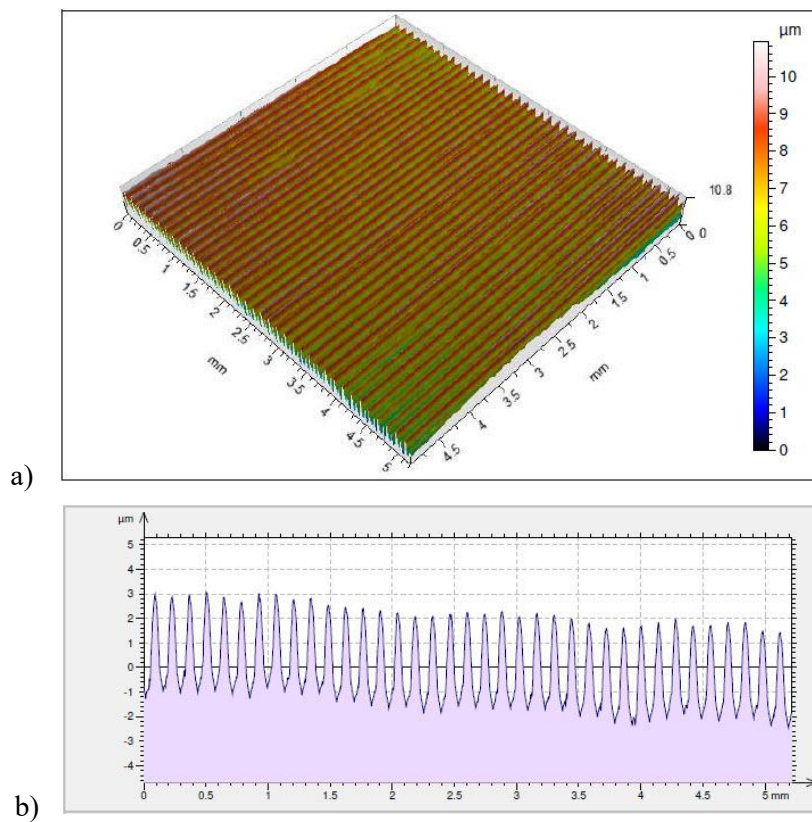
Rys. 6.11. Topografia powierzchni obrobionej uzyskana ostrzem z powłoką 1115:

a) topografia powierzchni 3D, b) profil 2D chropowatości powierzchni

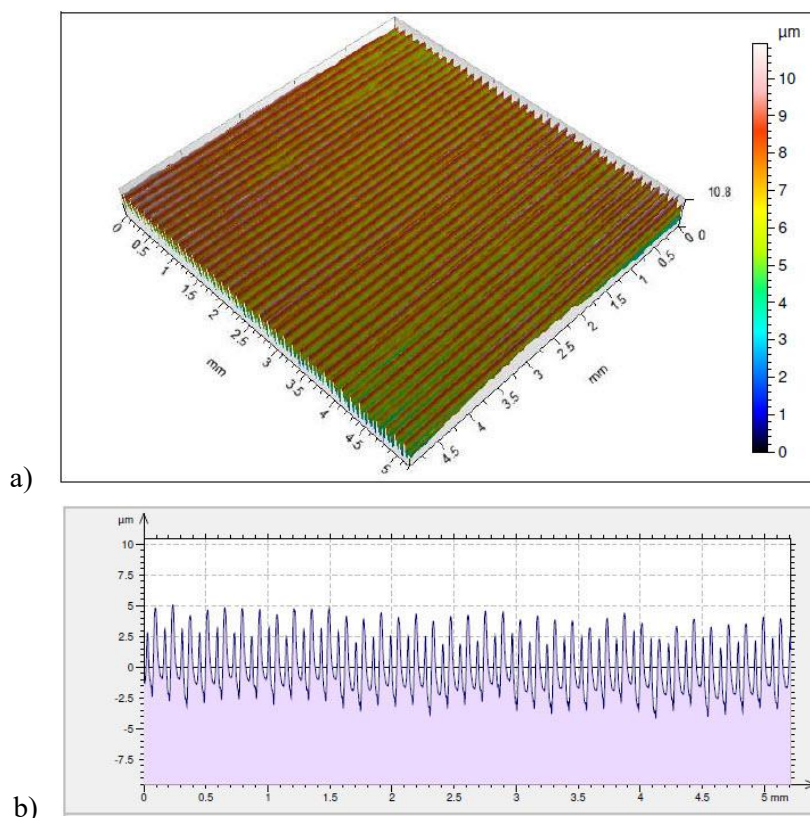




Rys. 6.12. Topografia powierzchni obrobionej uzyskana ostrzem z powłoką S05F: a) topografia powierzchni 3D, b) profil 2D chropowości powierzchni



Rys. 6.13. Topografia powierzchni obrobionej uzyskana ostrzem z powłoką S205: a) topografia powierzchni 3D, b) profil 2D chropowości powierzchni



Rys. 6.14. Topografia powierzchni obrobionej uzyskana ostrzem z powłoką 1105: a) topografia powierzchni 3D, b) profil 2D chropowatości powierzchni

Powierzchnie otrzymane w wyniku obróbki wszystkimi ostrzami niezależnie od uzyskanych wartości parametrów mikronierówności Sa i Sz charakteryzowały się większymi wartościami maksymalnych wysokości pików powierzchni Sp niż dolin Sv , co z punktu widzenia funkcjonalności i tribologii danej powierzchni nie jest korzystne. Taka charakterystyka topografii powierzchni sprzyja wzrostowi współczynnika pustki Sp/Sz [123].

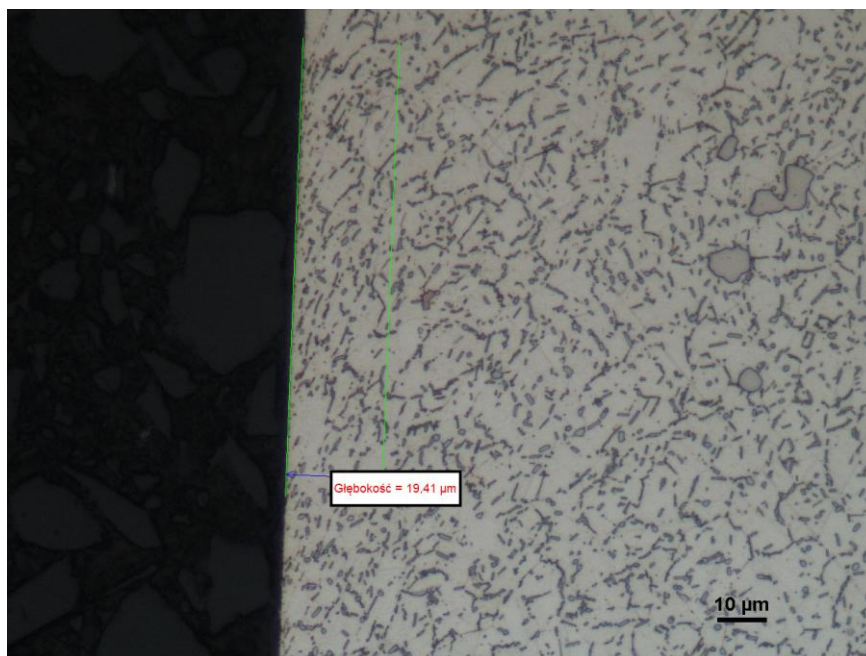
6.1.3 Badania mikrostruktury warstwy wierzchniej

Wytwarzane w wyniku procesu skrawania ciepło, jakie i obciążenie mechaniczne pochodzące od procesu obróbki zwykle zmieniają mikrostrukturę stopu w warstwie wierzchniej powodując jej odkształcenia. Deformacje te w połączeniu z wysoką temperaturą powodują naprężenia, w wyniku których mogą nastąpić mikropęknięcia materiału.

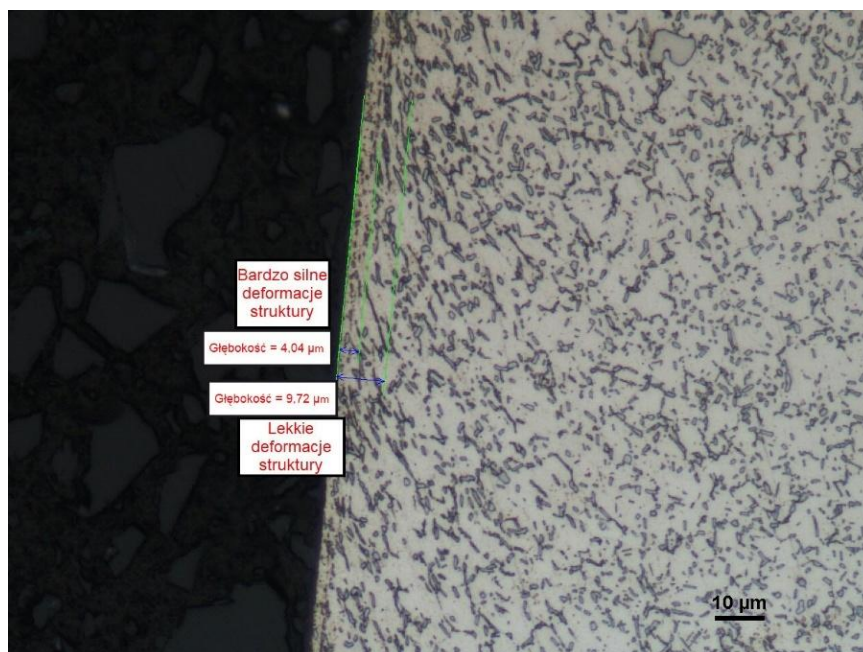
Analiza mikrostruktury wykazała, że zarówno obciążenie mechaniczne wywołujące odkształcenia plastyczne jak i ciepło wytworzone podczas obróbki wnikało w obrabiany materiał, powodując zmiany mikrostruktury w jego warstwie wierzchniej. W żadnym z przypadków nie stwierdzono umocnień poprzez zgniot. Natomiast należy zaznaczyć, że

przedstawione czynniki, które charakteryzują się największym wpływem na deformację ziaren stopu 718 w fundamentalnym stopniu uzależnione były od intensyfikującego się zużycia ostrza.

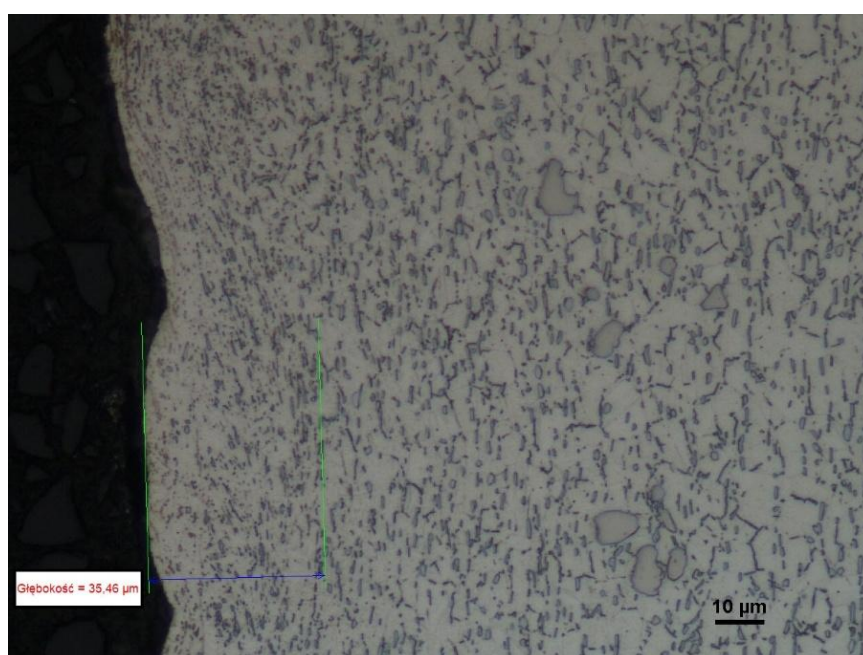
Niewątpliwie najmniejsze zmiany mikrostruktury warstwy wierzchniej nastąpiły dla powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką S205, które sięgają głębokości 19,41 μm , lecz ich charakter jest lekki (Rys. 6.15). Mikrostruktura warstwy wierzchniej, powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką 1105 prezentuje już nieco większe jej zmiany, które do głębokości 4,04 μm mają charakter poważnych deformacji, natomiast poniżej tej wartości do głębokości 9,7 μm , ich charakter jest lekki (Rys. 6.16). Może to wynikać z tego, że powłoka ta ma jednak mniejszą wytrzymałość w porównaniu do S205 co doprowadziło do powstania większej temperatury i naprężeń w strefie skrawania, które wywołały odkształcenia przekładające się na powstałą intensywność deformacji. Biorąc pod uwagę zmiany mikrostruktury powierzchni obrobionych ostrzami z powłoką S05F i 1115, należy zwrócić uwagę, że deformacje, które tutaj nastąpiły są niewątpliwie spowodowane przekroczeniem dopuszczalnego kryterium stępienia obu ostrzy. W przypadku mikrostruktury powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką S05F deformacje mają poważny charakter i sięgają do głębokości 35,46 μm (Rys. 6.17).



Rys. 6.15. Obraz mikrostruktury po toczeniu wzdłużnym powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką S205, po trawieniu

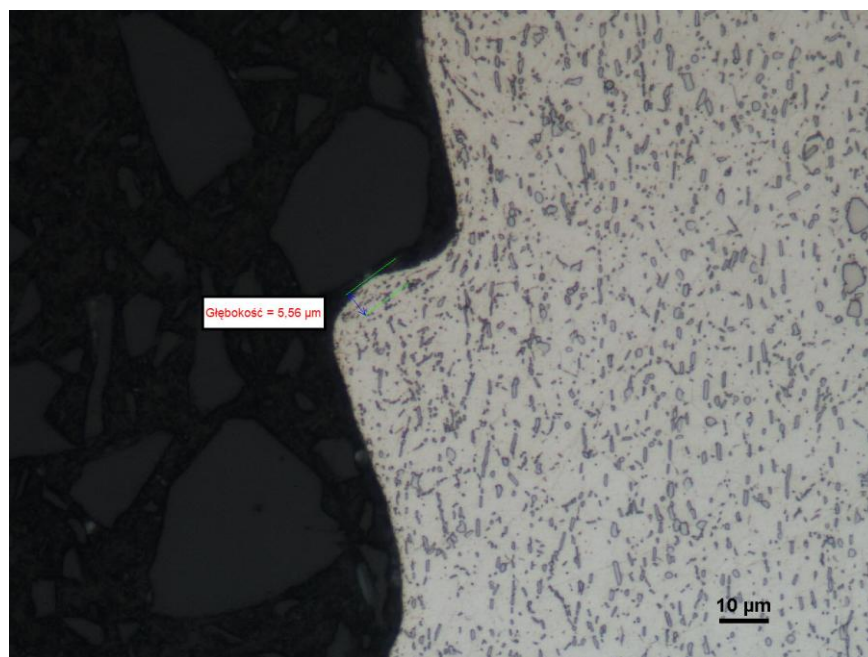


Rys. 6.16. Obraz mikrostruktury po toczeniu wzdłużnym powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką 1105, po trawieniu



Rys. 6.17. Obraz mikrostruktury po toczeniu wzdłużnym powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką S05F, po trawieniu

Zmiany mikrostruktury powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką 1115 sięgają głębokości $5,56\text{ }\mu\text{m}$ i również prezentują poważne zniekształcenie ziaren (Rys. 6.18). W przypadku powierzchni obrobionej ostrzem 1115 oprócz deformacji ziaren wystąpiły także mikrodrżania, które najprawdopodobniej były skutkiem przyspieszonego zużycia ostrza.



Rys. 6.18. Obraz mikrostruktury po toczeniu wzdłużnym powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką 1115, po trawieniu

Z oceny ostrzy S05F i 1115, których zużycie zostało przeanalizowane w rozdziale 6.1.1, jasno wynika, że nastąpiło katastroficzne zużycie ostrza co wpłynęło na uzyskane silne deformacje ziaren oraz mikrodrgania dla powierzchni obrobionych tymi ostrzami. Zupełnie zniszczona krawędź skrawająca w obu przypadkach i zwiększana stopniowo powierzchnia styku ostrza z materiałem obrabianym, powodowała tarcie i przepychanie materiału pogarszając proces skrawania.

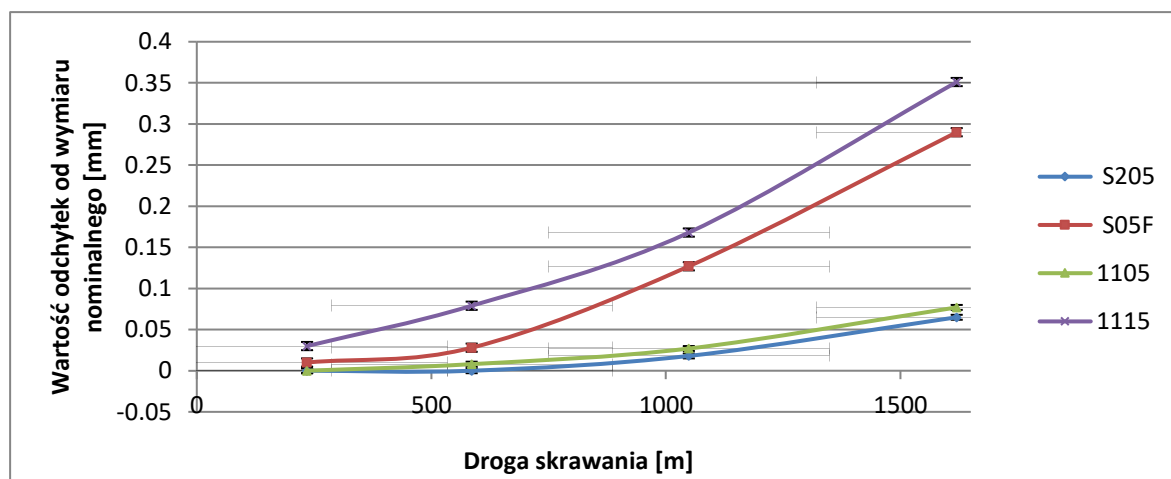
6.1.4 Ocena uzyskiwanych wymiarów na próbkach po toczeniu

Dokładność wymiarowa powierzchni obrobionej była oceniana w zależności od zastosowanej powłoki na ostrzu skrawającym a także zużycia samego ostrza. Uzyskane wymiary kontrolowano poprzez pomiar średnicy zewnętrznej mikrometrem elektronicznym. Ponieważ każde ostrze wykonało 14 przejść, więc otrzymano drogę skrawania równą 1620m [124]. Dla przyjętych warunków obróbki, czas pracy każdego narzędzia wynosił 19 min. Pomiaru średnicy dokonano nieprzypadkowo po przejściu 2, 5, 9 oraz 14 (Tab. 6.1). Analizując wpływ powłoki przeciwzużyciowej na dokładność wymiarową podczas toczenia wzdłużnego szczególnie w końcowym etapie obróbki można zauważyć, że w zakresie większych odporności na ścieranie powłoka S205 nanoszona metodą CVD zapewnia największą dokładność uzyskiwanych wymiarów.

Tabela 6.1. Wartości średnie wymiarów średnicowych uzyskanych podczas badań.

Numer przejścia narzędzia/Droga skrawania [m]	Wymiar nominalny [mm]	Ostrze z powłoką S205 [mm]	Ostrze z powłoką S05F [mm]	Ostrze z powłoką 1105 [mm]	Ostrze z powłoką 1115 [mm]
2/235	131,2	131,2 ± 0,002	131,21 ± 0,003	131,2 ± 0,002	131,23 ± 0,003
5/586	130	130 ± 0,002	130,028 ± 0,003	130,008 ± 0,002	130,079 ± 0,003
9/1049	128,4	128,418 ± 0,003	128,527 ± 0,004	128,427 ± 0,003	128,568 ± 0,004
14/1620	126,4	126,465 ± 0,003	126,69 ± 0,005	126,477 ± 0,003	126,751 ± 0,005

Należy jednak zaznaczyć, że jest to najnowsza powłoka opracowana przez firmę Sandvik, dedykowana przede wszystkim do obróbki stopów żaroodpornych. Dla powierzchni obrobionej ostrzem 1105 uzyskano nieco większą wartość odchyłki, chociaż jej poziom nie jest znaczny, zważywszy na drogę skrawania jaką ostrze pokonało (Rys. 6.19).



Rys. 6.19. Wartości odchyłek od wymiaru nominalnego w zależności od przebytej drogi skrawania

Powierzchnia uzyskana ostrzem S05F prezentowała większy poziom zanotowanej odchyłki od wymiaru zdanego, która wyniosła 0,29 mm, co jest związane bezpośrednio ze znacznym zużyciem ostrza.

Najmniejszą dokładność uzyskiwanych wymiarów otrzymano dla powierzchni obrobionej płytką z powłoką 1115 z zakresu mniejszych odporności na ścieranie nanoszonej metodą

PVD. Odchyłka od zadanego wymiaru w końcowym etapie obróbki wyniosła 0,351 mm. Ostrze tego narzędzia charakteryzowało się największym zużyciem ocenianym poprzez parametr V_{BC} . Odnosząc się do wykresu uzyskanych odchyłek na rysunku 6.19 można stwierdzić, że zużycie ostrzy S205 i 1105 wzrastało systematycznie w miarę upływu czasu obróbki. Dla ostrza S05F zużycie przebiegało również stopniowo do momentu drugiego punktu kontrolnego średnicy, natomiast potem nastąpiło znaczny przyrost zużycia co przyczyniało się do wzrostu odchyłki otrzymywanego wymiaru. W przypadku ostrza 1115 można jednoznacznie ocenić, iż od samego początku pracy następował przyspieszony wzrost zużycia co przekładało się na odbiegające wartości odchyłek dla poszczególnych punktów kontrolnych w porównaniu do odchyłek uzyskanych dla ostrzy S205 i 1105. W przypadku ostrzy S05F i 1115 nastąpiło cofnięcie krawędzi skrawającej w wyniku znaczącego zużycia ostrza, które bezpośrednio wpłynęło na wartości uzyskiwanych odchyłek.

6.1.5 Badania tribologiczne oraz pomiar mikrotwardości testowanych ostrzy

Badania tribologiczne powłok analizowanych płytek skrawających polegały na wykonaniu testu zarysowania na tribotesterze Bruker UMT2. Pomiaru geometrii rysy oraz obserwacja zjawisk tribologicznych wykonana została za pomocą mikroskopu profilometrycznego Alicona. W tabeli 6.2 przedstawiono rezultaty testów tribologicznych, w których do oceny zastosowano współczynnik tarcia μ przy obciążeniu narastającym 0,5 – 35 N. Porównawczo dla ostrza 1105 wykonano badania na ostrzu nowym i zużytym.

Tabela 6.2. Rezultaty testów tribologicznych (μ – współczynnik tarcia) przy obciążeniu 0,5 – 35 N (U – ostrze zużyte, N – ostrze nowe).

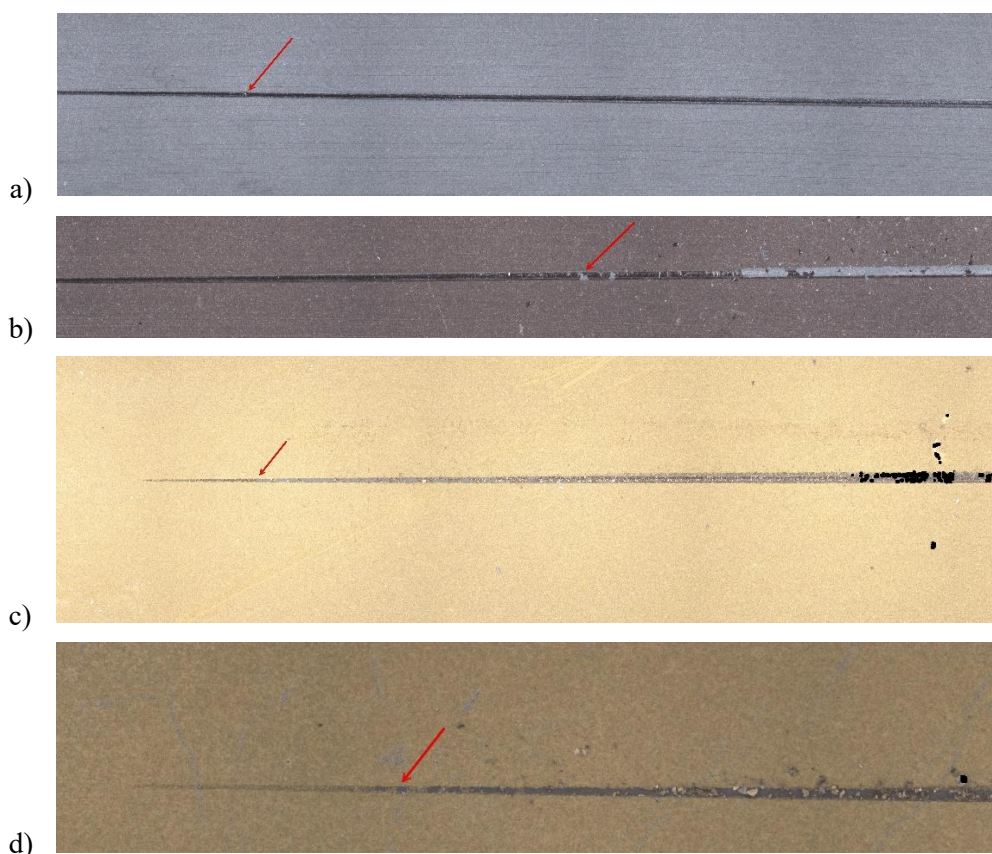
Ostrze	Pierwsze uszkodzenie [mm]	μ powłoka	μ po zerwaniu	Zagłębienie [mm]
1105U	3,94	0,1	0,22	0,465
1105N	2,92	0,1	0,2	0,248
1115	3,62	0,1	0,2	0,417
S05F	3,2	0,13	0,2	0,364
S205	2,94	0,12	0,19	0,255

W tabeli 6.3 podano rezultaty testów tribologicznych, które były przeprowadzone przy obciążeniu narastającym 0,5 – 15 N. Niestety dla niektórych powłok nie podano lokalizacji pierwszych uszkodzeń ze względu na trudności z ich wskazaniem.

Tabela 6.3. Rezultaty testów tribologicznych (μ – współczynnik tarcia) przy obciążeniu 0,5 – 15 N.

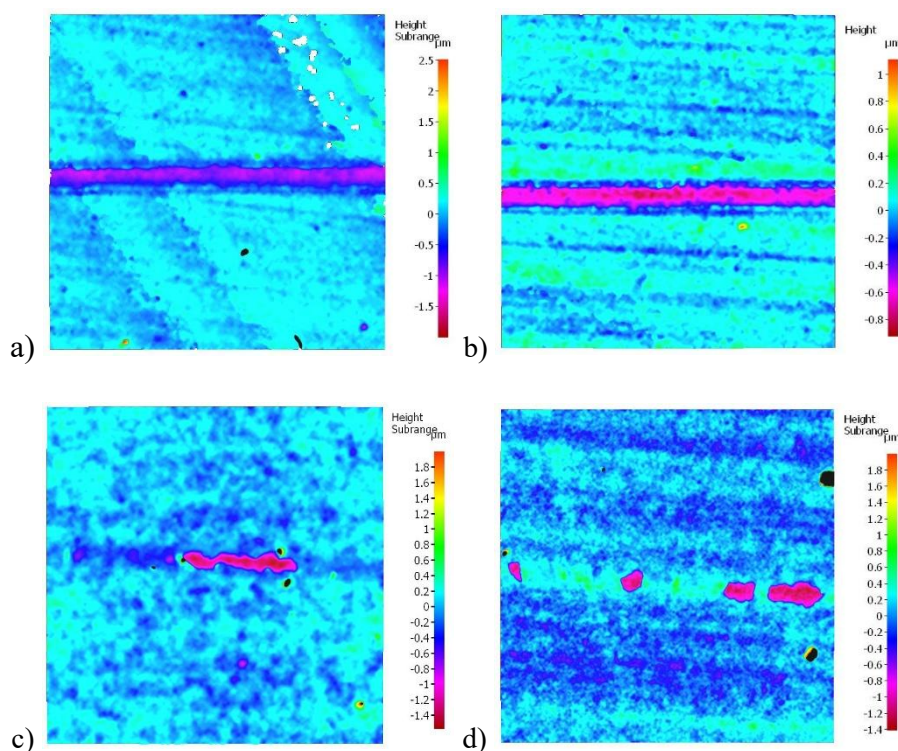
Ostrze	Pierwsze uszkodzenie [mm]	μ powłoka	μ po zerwaniu	Zagłębienie maksymalne [mm]
1105U	-	0,1	0,13	0,244
1105N	-	0,1	0,15	0,037
1115	-	0,1	0,15	0,207
S05F	2,3	0,12	0,16	0,151
S205	1,77	0,12	0,16	0,1

Na rysunku 6.20 przedstawiono mikroskopowe widoki powierzchni rys dla badania pod obciążeniem przyrostowym 0,5 – 35 N. Na zaprezentowanych obrazach czerwoną strzałką wskazano początek występowania dekohezji powłoki.



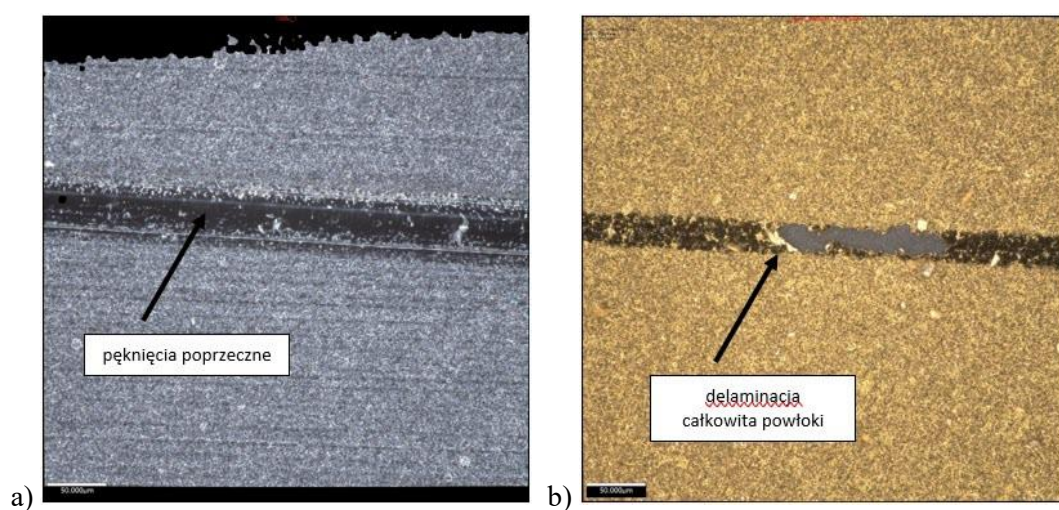
Rys. 6.20. Mikroskopowe widoki powierzchni rys dla badania pod obciążeniem przyrostowym 0,5 – 35 N: a) ostrze 1105N, b) ostrze 1115, c) ostrze S05F, d) ostrze S205

Natomiast na rysunku 6.21 przedstawiono topografie powierzchni rys dla próbek: 1105N, 1115, S05F i S205 badanych pod obciążeniem przyrostowym 0,5 – 15 N.



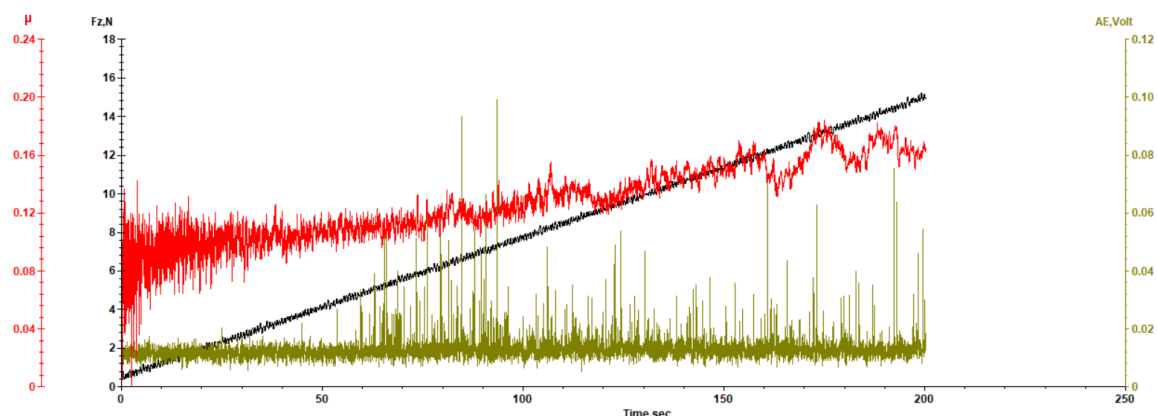
Rys. 6.21. Topografia powierzchni rys dla badania pod obciążeniem przyrostowym 0,5 – 15 N
próbek: a) ostrze 1105N, b) ostrze 1115, c) ostrze S05F, d) ostrze S205

Obserwacje topografii rys, wskazują na podział próbek na dwie grupy: 1105N, 1105U, 1115 – gdzie dochodzi do deformacji zarówno powłoki jak i substratu/podłoża przy braku dekohezyjnych uszkodzeń oraz S05F i S205 – gdzie obserwowane są wyraźne efekty dekohezyjne. Dla grupy pierwszej dominują pęknięcia, zaś dla drugiej delaminacja. Na rysunku 6.22 pokazano opisane wady na przykładzie ostrza 1105 i S05F.



Rys. 6.22. Zbliżenia rys z widocznymi defektami powstałymi w wyniku zarysowania: a) ostrze 1105N, b) ostrze S05F

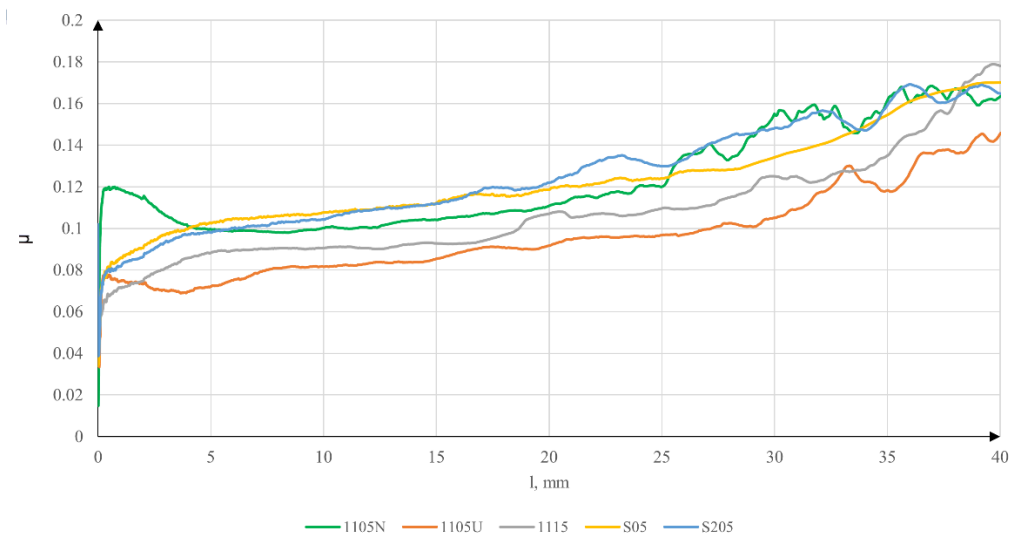
Na rysunku 6.23 przedstawiono przykładowy przebieg zmian siły F_x oraz sygnału akustycznego wraz ze wzrostem obciążenia w jednostce czasu dla próbki S205. Zauważalny jest wzrost wartości sygnału emisji akustycznej AE, któremu towarzyszy wzrost fluktuacji wartości współczynnika tarcia μ . Wzrost fluktuacji świadczy o potencjalnych, stopniowych uszkodzeniach powłoki, duże wartości pików sygnału AE są efektem propagacji pęknięć poprzecznych do ruchu intendera.



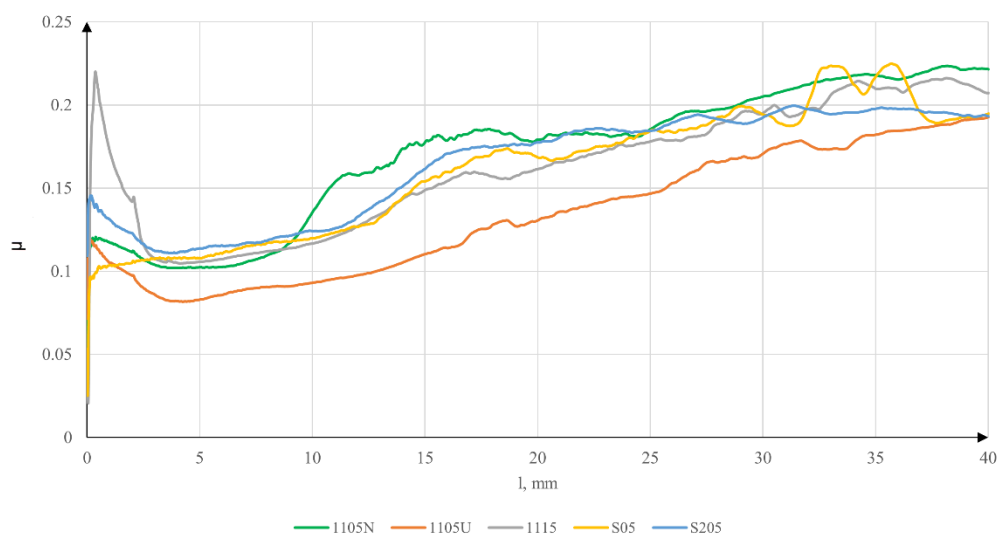
Rys. 6.23. Przykładowy przebieg zmian siły F_x oraz sygnału akustycznego wraz ze wzrostem obciążenia w jednostce czasu – próbka S205

Uśredniony przebieg zmian μ na rysunkach 6.24 i 6.25 wskazuje, na występowanie uszkodzeń każdej z powłok. W każdym przypadku na dystansie ok $\Delta l = 3$ mm, dochodzi do stabilizacji współczynnika, która jest wynikiem kształtowania się powierzchni kontaktowej powłoka-intender. Krótki przedział stabilizacji: rysunek 6.24 – $\Delta l = 5$ do 20 mm oraz rysunek 6.25 – $\Delta l = 3$ do 8 mm, sugeruje wytworzenie się filmu tribologicznego pomiędzy parą kontaktową i zachodzenie reakcji tribochemicznych. Na dalszych dystansach zauważalny jest wzrost μ , który jest efektem wzrostu naprężeń lokalnych, które zaczynają propagować w głąb interfejsu powłoka-substrat. Potencjalnie dalsze uszkodzanie powłoki spowodowałoby jej całkowite zerwanie i stabilizację μ na poziomie zgodnym z parą tribologiczną intender-substrat.

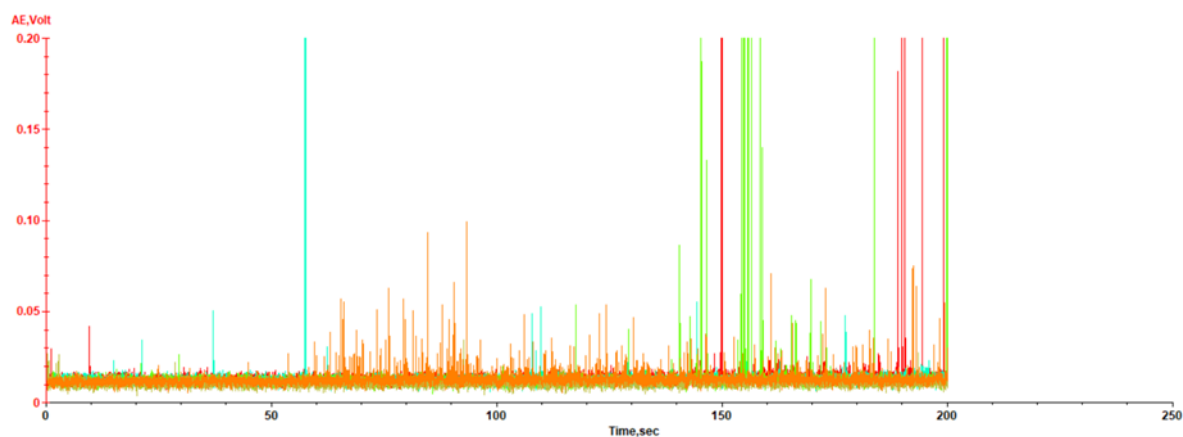
Analiza emisji sygnału akustycznego wskazuje na występowanie licznych pęknięć i uszkodzeń powłoki już od początku kontaktu z obciążającym wgłębnikiem dla ostrzy S05F i S205. Wartości sygnału intensyfikują się wraz ze wzrostem obciążenia. W przypadku powłok 1105N, 1105U, 1115 pojawiają się także lokalne piki sygnału świadczące o powstawaniu pęknięć w efekcie wyboczenia powłoki (Rys. 6.26).



Rys. 6.24. Przebieg zmian wartości μ dla testu z obciążeniem 0,5 – 15 N



Rys. 6.25. Przebieg zmian wartości μ dla testu z obciążeniem 0,5 – 35 N



Rys. 6.26. Przebieg zmian wartości AE dla testu z obciążeniem 0,5 – 15 N

Testy zarysowania wskazują, że wszystkie z badanych powłok posiadają zbliżone właściwości tribologiczne (μ):

- wszystkie powłoki ulegają uszkodzeniu przy zbliżonych wartościach naprężeń,
- brak dekohezji powłok 1105N, 1105U, 1115 sugeruje ich znacznie lepszą adhezję do substratu w stosunku do S05F i S205.

Przebiegi zarysowania różnią się w znaczącym stopniu charakterem niszczenia powłoki w skutek oddziaływania wysokich naprężeń, generowanych w tym przypadku przez węgelnik diamentowy:

- próbki powłok S05F i S205U ulegają całkowitej dekohezji – pęknięcia ścinające wywołane naprężeniami ściskającymi, powodują delaminację twardej powłoki TiN ($36,7 \pm 1,8$ GPa) od podłoża,
- próbki powłok 1105N i 1105U ulegają pękaniu konforemnemu, w którym to powierzchnia adhezyjna próbki i podłoża ulega lokalnym uszkodzeniom widocznym pod postacią pęknięcia, potencjalnie niższa twardość powłoki CrN ($25,1 \pm 1,2$ GPa) skutkuje jej podatnością na odkształcenia.

Próbka 1115 wskazuje na zbliżone właściwości powłoki do próbek S05F i S205 pod względem dekohezji, ale zaobserwowano również występowanie łuszczenia wzdłuż krawędzi zewnętrznych, podobnie jak powłoki 1105N i 1105U.

Na ostrzach użytych do badań dokonano również pomiaru mikrotwardości naniesionych powłok. Do tego celu użyto nanotwardościomierz Picodentor Fischer HM500, którego zakres obciążenia wynosi 0,005 – 500 mN, natomiast zakres badanej twardości jest równy 0,001 – 120000 N/mm². Wartości średnie mikrotwardości powłok wynosiły:

- 1115 – 2574,14 *HV*
- 1105 – 1978,81 *HV*
- S05F – 1777,09 *HV*
- S205 – 1614,83 *HV*

Na rysunku 6.27 przedstawiono wyniki mikrotwardości wraz z wartościami maksymalnymi i minimalnymi. Pomiaru dokonano w pięciu miejscach i oceniono według normy ISO 14577.

WIN-HCU®	DIN 50 359 / ISO 14577	Fischer®
Nr bloku: 1	WYNIK BLOKU	2022-09-28 13:03:46
Aplikacja: 1105-N.hap	Operator: Admin	
	HM	EIT/ (1-ν^2) HV Wt nplast CITI Podatność HIT
	[N/mm ²]	[GPa]
	[J]	[μJ]
	[%]	[%]
	[μm/N]	[N/mm ²]
Wartość średnia x.:	12454.07	419.56
Przedział ufnocień:	841.96	30.45
Odch. standardowe:	678.06	24.52
Wsp. zmienności / V:	5.44	5.86
Liczba wartości p n: ar	5	5
Najmniejsza wartość:	11893.4	392.8
Największa wartość:	13312.9	459.2
Rozstęp R:	1419.5	66.4
Rozstęp/4	R/4:	11.40
	15.87	14.64
	28.88	28.74
	48.33	8.30
	14.64	

a)

WIN-HCU®	DIN 50 359 / ISO 14577	Fischer®
Nr bloku: 1	WYNIK BLOKU	2022-10-05 12:10:50
Aplikacja: 1115.hap	Operator: Admin	
	HM	EIT/ (1-ν^2) HV Wt nplast CITI Podatność HIT
	[N/mm ²]	[GPa]
	[J]	[μJ]
	[%]	[%]
	[μm/N]	[N/mm ²]
Wartość średnia x.:	15536.85	516.16
Przedział ufnocień:	1913.56	57.45
Odch. standardowe:	1541.05	46.27
Wsp. zmienności / V:	9.92	8.96
Liczba wartości p n: ar	5	5
Najmniejsza wartość:	13552.0	463.0
Największa wartość:	17345.1	580.8
Rozstęp R:	3793.1	117.7
Rozstęp/4	R/4:	24.41
	22.81	29.11
	7.57	5.88
	20.29	3.36
	29.11	

b)

WIN-HCU®	DIN 50 359 / ISO 14577	Fischer®
Nr bloku: 1	WYNIK BLOKU	2022-09-23 12:37:39
Aplikacja: S05F.hap	Operator: Admin	
	HM	EIT/ (1-ν^2) HV Wt nplast CITI Podatność HIT
	[N/mm ²]	[GPa]
	[J]	[μJ]
	[%]	[%]
	[μm/N]	[N/mm ²]
Wartość średnia x.:	11805.26	457.69
Przedział ufnocień:	3873.98	141.81
Odch. standardowe:	3119.84	114.21
Wsp. zmienności / V:	26.43	24.95
Liczba wartości p n: ar	5	5
Najmniejsza wartość:	6988.5	282.6
Największa wartość:	14981.6	573.7
Rozstęp R:	7993.1	291.1
Rozstęp/4	R/4:	67.71
	63.59	76.40
	25.59	12.80
	21.73	9.40
	76.40	

c)

WIN-HCU®	DIN 50 359 / ISO 14577	Fischer®
Nr bloku: 1	WYNIK BLOKU	2022-09-28 15:33:15
Aplikacja: S205-N.hap	Operator: Admin	
	HM	EIT/ (1-ν^2) HV Wt nplast CITI Podatność HIT
	[N/mm ²]	[GPa]
	[J]	[μJ]
	[%]	[%]
	[μm/N]	[N/mm ²]
Wartość średnia x.:	11014.21	432.87
Przedział ufnocień:	1084.06	31.04
Odch. standardowe:	873.03	25.00
Wsp. zmienności / V:	7.93	5.77
Liczba wartości p n: ar	5	5
Najmniejsza wartość:	10119.8	402.0
Największa wartość:	12428.4	465.4
Rozstęp R:	2308.6	63.4
Rozstęp/4	R/4:	20.96
	14.65	26.58
	23.54	13.94
	49.47	11.15
	26.58	

d)

Rys. 6.27. Wyniki pomiaru mikrotwardości powłok badanych ostrzy: a) 1105, b) 1115, c) S05F, d) S205

6.1.6 Wnioski z badań wstępnych

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Na dokładność uzyskiwanych wymiarów oraz jakość otrzymywanej powierzchni ocenianą parametrami 2D i 3D, a także poprzez badanie mikrostruktury warstwy

wierzchniej największy wpływ ma zużycie zastosowanego ostrza podczas toczenia stopu Inconel 718.

2. Przeprowadzone badania nie dały jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, która z metod nanoszenia powłoki ma korzystniejszy wpływ na trwałość narzędzia. Zarówno ostrza 1105 i S205 osiągnęły podobny poziom zużycia oceniony wskaźnikiem VB_C .
3. Podczas toczenia stopu Inconel 718 rodzaj zastosowanej powłoki ostrza oraz jego poziom odporności na ścieranie ma największy wpływ na charakter i wielkość zużycia ostrza, szczególnie gdy wymagana jest długa droga skrawania. Pomiary wskaźnika zużycia VB_C pokazały, że najbardziej wytrzymałe jest ostrze z powłoką S205, natomiast powłoka 1105 również prezentuje bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe. Duże zużycie zarejestrowano dla ostrza z powłoką S05F, które również charakteryzuje się dużą odpornością na ścieranie, nie mniej jednak przyjęta w badaniach wartość prędkości skrawania mogła być dla tej powłoki zbyt wysoka. Największe zużycie zarejestrowano dla ostrza z powłoką 1115 co jest zasadne ponieważ powłoka ta charakteryzuje się mniejszą odpornością na ścieranie. Wysoka wartość prędkości skrawania oraz długa droga skrawania w połączeniu z bardzo ostrą krawędzią skrawającą przyczyniły się do szybko wzrastającego zużycia ostrza.
4. Najmniejsze średnie wartości parametrów chropowatości R_a i S_a uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką S205. Największe wartości tych parametrów uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką 1115.
5. Analiza mikrostruktury warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej pokazuje, że najmniejszą głębokość deformacji ziaren mającą lekki charakter uzyskano również dla powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką S205. Najgłębsze zniekształcenie ziaren mające poważny charakter wystąpiło na powierzchni obrobionej ostrzem z powłoką S05F.
6. Należy zauważyć, że wartość chropowatości powierzchni nie zawsze odzwierciedla deformację ziaren w mikrostrukturze warstwy wierzchniej. Powierzchnia obrobiona, dla której zarejestrowano największe wartości parametrów chropowatości nie odznaczała się największą deformacją ziaren.
7. Zaobserwowano, iż mikrotwardość naniesionych powłok przeciwzużyciowych na ostrza skrawające nie jest jedynym czynnikiem determinującym odporność na ścieranie podczas skrawania materiału Inconel 718.

8. Większa wartość współczynnika tarcia μ w przypadku powłoki S05F mogła być przyczyną przyspieszonego zużycia tego ostrza pomimo jego zwiększonej odporności na ścieranie.

6.2. Badania zasadnicze przeprowadzone na próbkach oraz na niezgodnych częściach produkcyjnych

Wyniki badań podstawowych pokazały, że do dalszych testów należy wykorzystać ostrza wykonane z węglików spiekanych z obszaru największej odporności na ścieranie. Zostały zatem wytypowane płytki skrawające zarekomendowane przez pięciu producentów narzędzi: Sandvik, Kennametal, Walter, Mitsubishi oraz Iscar. Wyselekcjonowano płytki w kształcie V o pozytywowej geometrii, kierując się z jednej strony stosunkowo małymi oporami skrawania, z drugiej strony toczeniem profilu na części produkcyjnej wymagającego zagłębiania się ostrza. Zasadnicza część prac badawczych dotyczyła analizy wpływu wysięgu zastosowanej oprawki narzędziowej na dokładność wymiarową, jakość powierzchni oraz zużycie ostrza podczas toczenia wykończeniowego stopu Inconel 718. Prace badawcze były prowadzone równolegle na tych samych próbkach materiału przy takich samych warunkach skrawania z zastosowaniem standardowej oprawki Capto oraz oprawki antywibracyjnej do toczenia powierzchni wewnętrznej.

Badania zasadnicze podzielono na trzy etapy:

Etap I – wykonanie badań porównawczych z zastosowaniem płytek skrawających od pięciu producentów narzędzi z wykorzystaniem oprawki o standardowym wysięgu i wysięgu $10 \times D$, na próbkach materiału Inconel 718. Oceniono zużycie ostrza, dokładność uzyskiwanych wymiarów, chropowatość i topografię powierzchni a także mikrostrukturę warstwy wierzchniej.

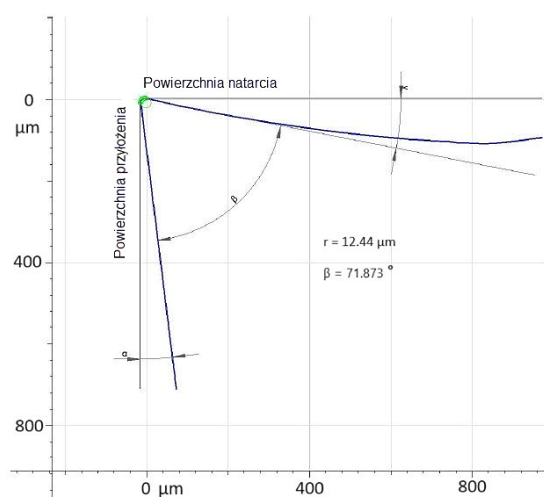
Etap II – wykonanie badań trzema ostrzami, dla których uzyskano najlepsze wyniki w pierwszym etapie badań zasadniczych z wykorzystaniem oprawki antywibracyjnej o wysięgu $10 \times D$ na niezgodnych częściach produkcyjnych. Ocenie poddano uzyskiwaną dokładność wymiarową oraz jakość powierzchni definiowaną parametrami chropowatości.

Etap III – wdrożenie do produkcji rozwiązania narzędziowego, dla którego uzyskano najlepsze rezultaty w drugim etapie badań zasadniczych. Testy wybranej aplikacji narzędziowej na drugim zakresie parametrów skrawania. Badanie wpływu ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej na mikrostrukturę warstwy wierzchniej. Oceniono dokładność uzyskiwanych wymiarów, chropowatość powierzchni oraz mikrostrukturę warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej.

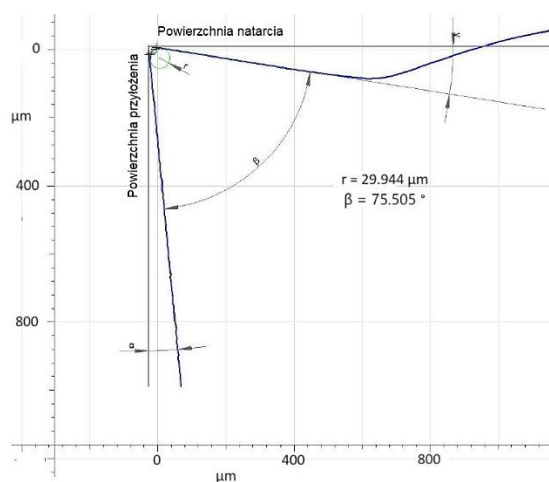
W etapie I wykorzystano standardową oprawkę typu Capto C6–SVHBL–45065–16HPA o wysięgu 120 mm. Natomiast we wszystkich etapach badań zasadniczych zastosowano oprawkę antywibracyjną S–570–3C–70/80–1053–40CR, połączoną z główką SL–SVLBL–40–16HP o wysięgu 700 mm. Narzędzia te przeznaczone są odpowiednio do obróbki powierzchni zewnętrznych i otworów. W przypadku narzędzia o długim wysięgu, chcąc skompensować występujące na nim ugięcie, po założonej płytce każdorazowo narzędzie zostało mierzone automatycznie na sondzie do pomiaru narzędzi, w którą wyposażona jest obrabiarka. Ponadto po wykonaniu pierwszego przejścia, dodatkowo sprawdzono zgodność otrzymanego wymiaru z wymiarem zaprogramowanym, w sytuacji rozbieżności skorygowano geometrię narzędzia. Podczas badań wykonywanych na próbkach materiału każdą płytką przy użyciu obu oprawek wykonano 14 przejść o długościach w zakresie 74 – 35 mm, zależnie od oprawki, których sumaryczna długość odzwierciedla wymaganą, spiralną drogę skrawania jednego przejścia narzędzia wynoszącą 1600 m. Dla każdego narzędzia, pracującego w poszczególnej oprawce zostały wykonane 4 pomiary uzyskanych średnic po nieprzypadkowo określonych przejściach, co również odzwierciedla punkty kontrolne dla powierzchni obrobionej części produkcyjnej, której drogę skrawania ostrza odwzorowano. Podczas I etapu badań zasadniczych na próbkach materiału strategia przejść narzędzia była zaplanowana w taki sposób, aby po osiągnięciu drogi skrawania dla danego punktu kontrolnego, następne toczenia były wykonywane na skracanym odcinku, w celu możliwości wykonania pomiarów średnic, chropowatości i topografii powierzchni.

6.2.1 Ocena zużycia ostrzy po toczeniu wzdłużnym powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej próbek materiału

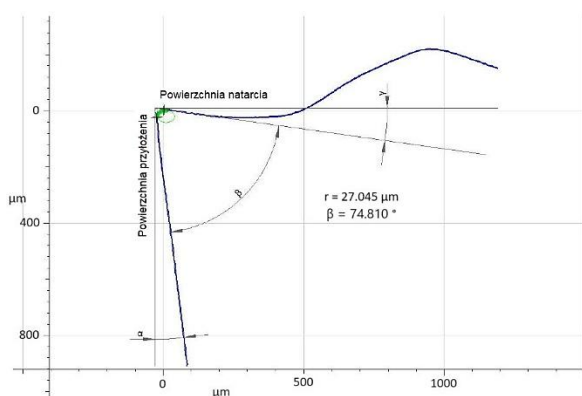
Oceniając wpływ wysięgu zastosowanej oprawki narzędziowej na wielkość i charakter zużycia ostrza należy zaznaczyć, że każde z testowanych narzędzi skrawało około 19 min. W przypadku materiału Inconel 718 taki czas pracy przekracza podstawowe rekomendacje dla trwałości ostrza równej 15 min, którą sugerują producenci narzędzi skrawających. Należy zauważyć, że na trwałość narzędzia, oprócz jego sztywności, mają także wpływ rodzaj i metoda nanoszenia powłoki ostrza, jak również jego mikrogeometria, którą przedstawiono dla badanych narzędzi na rysunku 6.28. Rozpatrując szerokość starcia powierzchni przyłożenia, oceniane parametrem VB_C , a także widok samego ostrza, można zauważyć znaczną różnicę pomiędzy narzędziami, pracującymi w oprawkach o różnej sztywności (Rys. 6.29).



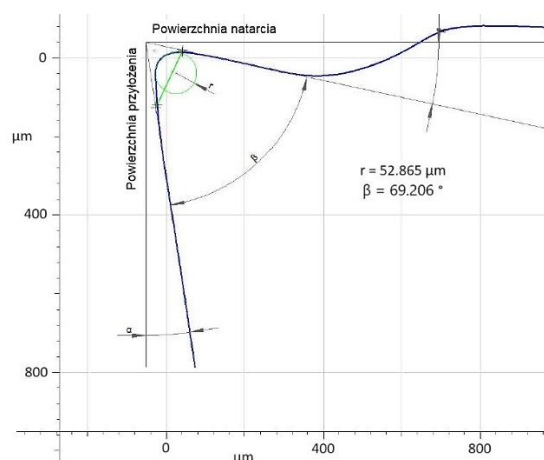
a)



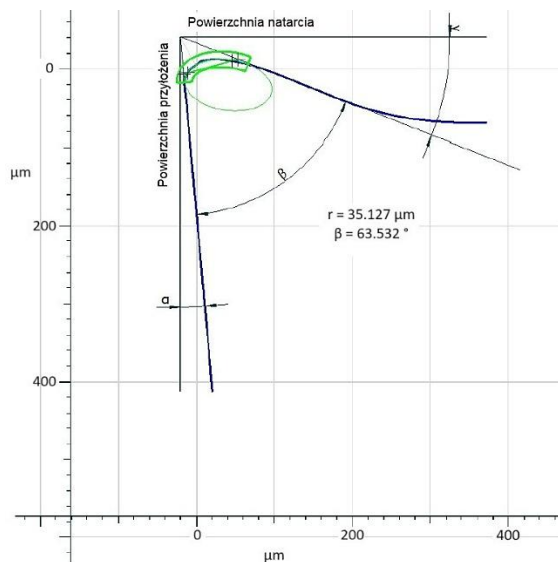
b)



c)

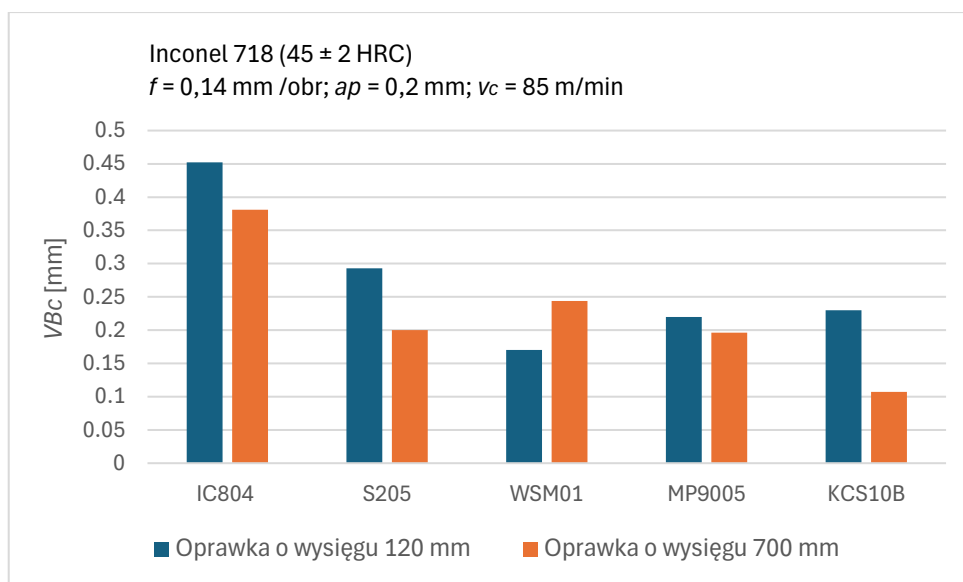


d)



e)

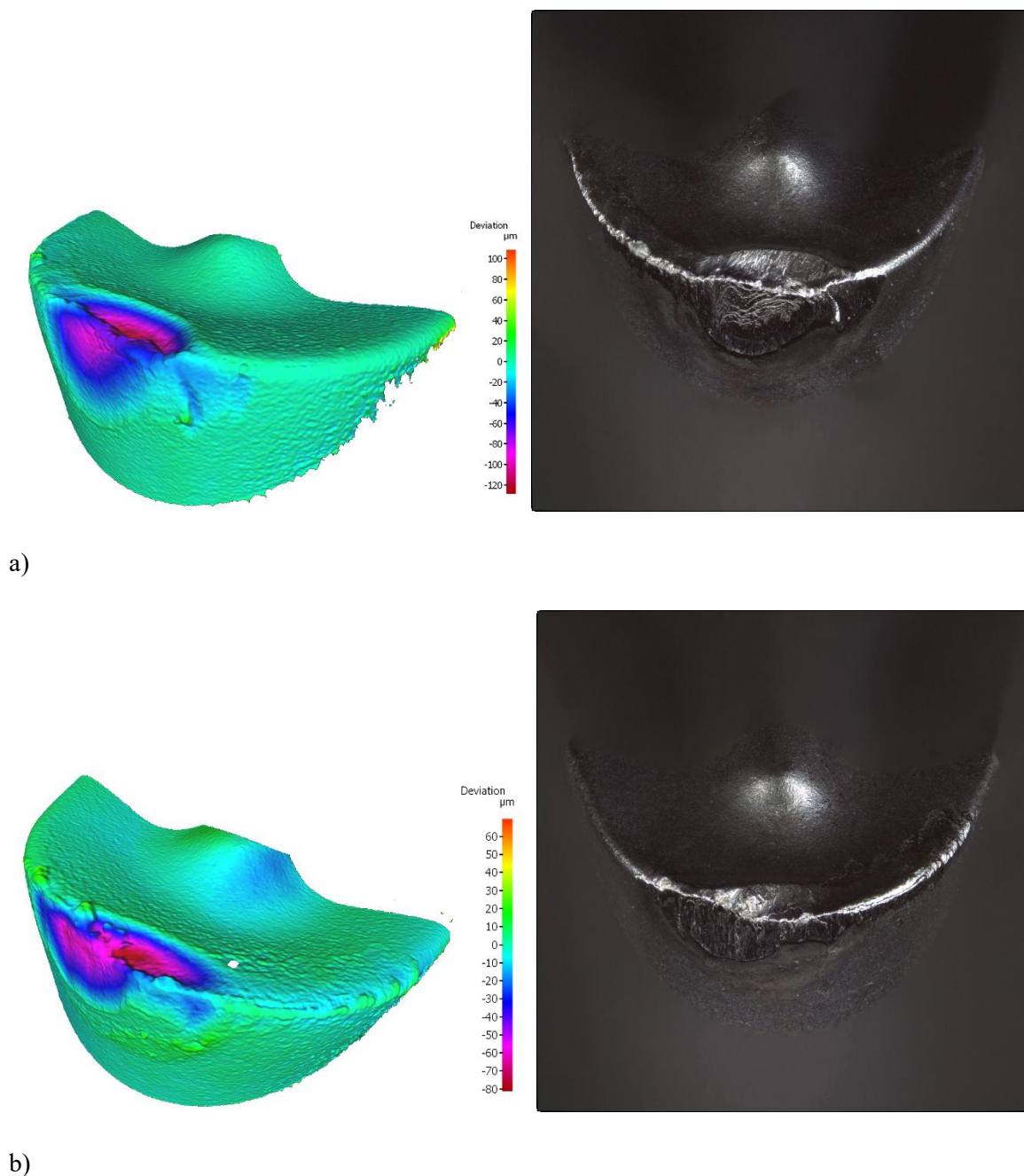
Rys. 6.28. Porównanie mikrogeometrii nowych ostrzy skrawających ze szczególnym uwzględnieniem promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n : a) ostrze płytki VCGT 160408 – MM4 WSM01 (Walter) $r_n = 12,44 \mu\text{m}$, b) ostrze płytki VBGT 160408LF KCS10B (Kennametal) $r_n = 29,944 \mu\text{m}$, c) ostrze płytki VBMT 160408 – LS MP9005 (Mitsubishi) $r_n = 27,045 \mu\text{m}$, d) ostrze płytki VCMT 160408 – SM IC804 (Iscar) $r_n = 52,865 \mu\text{m}$, e) ostrze płytki VBGT 160408 – UM S205 (Sandvik) $r_n = 35,127 \mu\text{m}$



Rys. 6.29. Wpływ wysięgu oprawki narzędziowej na wskaźnik zużycia VB_C naroży płytek skrawających po toczeniu wykończeniowym stopu Inconel 718

Największą wartość szerokości starcia na powierzchni przyłożenia dla ostrzy pracujących w oprawce o wysięgu 120 mm zarejestrowano dla płytki IC804, dla której $VB_C = 0,452 \text{ mm}$.

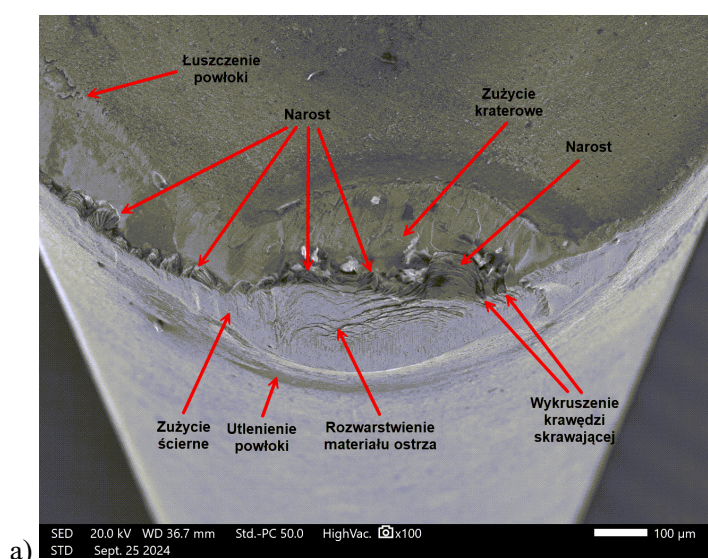
W przypadku oprawki o wysięgu 700 mm, dla tego ostrza również zanotowano największą wartość parametru VB_C , który jest równy $VB_C = 0,381$ mm (Rys. 6.30).

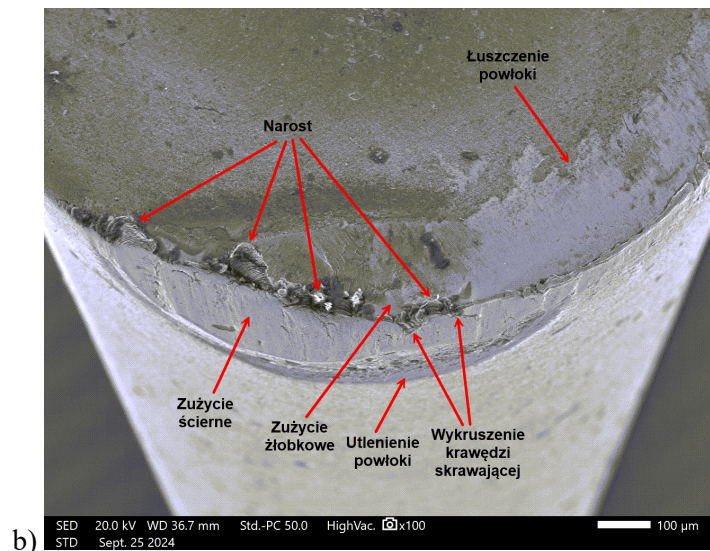


Rys. 6.30. Topografia krawędzi skrawającej oraz widok zużytego ostrza płytki VCMT 160408 – SM IC804 po 19 min obróbki: a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

Przyczyną tak dużej degradacji krawędzi skrawającej jest niewątpliwie wysoka wartość prędkości skrawania [85], co w połączeniu z wymaganą drogą skrawania przyczyniło się do ściernego i wytrzymałościowego zużycia ostrza. Stwierdzenie to jest zgodne z wynikami badań przeprowadzonymi przez Hao i innych [98]. Autorzy w swojej pracy udowodnili, że

zwiększenie prędkości skrawania do wartości 45 m/min skutkuje uszkodzeniem smarującego filmu tlenkowego, co powoduje powstanie dużej ilości pozostałości zużytego materiału ostrza. Następnie w materiale podłoża narzędzia wystąpiła reakcja utleniania się wolframu (W) i kobaltu (Co). Powstałe tlenki osłabiły siłę adhezji pierwiastka kobaltu (Co) oraz zmniejszyły wytrzymałość narzędzia. Należy zaznaczyć, że powłoka tego ostrza jest powłoką o mniejszej grubości, nanoszoną metodą PVD i pomimo dość dużej wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej dla tej płytki, który wynosił $r_n = 52,865 \mu\text{m}$, ostrze nie zachowało wymaganej wytrzymałości w wysokich temperaturach. Trzeba wziąć pod uwagę, iż ostrze to ma większy kąt przyłożenia, co również mogło wpłynąć na jego odporność na zużycie. Na płycie wystąpił znaczny ubytek krawędzi skrawającej, na której zarejestrowano wyszczerbienia i wykruszenia. Zaobserwowano również zjawisko złuszczenia i utlenienia powłoki, widoczne na powierzchni natarcia i przyłożenia (Rys. 6.31). Na ostrzach pracujących w obu oprawkach powstało wyżłobienia na powierzchni natarcia w wyniku spływającego wióra. Występują także znaczne ilości przytwierdzonego materiału w postaci narostu na każdym z ostrzy, co świadczy o ewolucji zużycia adhezyjnego. W przypadku ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 120 mm, wystąpiło na tyle duże wytrzymałościowe zużycie ostrza, że wysoka temperatura wywołana tarcie powierzchni przyłożenia o powierzchnię obrobioną doprowadziła do inicjalizacji zjawiska rozwarstwienia materiału ostrza. Biorąc pod uwagę względy jakościowe, można zauważyć, że tak duża degradacja ostrzy przełożyła się negatywnie na uzyskaną dokładność wymiarową oraz jakość powierzchni.

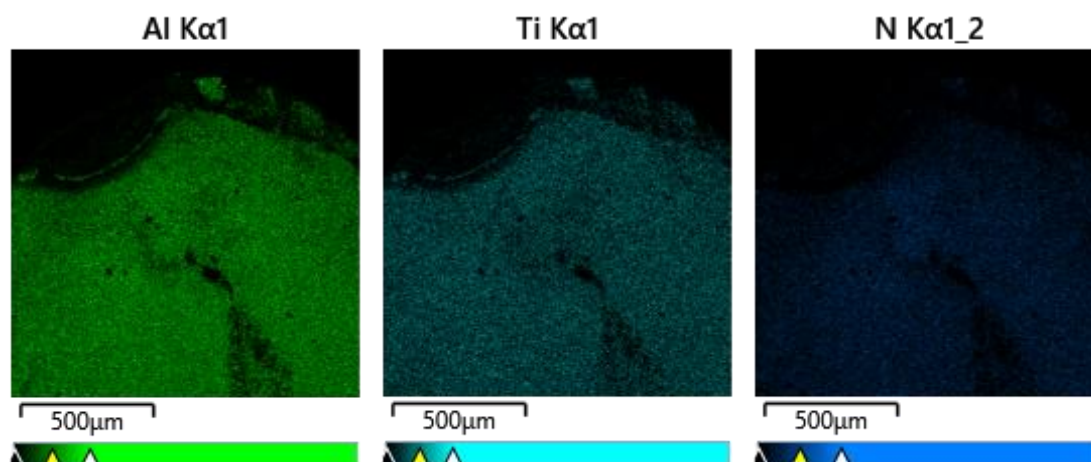


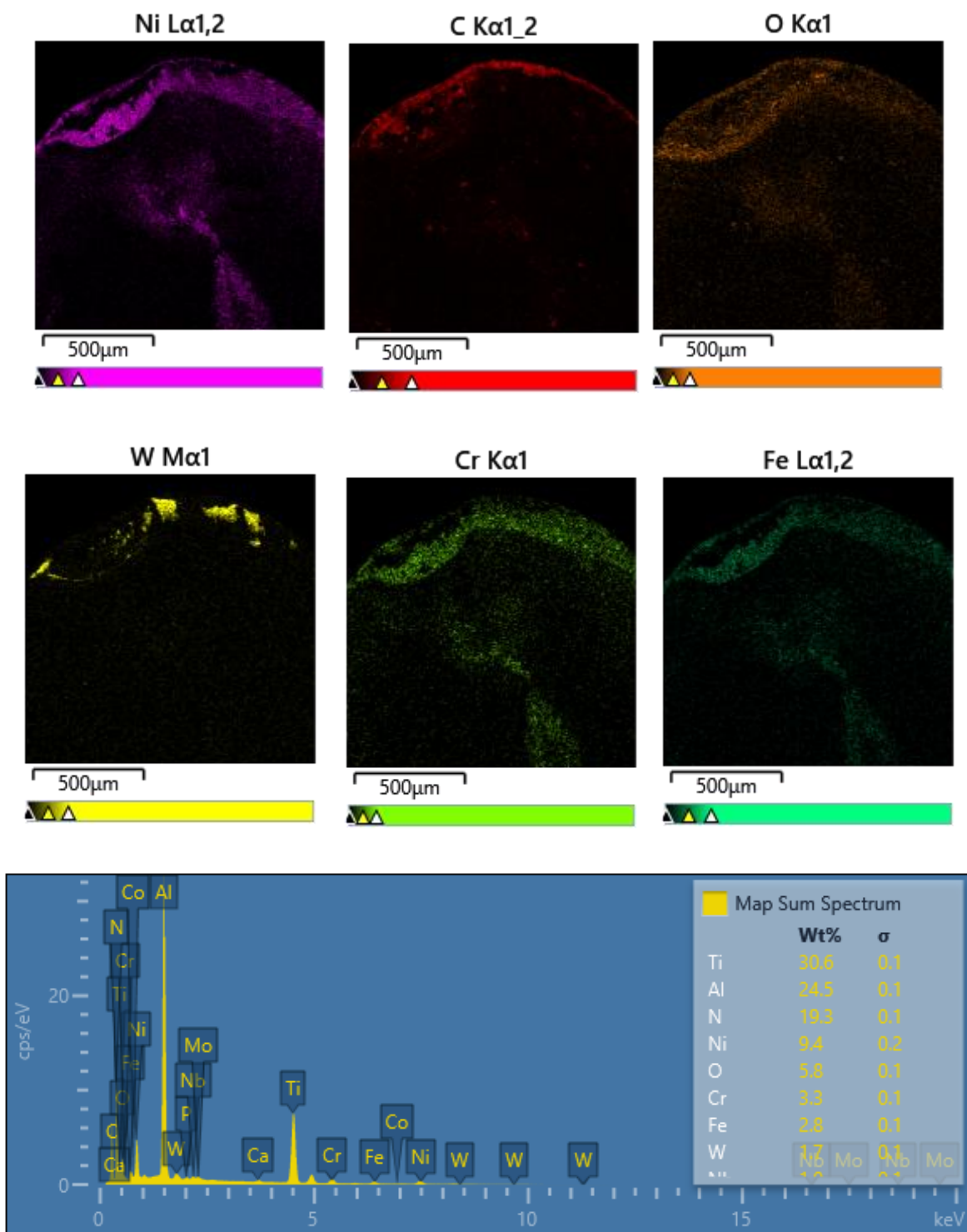


Rys. 6.31. Obrazy SEM zużytych ostrzy płytki VCMT 160408 – SM IC804 po 19 min obróbki:

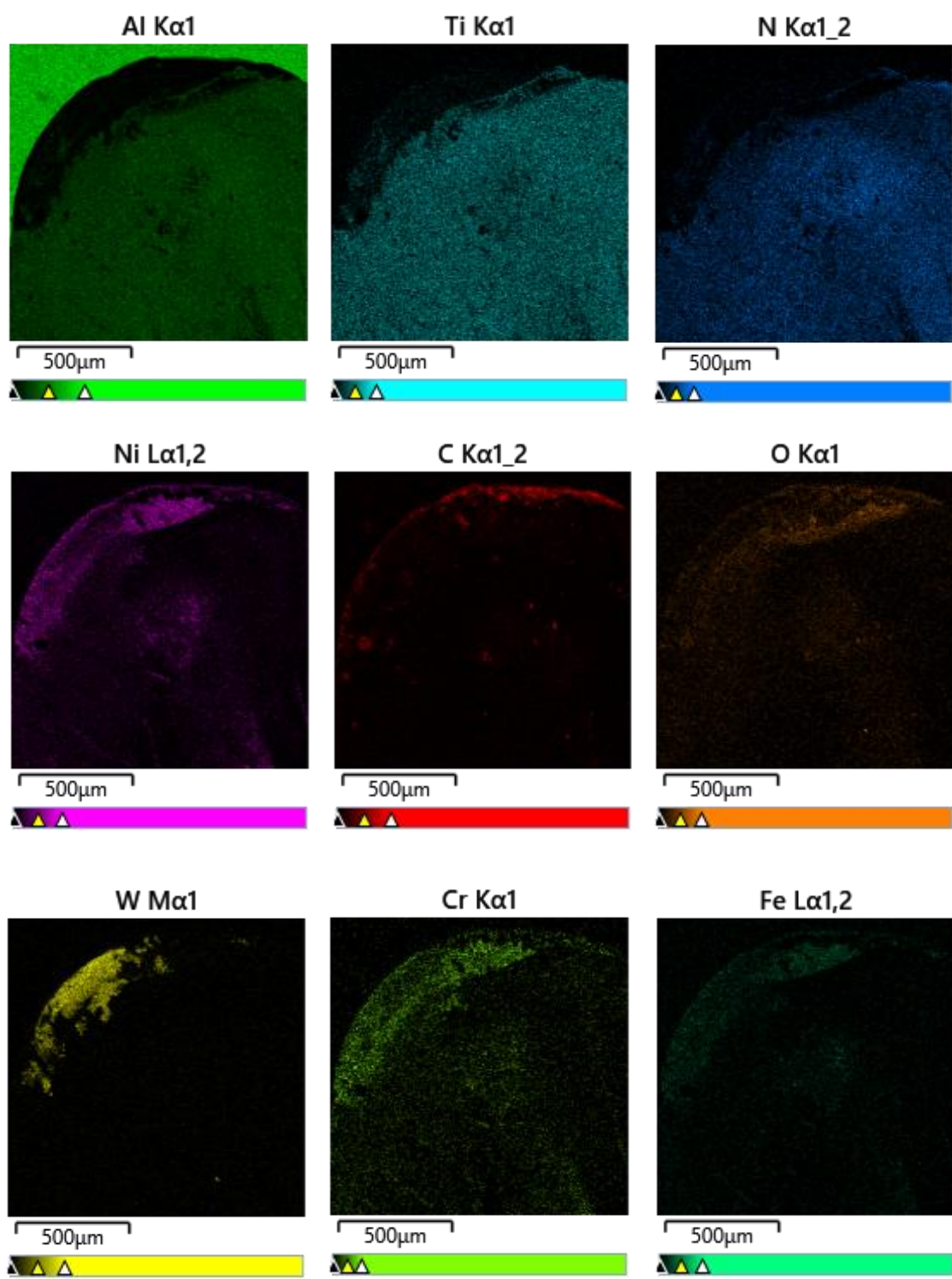
a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

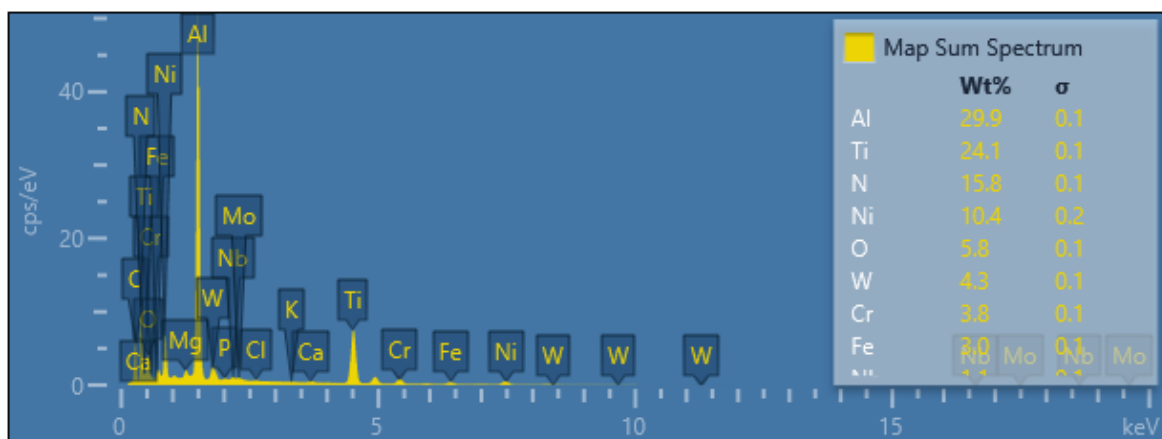
Analiza EDS powierzchni natarcia badanych ostrzy wykazała, że na obszarach, które uległy zużyciu powłoka została całkowicie starta, co pokazuje brak występowania jej pierwiastków składowych tj. tytanu (Ti), glinu (Al.) i azotu (N). Natomiast w obszarze zużycia występują znaczne ilości pierwiastków składowych materiału obrabianego takich jak nikiel (Ni), chrom (Cr) i żelazo (Fe), które świadczą o adhezji stopu 718 do powierzchni ostrza. Występowanie takich pierwiastków jak węgiel (C) i wolfram (W) potwierdza całkowite starcie powłoki w obszarze zużycia ostrza. Natomiast miejsca wystąpienia tlenu (O) świadczą o wysokiej temperaturze, która spowodowała utlenienie się powłoki (Rys. 6.32 i Rys. 6.33).





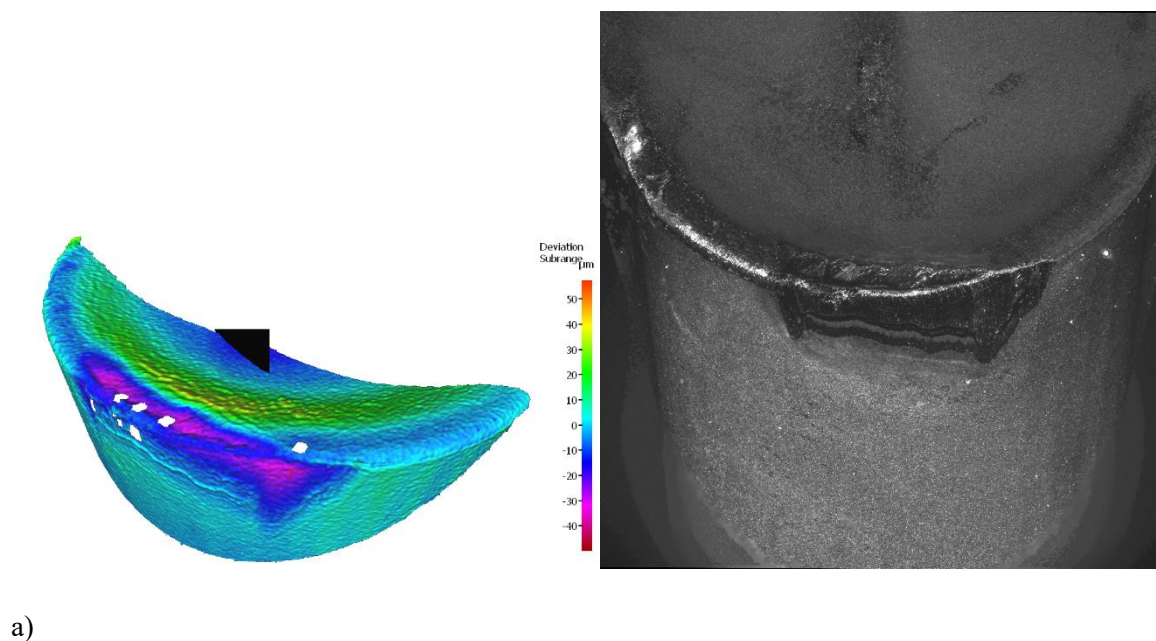
Rys. 6.32. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VCMT 160408 – SM IC804 po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 120 mm

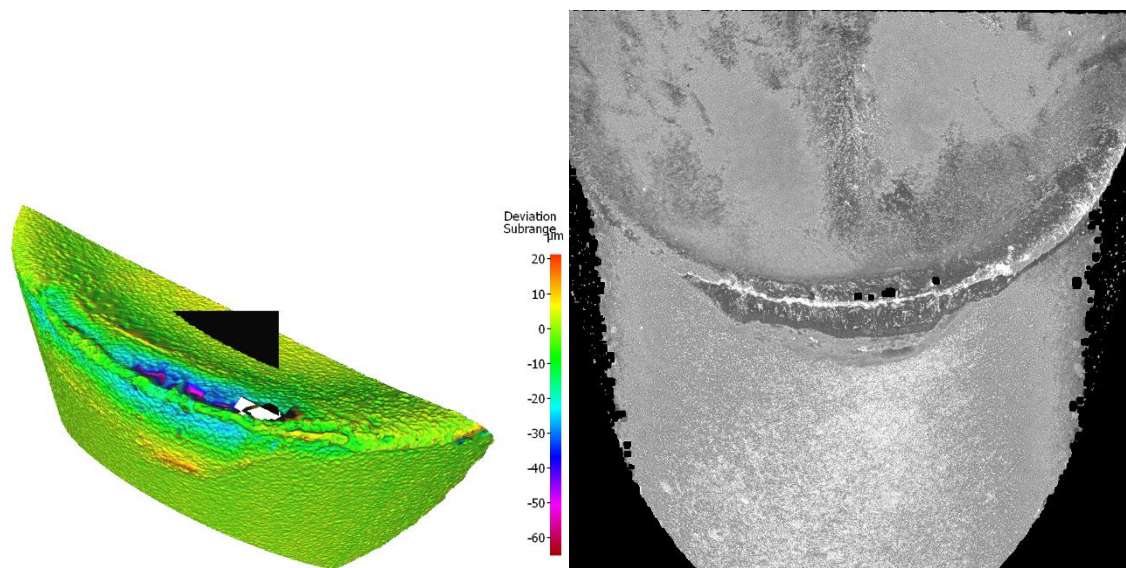




Rys. 6.33. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VCMT 160408 – SM IC804 po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 700 mm

Ostrzem, które charakteryzuje się mniejszą wartością szerokości starcia powierzchni przyłożenia, pracującego w oprawce o wysięgu 120 mm jest ostrze płytki skrawającej S205, dla którego $VB_C = 0,293$ mm. Natomiast dla ostrza tej samej płytki ale pracującego w oprawce o wysięgu 700 mm, $VB_C = 0,200$ mm (Rys. 6.34).



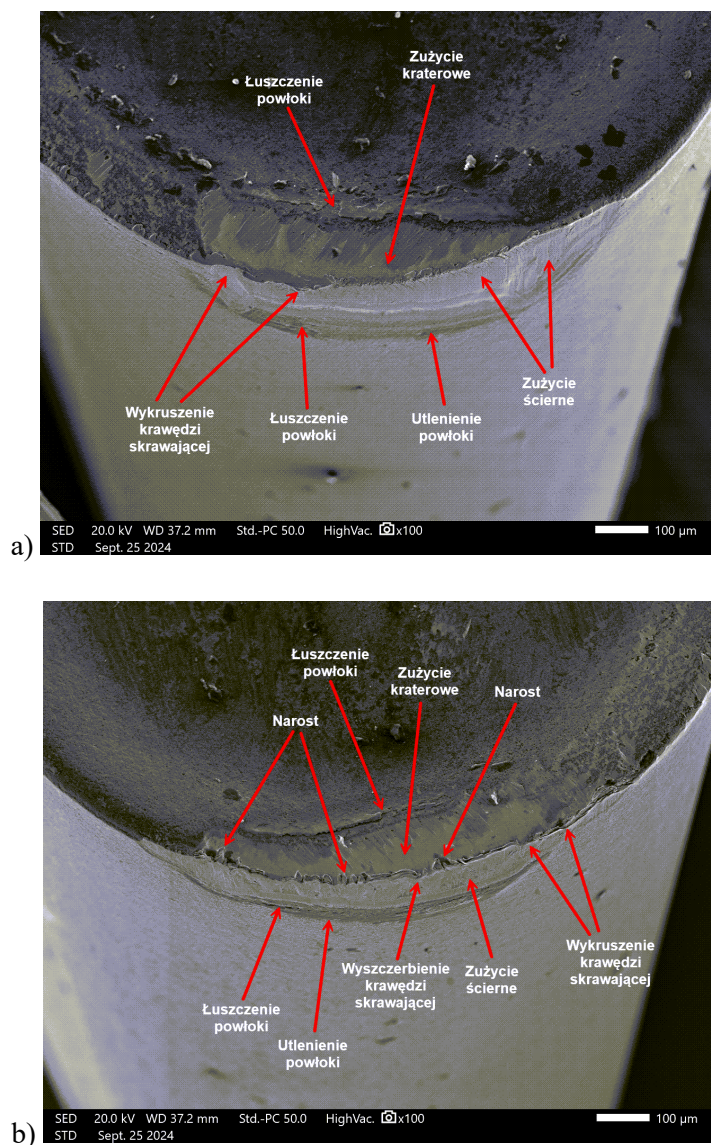


b)

Rys. 6.34. Topografia krawędzi skrawającej oraz widok zużytego ostrza płytki VBGT 160408 – UM S205 po 19 min obróbki: a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

Analizując zużycie płytki S205, warto zauważyć, że na ostrzach pracujących w obu oprawkach, wystąpił przede wszystkim ścierny i wytrzymałościowy charakter zużycia. W przypadku ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 120 mm wystąpiła większa wartość starcia powierzchni przyłożenia i zaczęło pojawiać się wyżłobienie na powierzchni natarcia. Zjawisko wyżłobienia występuje również, choć nie jest tak zauważalne na ostrzu pracującym w oprawce o wysięgu 700 mm. Na obu ostrzach można zauważyć zjawisko utleniania i łuszczenia się powłoki. Wystąpiły także w obu przypadkach wyszczerbienia i wykruszenia krawędzi skrawającej, jednak większa ich liczba pojawiła się na ostrzu pracującym w oprawce o wysięgu 700 mm, powodując bardziej nieregularny jej kształt. Jest to spowodowane niewątpliwie mniejszą stabilnością procesu skrawania, związaną z możliwym wystąpieniem mikro wibracji (Rys. 6.35). Według Khochtali i innych [99] zwiększoną liczbę wykruszeń można przypisać połączonemu mechanizmowi niestabilnego narostu w wyniku niestabilnego procesu adhezji i przyspieszonego procesu adhezji spowodowanego gwałtownym usuwaniem materiału osadzonego na ostrzu przez strumień wody o wysokim ciśnieniu. Niemniej jednak należy zauważyć, że S205 należy do stosunkowo nowych powłok opracowanych przez firmę Sandvik. Jest to trwała powłoka nanoszona metodą CVD, która cechuje się wysoką odpornością na ścieranie i działanie wysokich temperatur w strefie skrawania [125], przy stosunkowo dużych prędkościach

skrawania [88, 91]. Na ostrzu pracującym w oprawce o wysięgu 700 mm pojawiły się niewielkie ilości narostu, który prawie nie jest zauważalny na ostrzu pracującym w oprawce o wysięgu 120 mm.

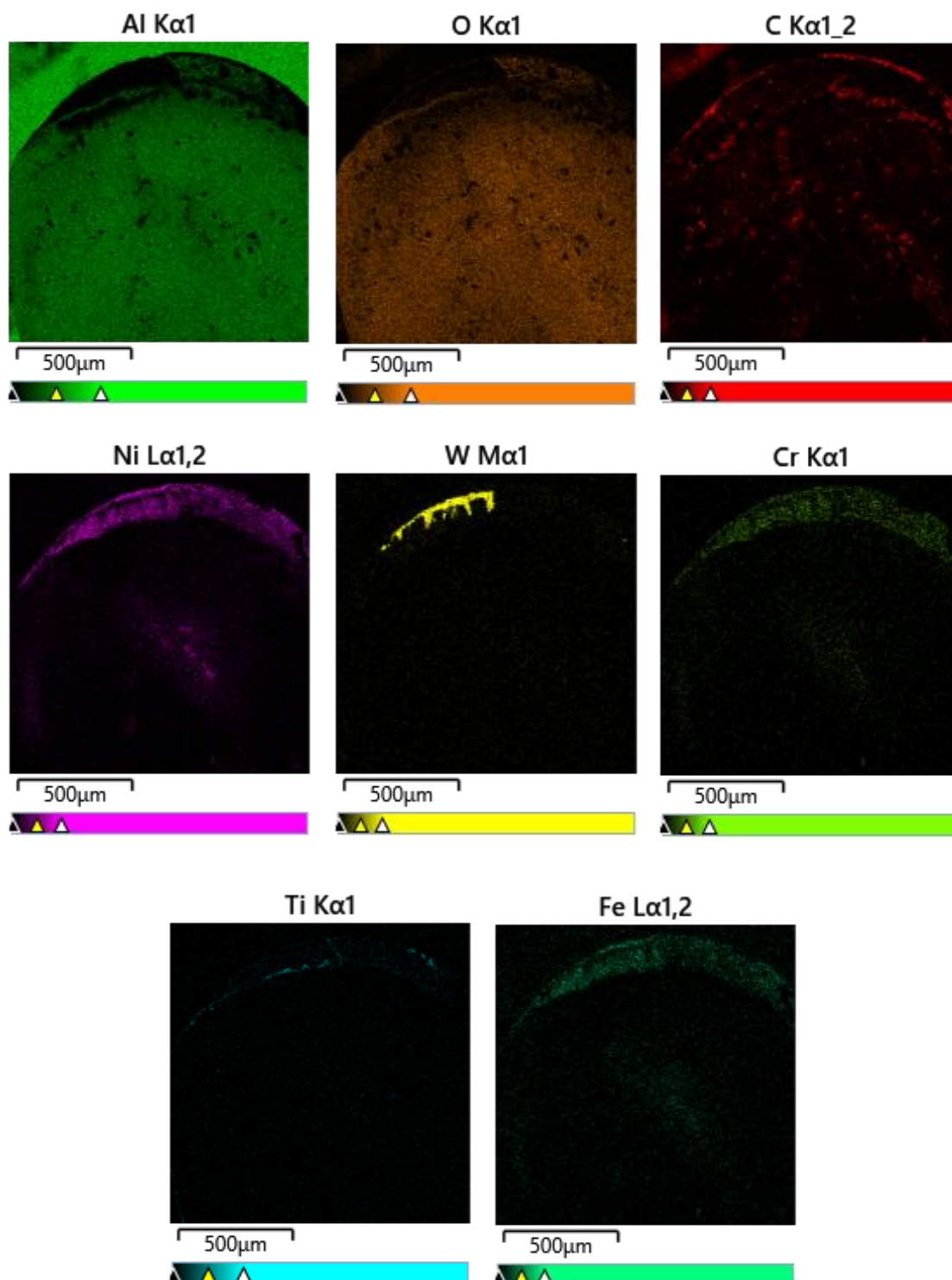


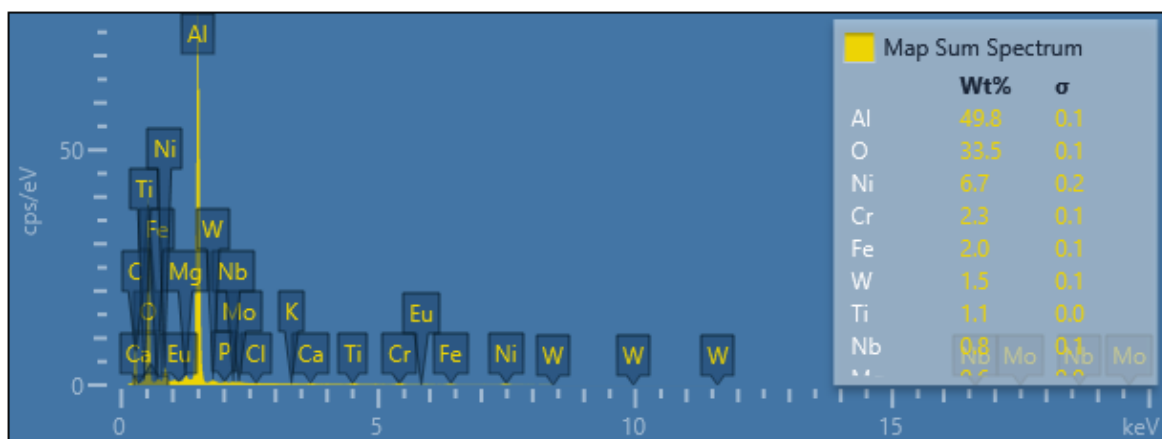
Rys. 6.35. Obrazy SEM zużytych ostrzy płytki VBGT 160408 – UM S205 po 19 min obróbki:

a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

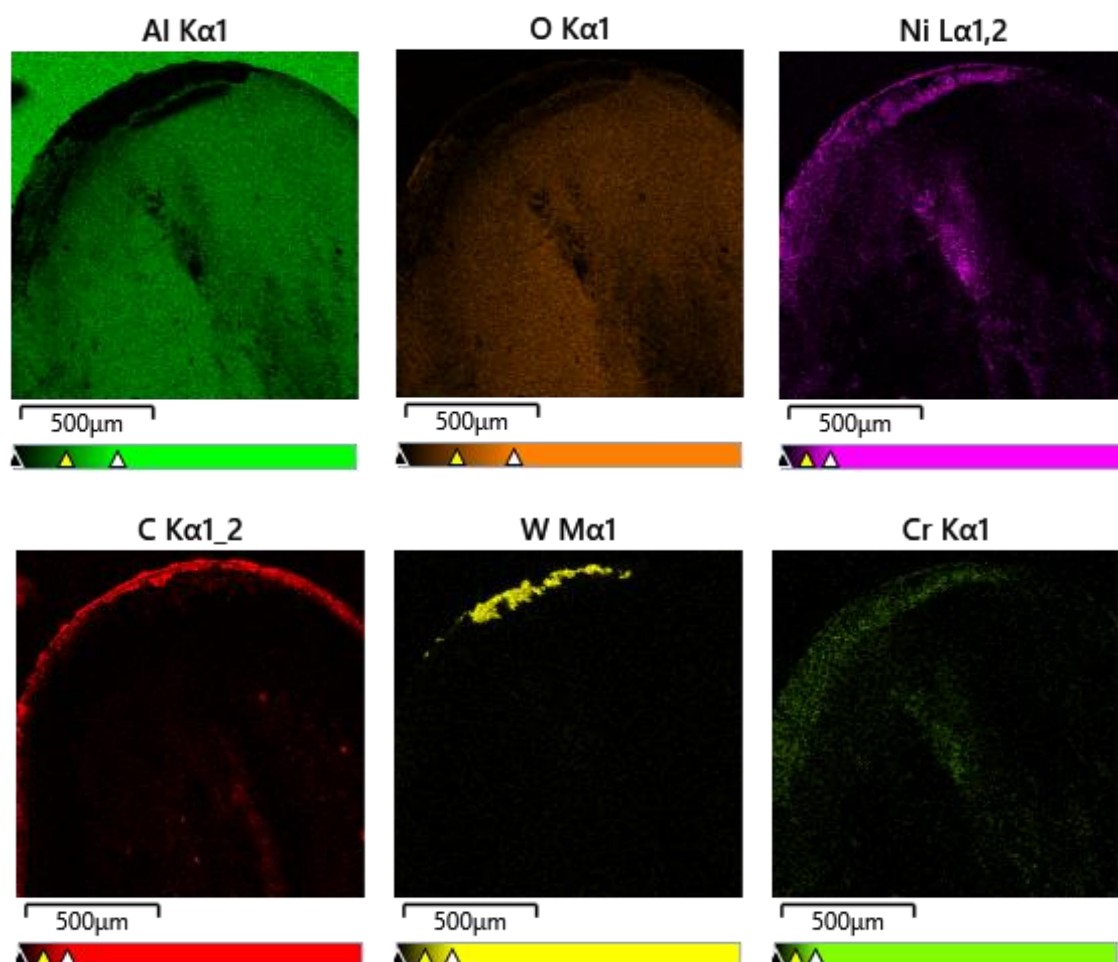
Analiza EDS ostrzy płytki S205 prezentuje znaczne ilości pierwiastków glinu (Al) i tlenu (O), które są składnikami powłoki, należy także zaznaczyć ich obecność w części obszaru zużycia ostrza, gdzie nie nastąpiło jej całkowite starcie. Świadczy to o zwiększonej wytrzymałości ostrzy S205 w porównaniu z ostrzami płytki IC804, ale przyczyną jej utrzymania może być także zwiększona grubość, ponieważ jest to powłoka CVD. W części obszaru zużycia ostrza, gdzie nastąpiło całkowite starcie powłoki, widoczne są znaczne

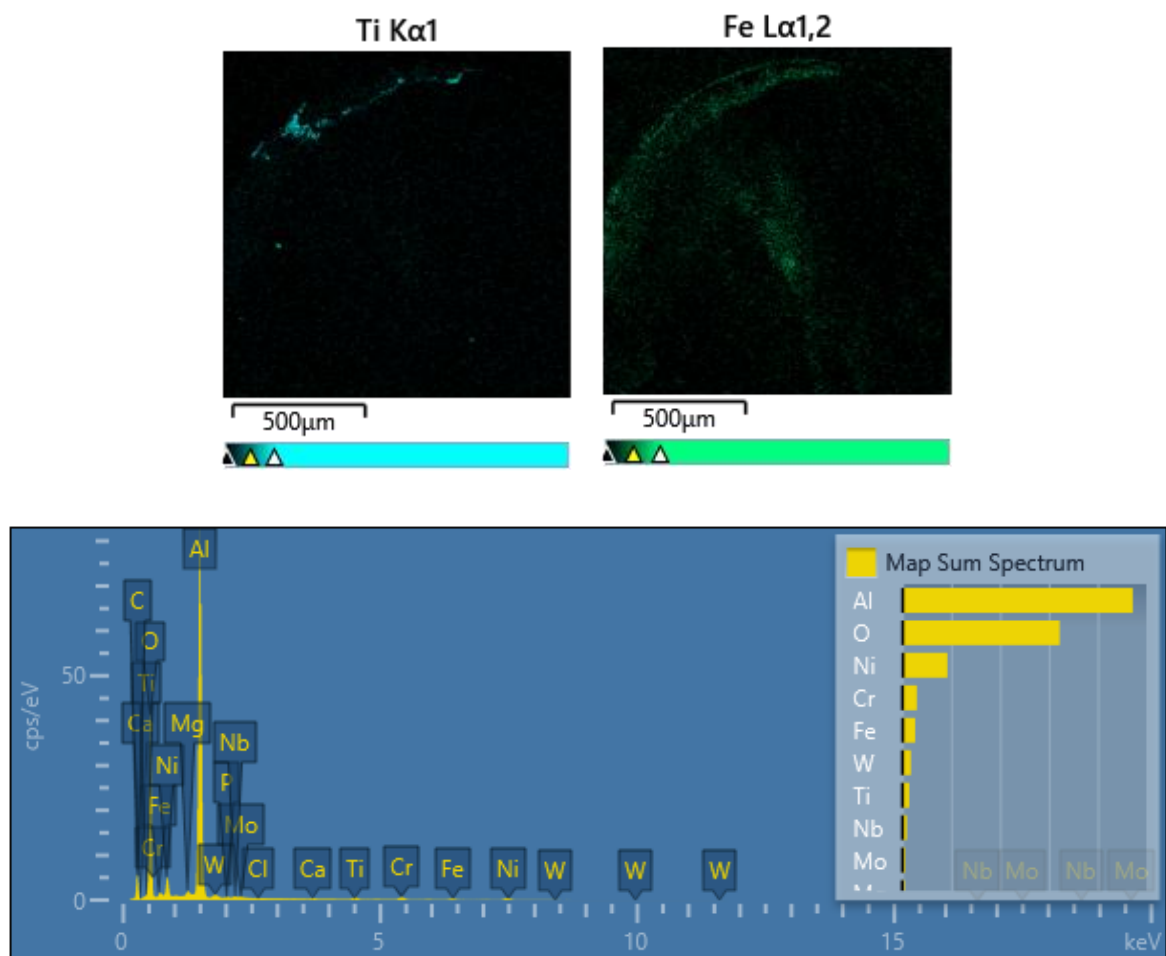
ilości pierwiastków niklu (Ni), chromu (Cr) i żelaza (Fe), które pochodzą od materiału obrabianego. W obszarach największego zużycia pojawiają się pierwiastki składowe substratu, czyli wolfram (W) i węgiel (C), co oznacza, że powłoka została całkowicie starta. Zastanawiająca jest niewielka ilość pierwiastka tytanu (Ti), który jest również składnikiem powłoki, co może oznaczać, że jego rozkład jest nierównomierny i większe ilości znajdują się na powierzchni przyłożenia (Rys. 6.36 i Rys. 6.37).





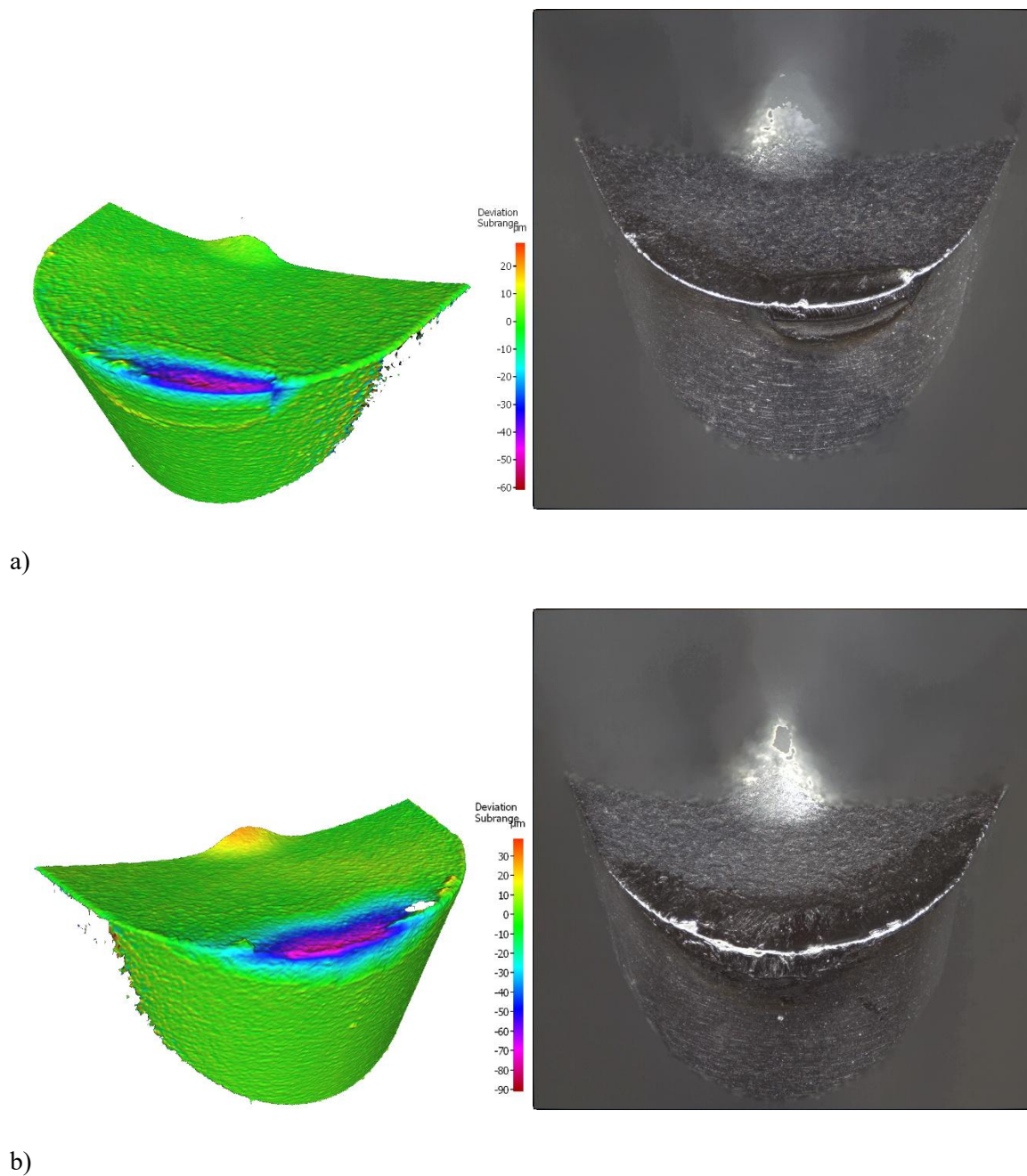
Rys. 6.36. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VBGT 160408 – UM S205 po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 120 mm





Rys. 6.37. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VBGT 160408 – UM S205 po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 700 mm

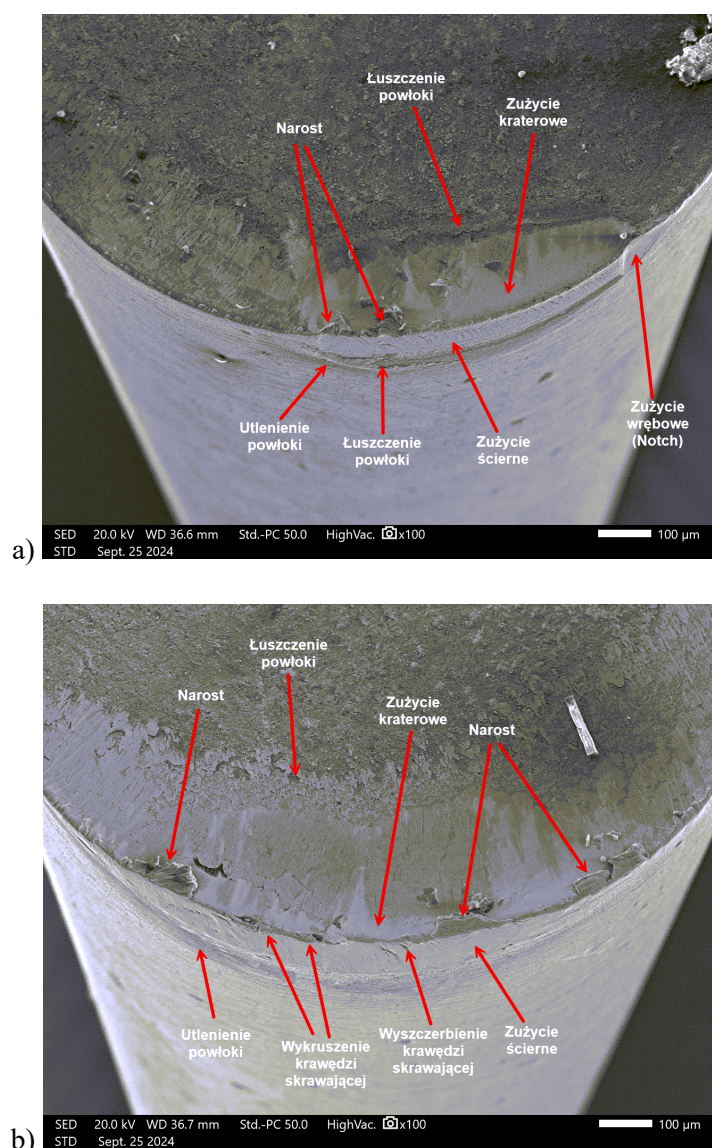
Dla ostrzy płytki WSM01, zarejestrowano nieco mniejsze wartości szerokości starcia powierzchni przyłożenia w porównaniu do ostrzy poprzednich płytek. W przypadku ostrza skrawającego w oprawce o wysięgu 120 mm, $VB_C = 0,170$ mm, natomiast dla ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 700 mm, $VB_C = 0,244$ mm (Rys. 6.38). Ostrza tej płytki prezentują w przypadku obu oprawek stosunkowo niewielkie wartości zużycia biorąc pod uwagę drogę skrawania jaką pokonały. Powłoka WSM01 jest nanoszona metodą PVD i biorąc pod uwagę informacje od producenta należy do powłok z zakresu wyższej odporności na ścieranie [126]. W przypadku ostrzy tej płytki również zaczął pojawiać się narost [43, 107] i to niezależnie od użytej oprawki. Materiał Inconel 718 prezentuje bardzo dużą skłonność do tworzenia narostu, co w przypadku tego ostrza było powiązane z ewolucją intensywności zużycia adhezyjnego [87, 90]. Zużycie adhezyjne jest wynikiem wysokiej temperatury i nacisków występujących podczas skrawania, co powoduje zgrzewanie pomiędzy czystą powierzchnią wióra a powierzchnią natarcia narzędzia [95]. Na obu



Rys. 6.38. Topografia krawędzi skrawającej oraz widok zużytego ostrza płytki VCGT 160408 – MM4 WSM01 po 19 min obróbki: a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

ostrzach tej płytki wystąpiło zjawisko zużycia ściernego i wytrzymałościowego ostrza. Należy wspomnieć, że na ostrzu pracującym w oprawce o wysięgu 120 mm nastąpiło mniej wykruszeń i wyszczerbień krawędzi skrawającej w porównaniu do ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 700 mm. Niemniej jednak trzeba zauważyć, że na ostrzu pracującym w oprawce o krótszym wysięgu rozpoczęła się inicjacja zużycia wrębowego (notch), a także pojawiło się wyżłobienie na powierzchni natarcia. Ten rodzaj zużycia znajdujący się na

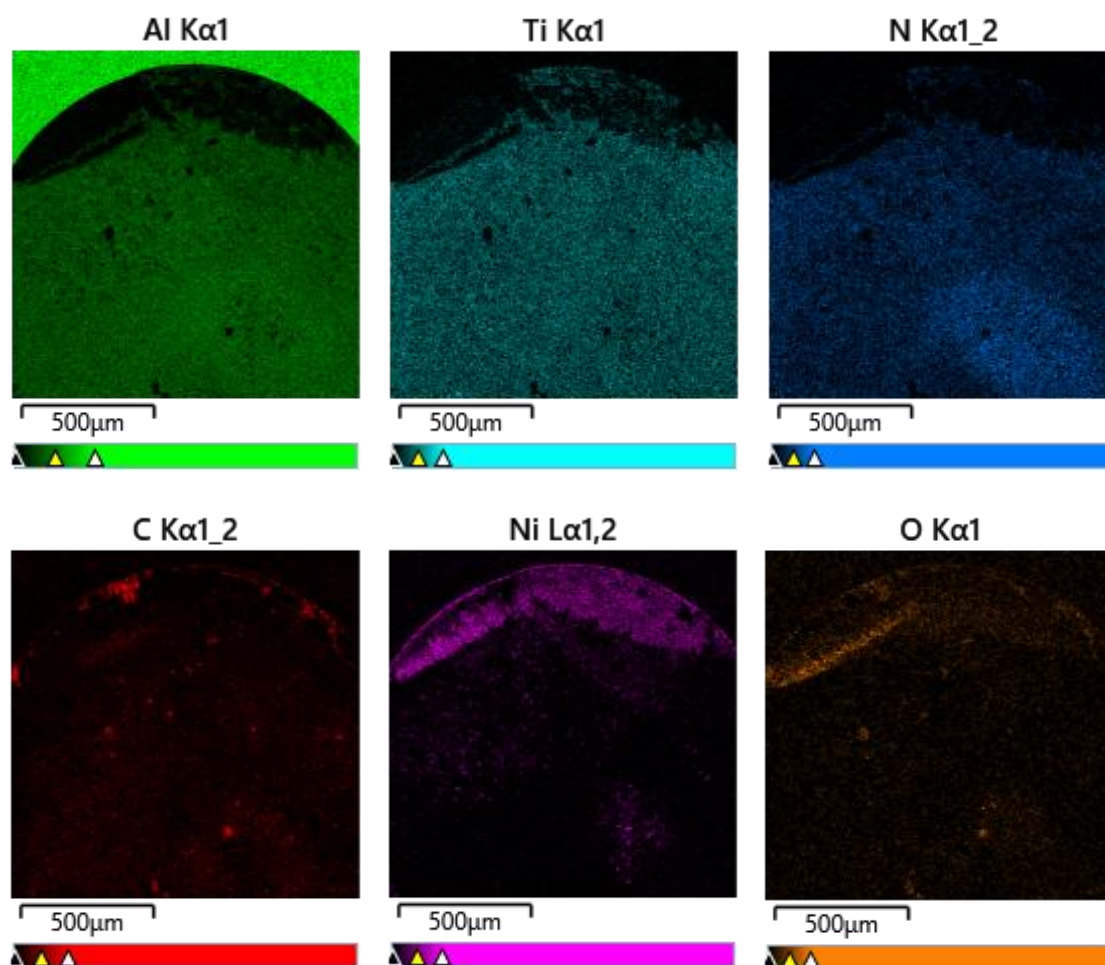
krawędzi skrawającej bliżej strefy powierzchni obrobionej w czasie procesu skrawania, w połączeniu z największą szerokością starcia powierzchni przyłożenia mógł mieć wpływ na uzyskaną większą wartość chropowatości powierzchni, omówioną w rozdziale 6.2.2. W przypadku obu ostrzy płytki WSM01 również wystąpiły zjawiska utleniania i łuszczenia powłoki. Uzyskanie mniejszej wartości chropowatości powierzchni dla ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 700 mm było spowodowane najprawdopodobniej mniejszym obciążeniem w wyniku procesu skrawania z racji ostrej geometrii płytki jak również ugięciem samej oprawki. Wspomniane ugięcie spowodowało zmniejszenie przekroju warstwy skrawanej, a tym samym zmniejszeniem obciążenia samego ostrza (Rys. 6.39).

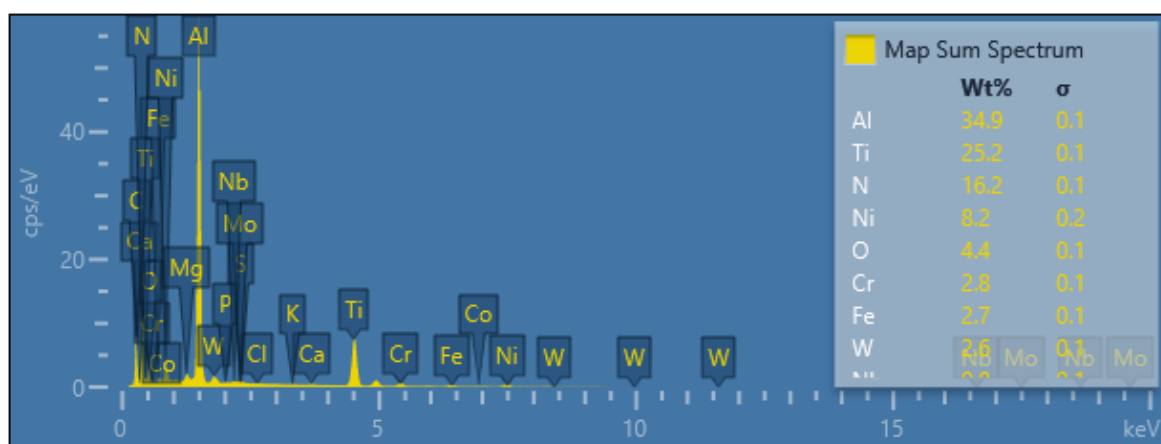
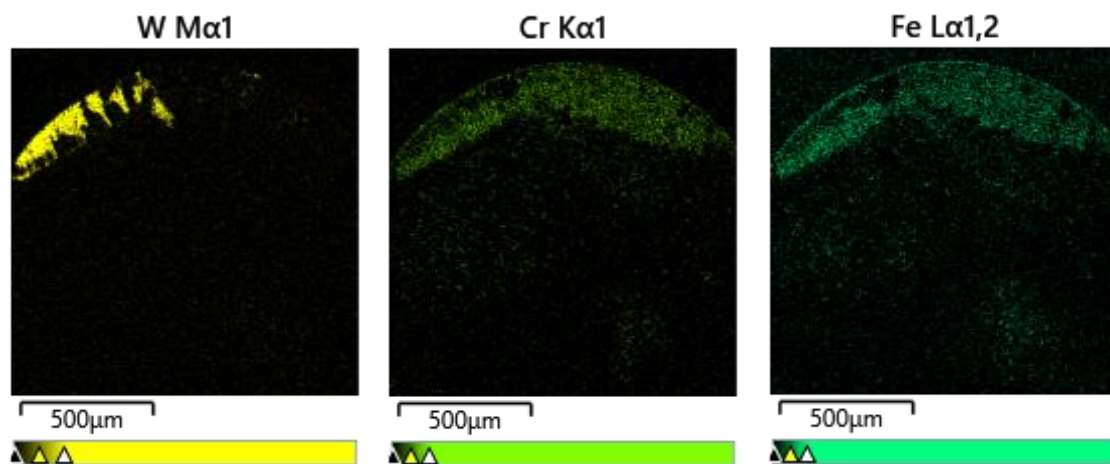


Rys. 6.39. Obrazy SEM zużytych ostrzy płytki VCGT 160408 – MM4 WSM01 po 19 min obróbki:
a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

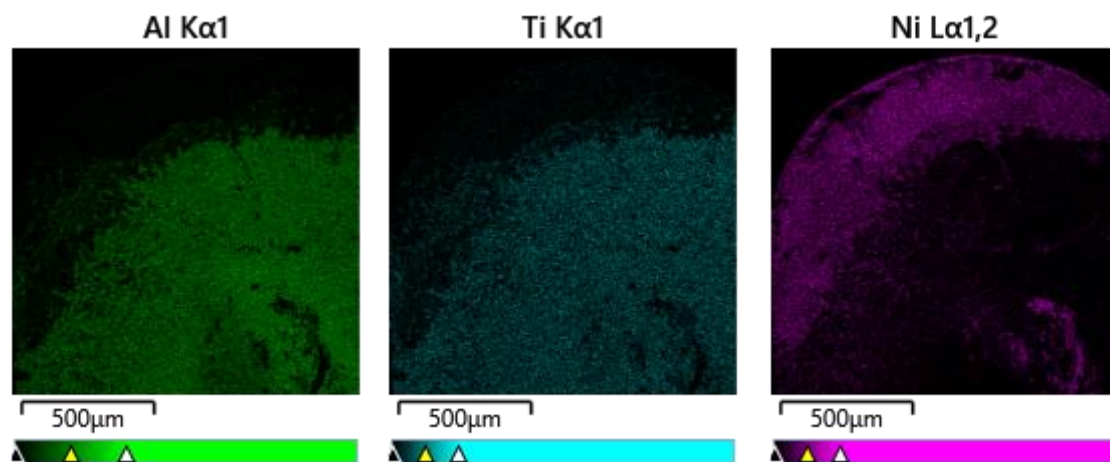
Kąt przyłożenia dla ostrza tej płytki wynosi 7° , natomiast promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej $r_n = 12,44 \mu\text{m}$, co wskazuje na ostrą krawędź.

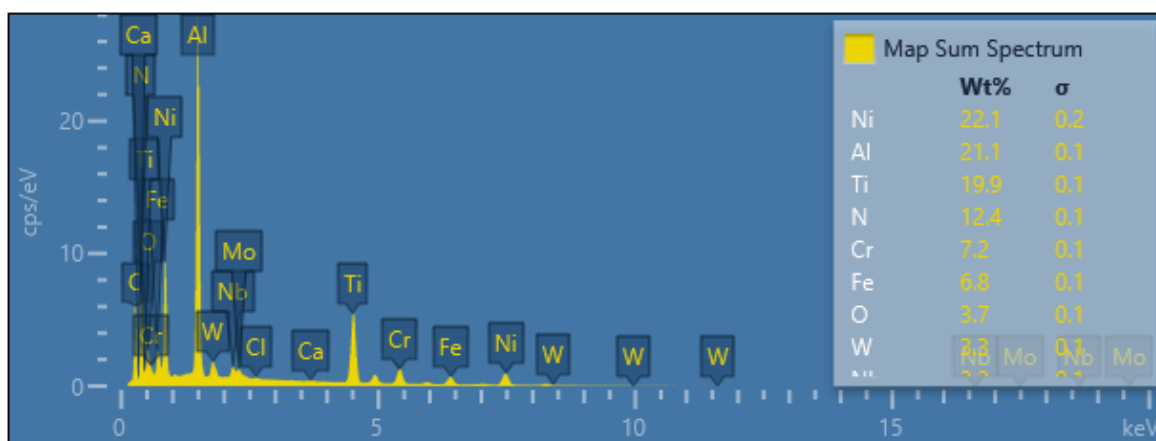
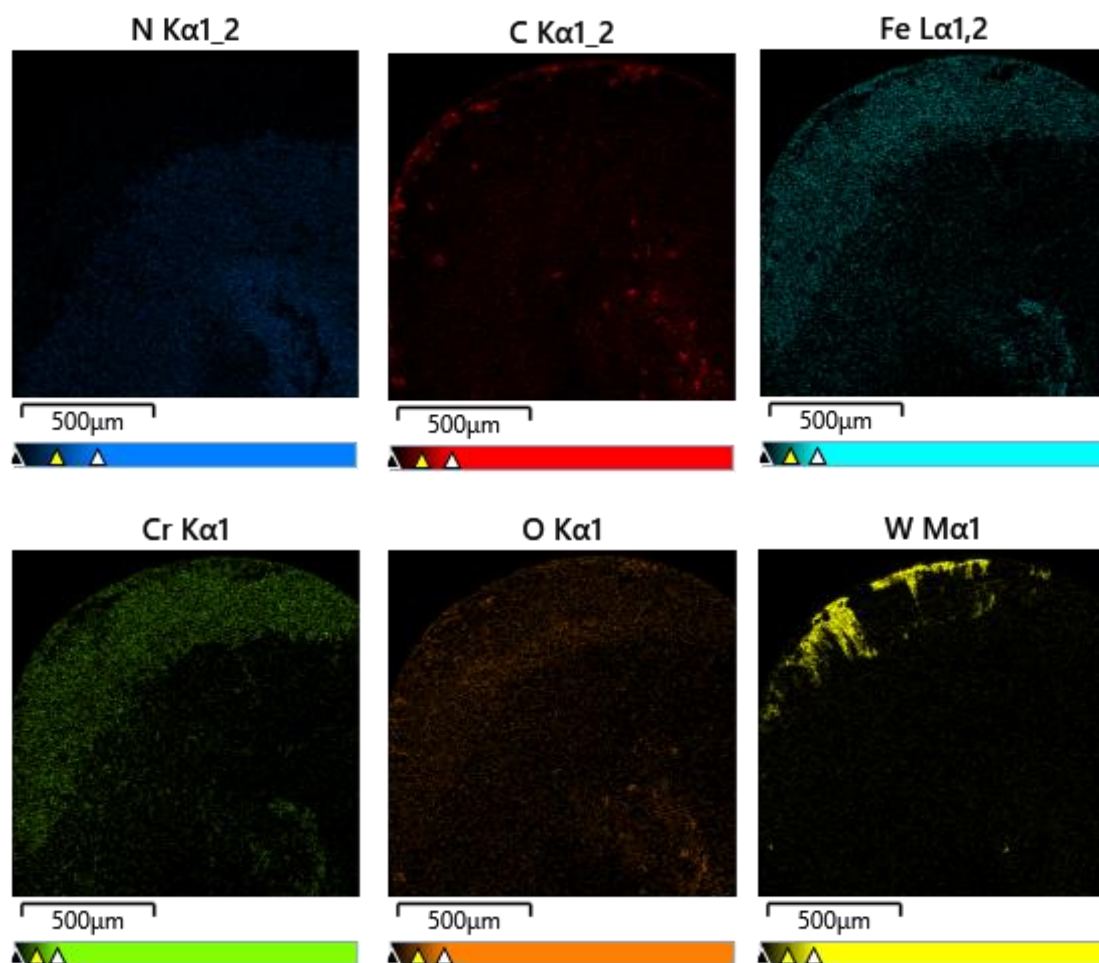
Analiza EDS ostrzy płytki WSM01 ujawnia całkowite starcie powłoki w obszarze spływu wiórów na powierzchni natarcia, gdzie występuje zupełny brak pierwiastków składowych powłoki takich jak tytan (Ti), glin (Al), czy azot (N) w strefie zużycia ostrza. W obszarach największego zużycia ostrzy pojawiają się pierwiastki składowe substratu ostrza takie jak węgiel (C) i wolfram (W). W przypadku ostrzy tej płytki istotną zmianą jest występowanie pierwiastka tlenu (O) w strefie utleniania powłoki w znacznie większym stopniu na ostrzu pracującym w oprawce o wysięgu 120 mm. Oznacza to, że podczas procesu skrawania na ostrzu tym musiała występować wyższa temperatura w porównaniu z ostrzem, które pracowało w oprawce o wysięgu 700 mm. W strefie zużycia ostrza podobnie jak w przypadku poprzednich ostrzy występują znaczne ilości pierwiastków składowych materiału obrabianego w postaci niklu (Ni), chromu (Cr) i żelaza (Fe) (Rys. 6.40 i Rys. 6.41).





Rys. 6.40. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VCGT 160408 – MM4 WSM01 po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 120 mm

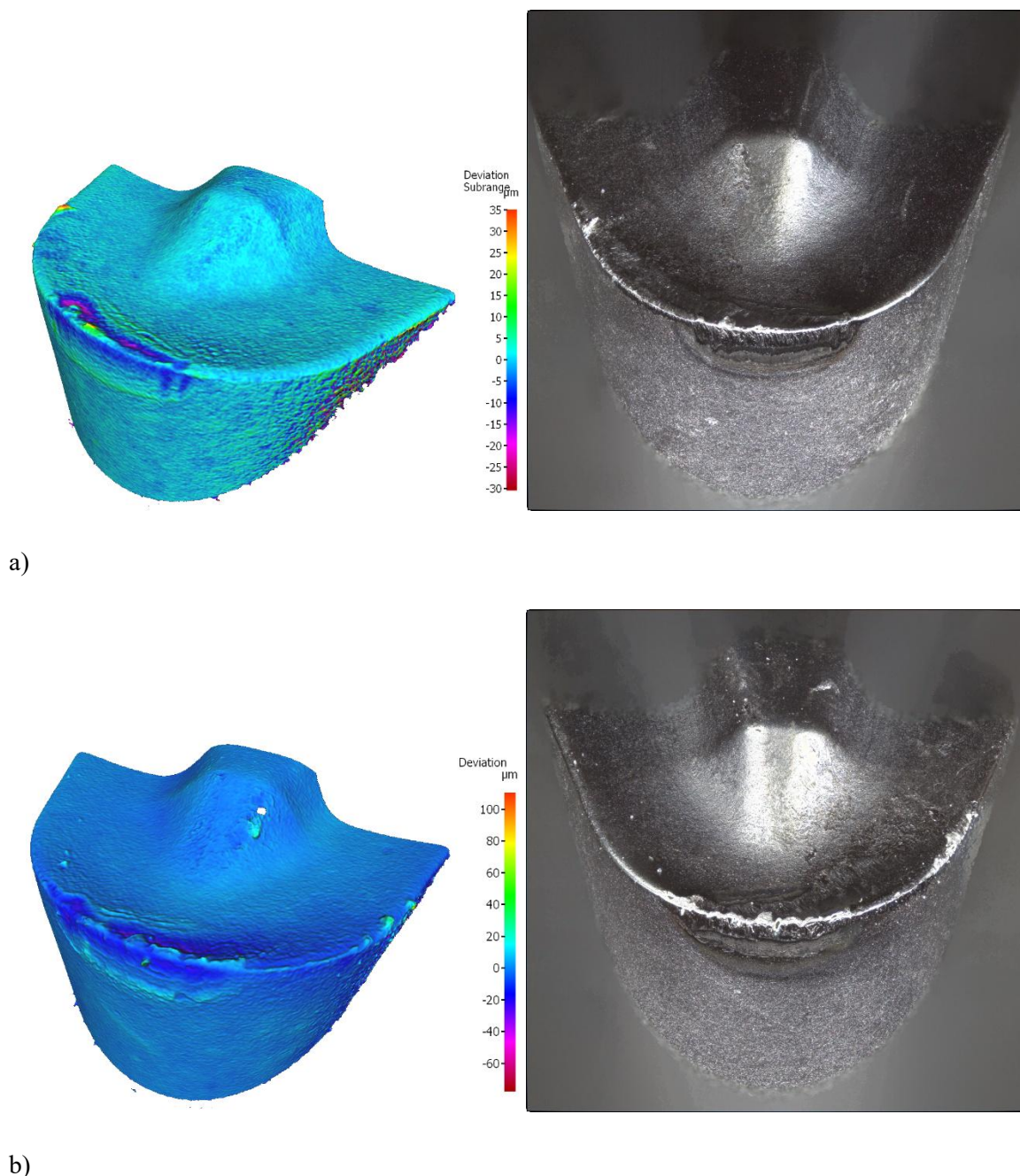




Rys. 6.41. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VCGT 160408 – MM4 WSM01 po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 700 mm

W przypadku ostrza płytki MP9005, dla oprawki o wysięgu 120 mm wysokość starcia powierzchni przyłożenia jest równa $VB_C = 0,220$ mm. Natomiast dla ostrza płytki pracującej w oprawce o wysięgu 700 mm, $VB_C = 0,196$ mm (Rys. 6.42). Należy wspomnieć, że w przypadku ostrzy tej płytki, pracujących na obu oprawkach również wystąpił narost.

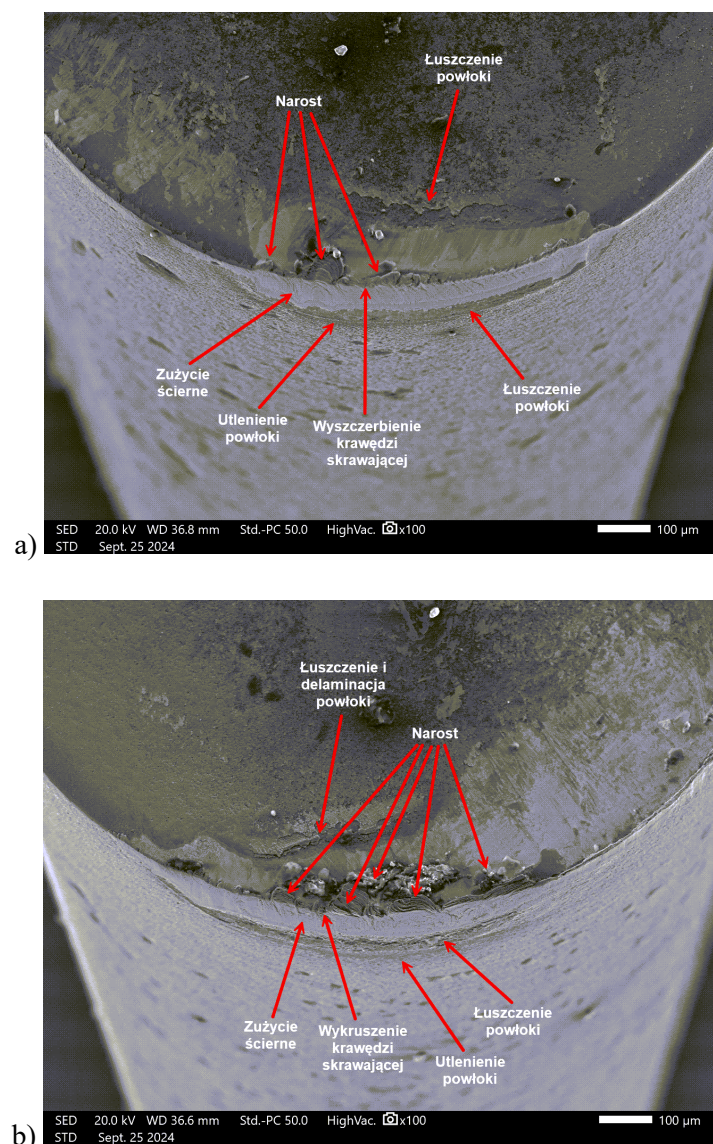
Wystąpienie narostu jest spowodowane tym, iż MP9005 to nowej generacji powłoka z zakresu wyższych odporności na ścieranie ale ze zwiększoną zawartością glinu.



Rys. 6.42. Topografia krawędzi skrawającej oraz widok zużytego ostrza płytki VBMT 160408 – LS MP9005 po 19 min obróbki: a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

Większa zawartość tego pierwiastka daje w początkowym etapie obróbki lepszy efekt ochronny i przeciwcierny [96], natomiast na skutek ewolucji zużycia narzędzia powoduje powstawanie tlenków glinu w wyniku utleniania, powodujących wzrost współczynnika tarcia par tribologicznych [127]. Prowadzi to do wzrastającej intensywności zużycia

adhezyjnego. Niemniej jednak ostrze to charakteryzuje się dużą wytrzymałością i odpornością na ścieranie, czego dowodem jest uzyskanie najmniejszej wartości chropowatości powierzchni i odchyłki od wymiaru nominalnego pracując w warunkach stabilnych (oprawka o wysięgu 120 mm). W przypadku ostrzy pracujących na obu oprawkach również zarejestrowano formy zużycia ściernego i wytrzymałościowego w postaci wykruszeń i wyszczerbień na krawędzi skrawającej. Wypada jednak zwrócić uwagę, że na krawędzi skrawającej płytki pracującej w oprawce o wysięgu 700 mm wystąpiła zdecydowanie większa liczba wykruszeń i wyszczerbień co miało wpływ na uzyskaną chropowatość obrobionej powierzchni (Rys. 6.43).

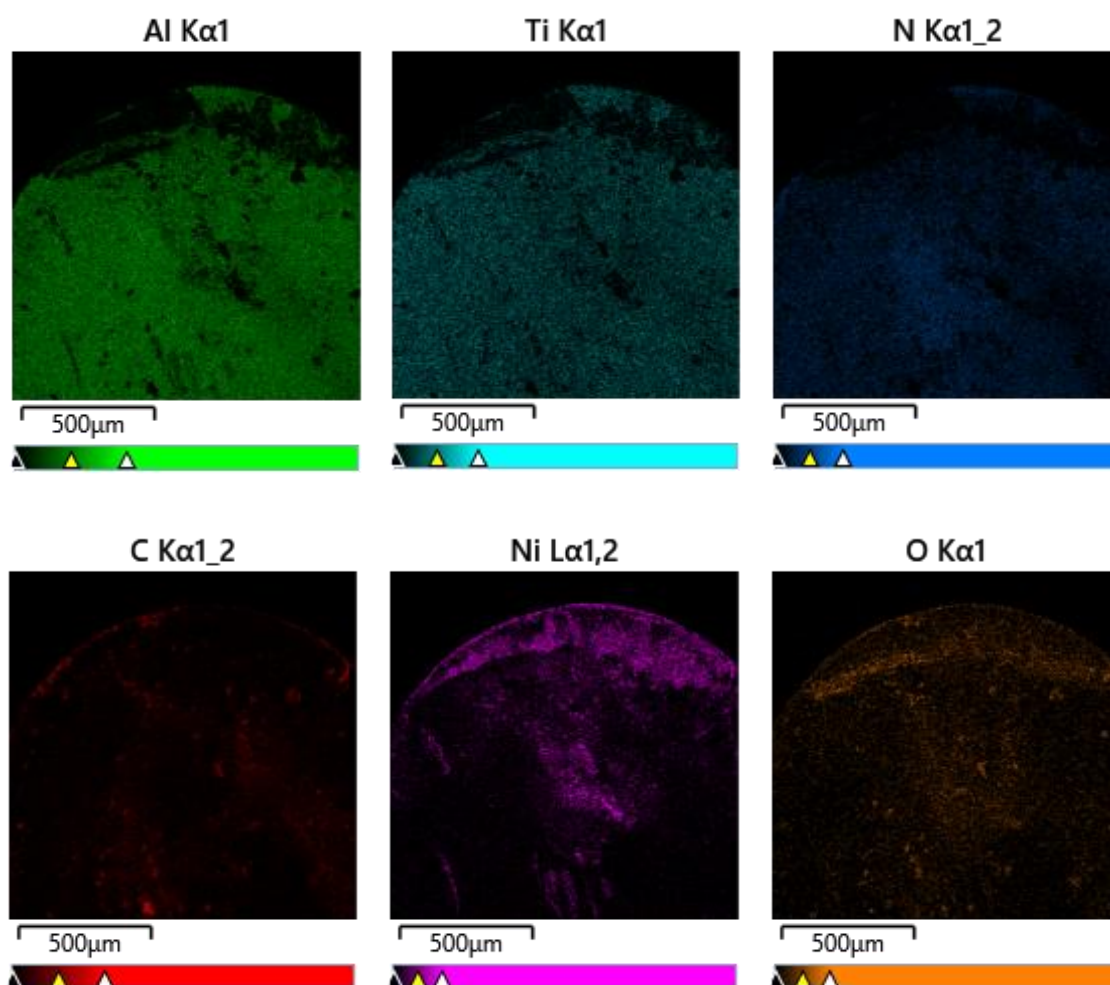


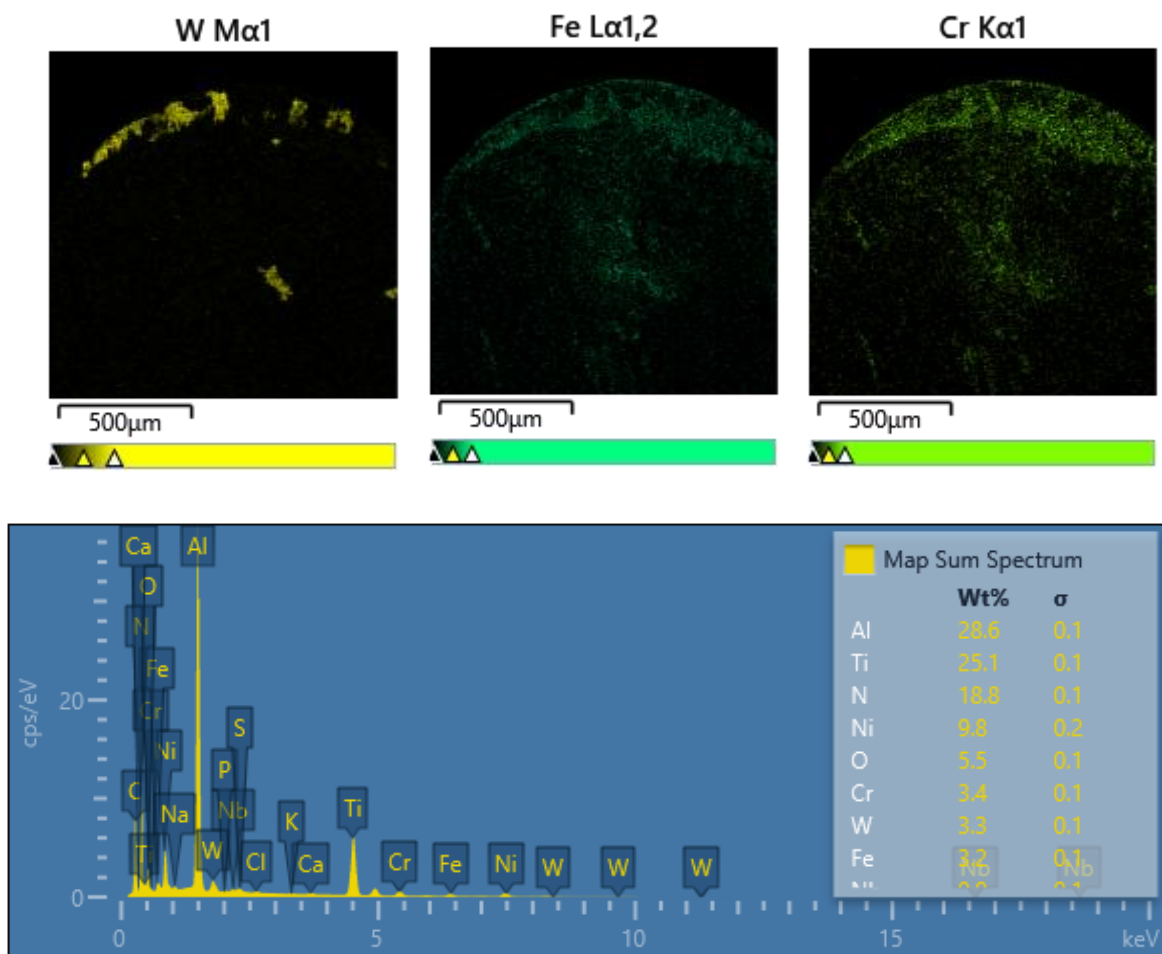
Rys. 6.43. Obrazy SEM zużytych ostrzy płytki VBMT 160408 – LS MP9005 po 19 min obróbki:

a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

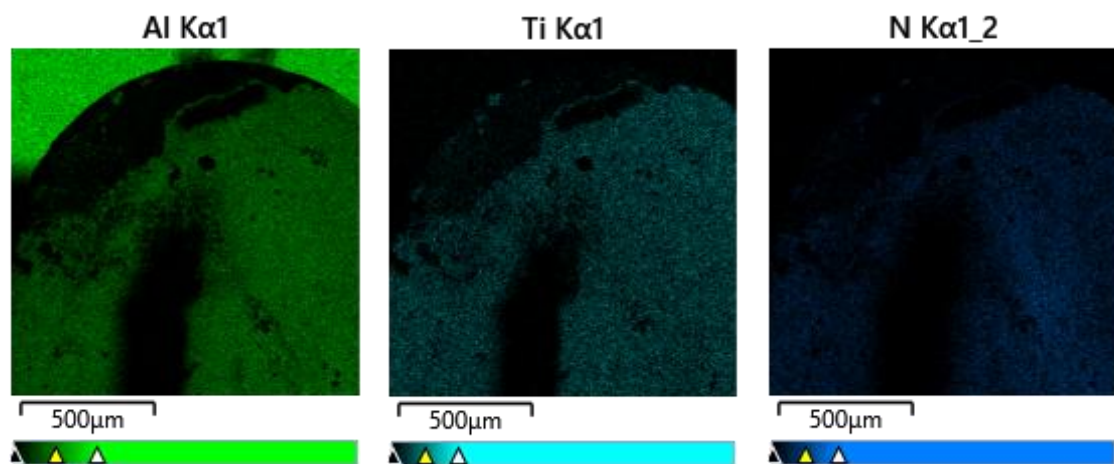
Ta zwiększona koncentracja tego rodzaju zużycia była spowodowana mniejszą stabilnością procesu skrawania w stosunku do obróbki krótszą oprawką. Jednemu i drugiemu przypadkowi towarzyszyło również zjawisko utleniania i łuszczenia powłoki.

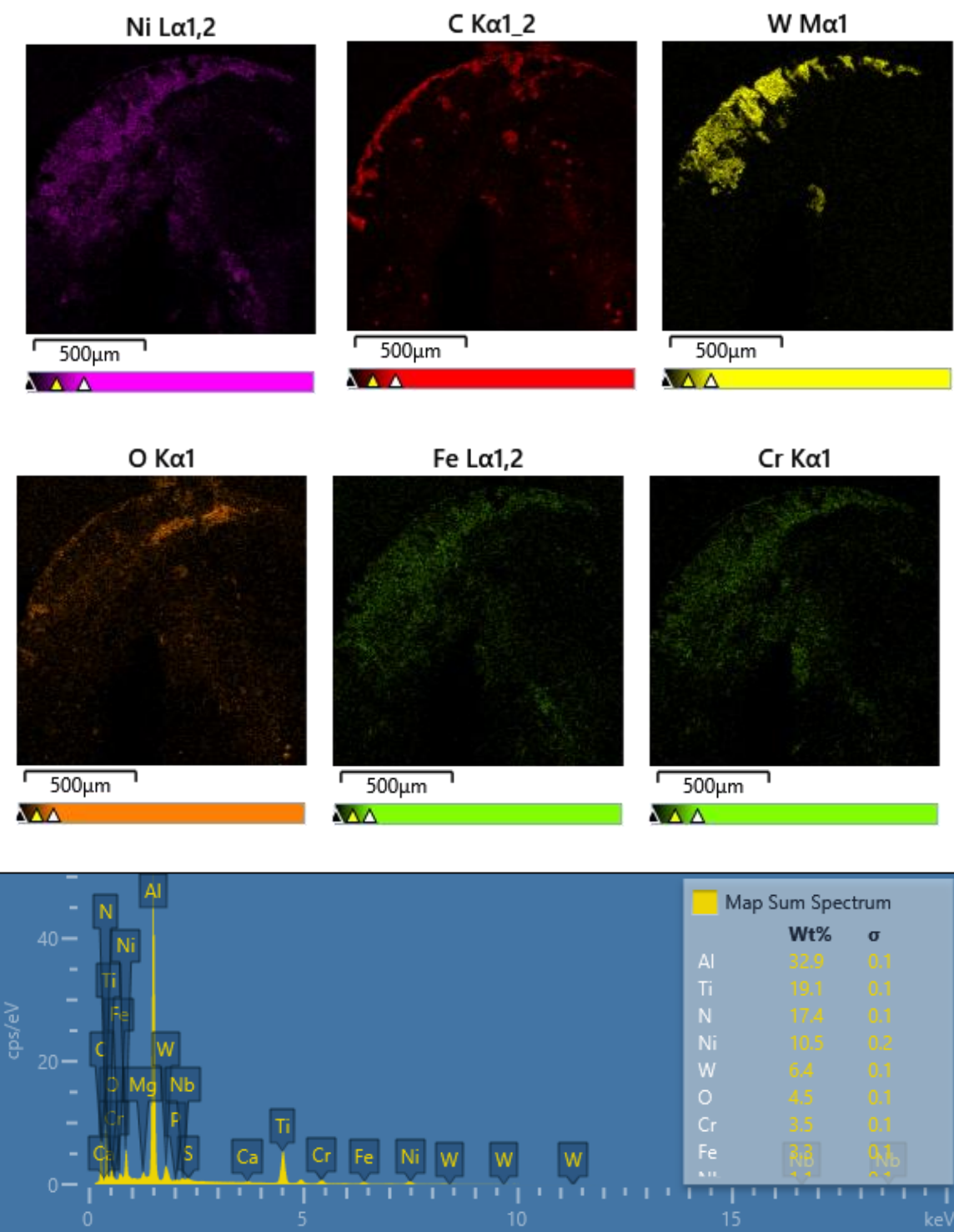
Obrazy analizy EDS również ukazują całkowite usunięcie powłoki ostrza w obszarze skrawania i spływu wióra, gdzie ewidentnie jej pierwiastki składowe tj. glin (Al), tytan (Ti) i azot (N) są niewidoczne. Za to w tych samych obszarach dostrzegalne są pierwiastki składowe substratu czyli węgiel (C) i wolfram (W), choć na ostrzu pracującym w krótszej oprawce zdecydowanie węgla jest mniej. Może to świadczyć o większej stabilności procesu skrawania. Na obu ostrzach dostrzegalny jest rozciągnięty obszar spływu wióra do części pomocniczej ostrza, gdyż zawartość pierwiastków składowych Inconelu 718 takich jak nikiel (Ni), chrom (Cr) i żelazo (Fe) również rozciąga się szerzej w porównaniu do poprzednich ostrzy. Jest to także wynikiem adhezji materiału obrabianego do ostrza. W przypadku omawianych ostrzy zaznaczony jest obszar utlenienia powłoki, co można dostrzec poprzez występowanie pierwiastka tlenu (O) (Rys. 6.44 i Rys. 6.45).





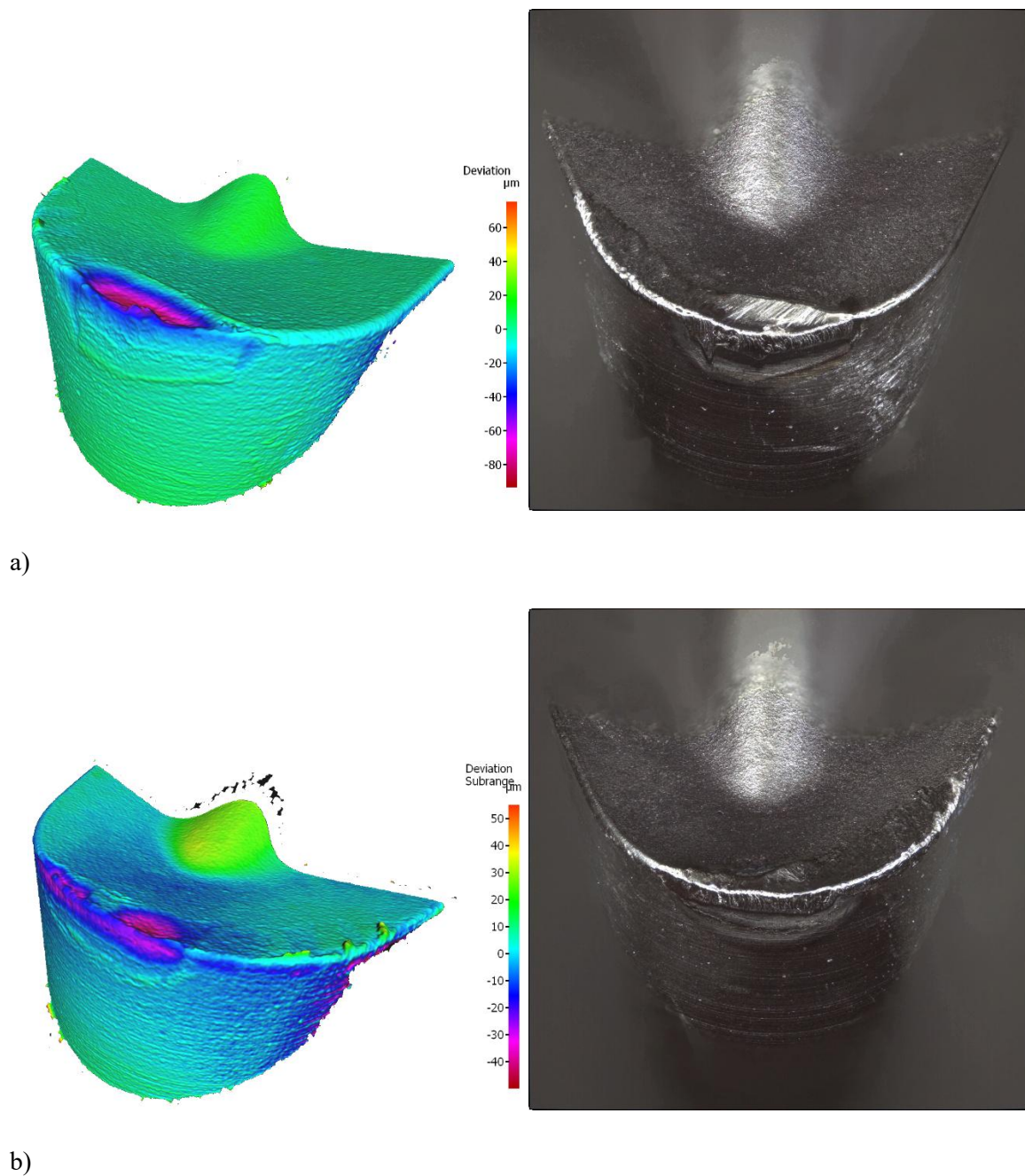
Rys. 6.44. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VBMT 160408 – LS MP9005 po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 120 mm





Rys. 6.45. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VBMT 160408 – LS MP9005 po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 700 mm

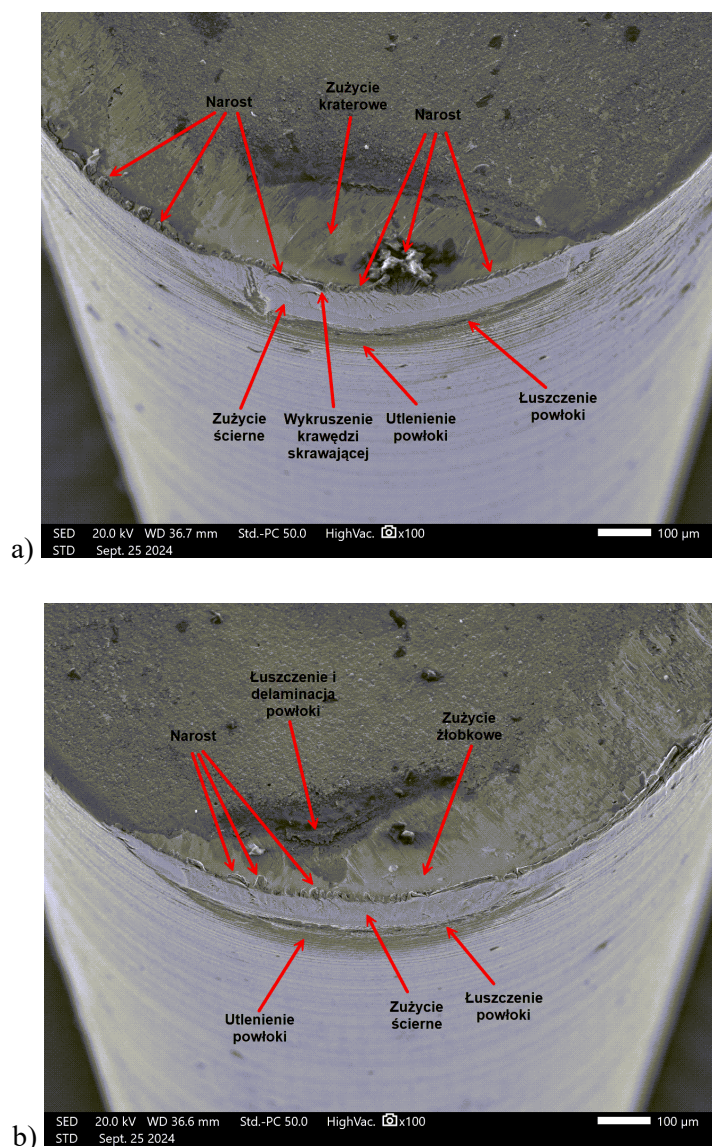
Biorąc pod uwagę zużycie krawędzi skrawających płytki KCS10B, dla ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 120 mm, szerokość starcia powierzchni przyłożenia jest równa $VB_C = 0,230$ mm. Dla ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 700 mm, $VB_C = 0,107$ mm (Rys. 6.46).



Rys. 6.46. Topografia krawędzi skrawającej oraz widok zużytego ostrza płytki VBGT 160408LF KCS10B po 19 min obróbki: a) ostrze pracujące w oprawce o wyśięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wyśięgu 700 mm

W przypadku tej płytki, biorąc pod uwagę wartość parametru VB_C , można zauważyć, że jej ostrza pracujące na jednej i drugiej oprawce charakteryzują się wysoką wytrzymałością i odpornością na ścieranie. Powłoka KCS10B jest stosunkowo nową powłoką nanoszoną metodą PVD, która także charakteryzuje się odpornością na działanie wysokich temperatur w strefie obróbki, w wyniku zastosowania dużych prędkości skrawania. Na obu ostrzach można także zauważyć występujące ściernie i wytrzymałościowe zużycie ostrza w postaci

wykruszeń i wyszczerbień. Pojawiło się także wyżłobienie na powierzchni natarcia, jednak większą jego głębokość można zauważyć na ostrzu pracującym w oprawce o wysięgu 120 mm (Rys. 6.47). Płytki KCS10B charakteryzuje się również ostrą geometrią, gdyż jest szlifowana, a jej promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej wynosi $r_n = 29,944 \mu\text{m}$. Należy zaznaczyć, że na krawędzi skrawającej płytki, która pracowała w oprawce o wysięgu 700 mm wystąpiła mniejsza liczba wykruszeń i wyszczerbień w stosunku do ostrza, które pracowało w oprawce o wysięgu 120 mm.



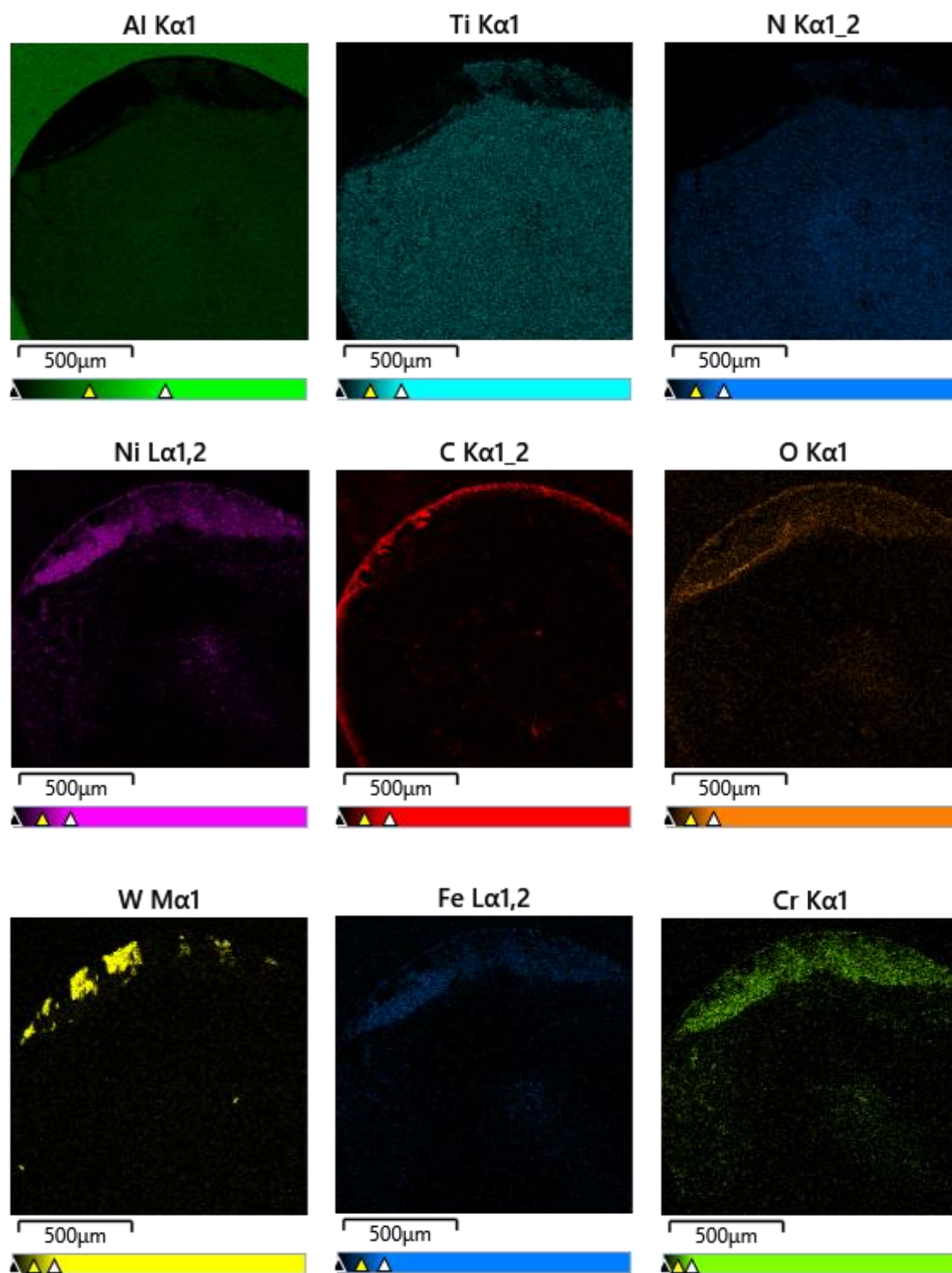
Rys. 6.47. Obrazy SEM zużytych ostrzy płytki VBGT 160408LF KCS10B po 19 min obróbki: a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

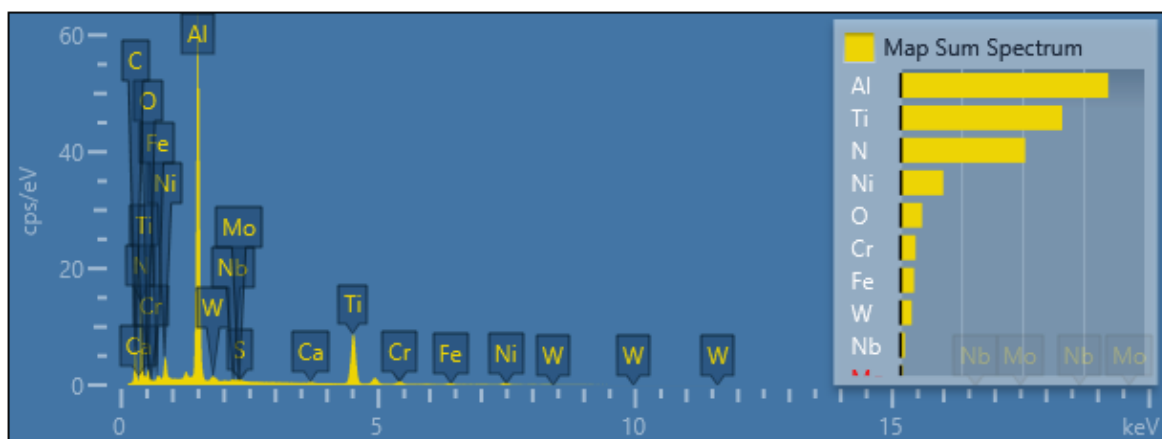
Jest to spowodowane najprawdopodobniej stosunkowo ostrą geometrią płytki, uzyskaną w wyniku procesu szlifowania, charakteryzującą się małą wartością promienia zaokrąglenia

krawędzi skrawającej r_n , jak również ugięciem samej oprawki, które zmniejszyło obciążenie ostrza, tłumiąc jednocześnie drgania. Mała koncentracja zużycia wytrzymałościowego, a także niewielka wartość szerokości starcia powierzchni przyłożenia ostrza tej płytki, pracującej w oprawce o wysięgu 700 mm, miała wpływ na zarejestrowaną najmniejszą wartość chropowatości powierzchni w końcowym etapie obróbki. Świadczy to o tym, że płytka bardzo dobrze zniosła tak długą drogę skrawania. Oczywiście w przypadku obu ostrzy wystąpiło zjawisko utleniania i łuszczenia powłoki. Na ostrzach omawianej płytki zarejestrowano także niewielkie ilości narostu, chociaż większą jego ilość zanotowano na ostrzu pracującym w oprawce o wysięgu 120 mm. Płytki KCS10B i MP9005 charakteryzowały się najmniejszymi wartościami zużycia ocenianymi parametrem V_{Bc} co spowodowane było również zastosowaną powłoką PVD AlTiN, która charakteryzuje się wysoką odpornością na ścieranie. Potwierdzeniem tego są wyniki badań uzyskane przez Zhang i innych [97]. Wykonali oni badania obróbki stopu Inconel 718 podczas toczenia z dużymi prędkościami skrawania (120, 160 i 200 m/min), przy użyciu narzędzi wykonanych z węglików wolframu o ujemnej i dodatniej geometrii ostrza, z nałożoną powłoką TiAlN oraz narzędzia, wykonanego również z węglików wolframu o ujemnej geometrii ostrza, lecz z nałożoną powłoką (Al, Ti)N, bogatą w aluminium. Badania wykazały, że płytki o ujemnej geometrii z powłoką (Al, Ti)N mają znacznie dłuższą żywotność, niż płytki z powłoką TiAlN, zarówno o geometrii dodatniej, jak i ujemnej, dla wszystkich testowanych prędkości skrawania.

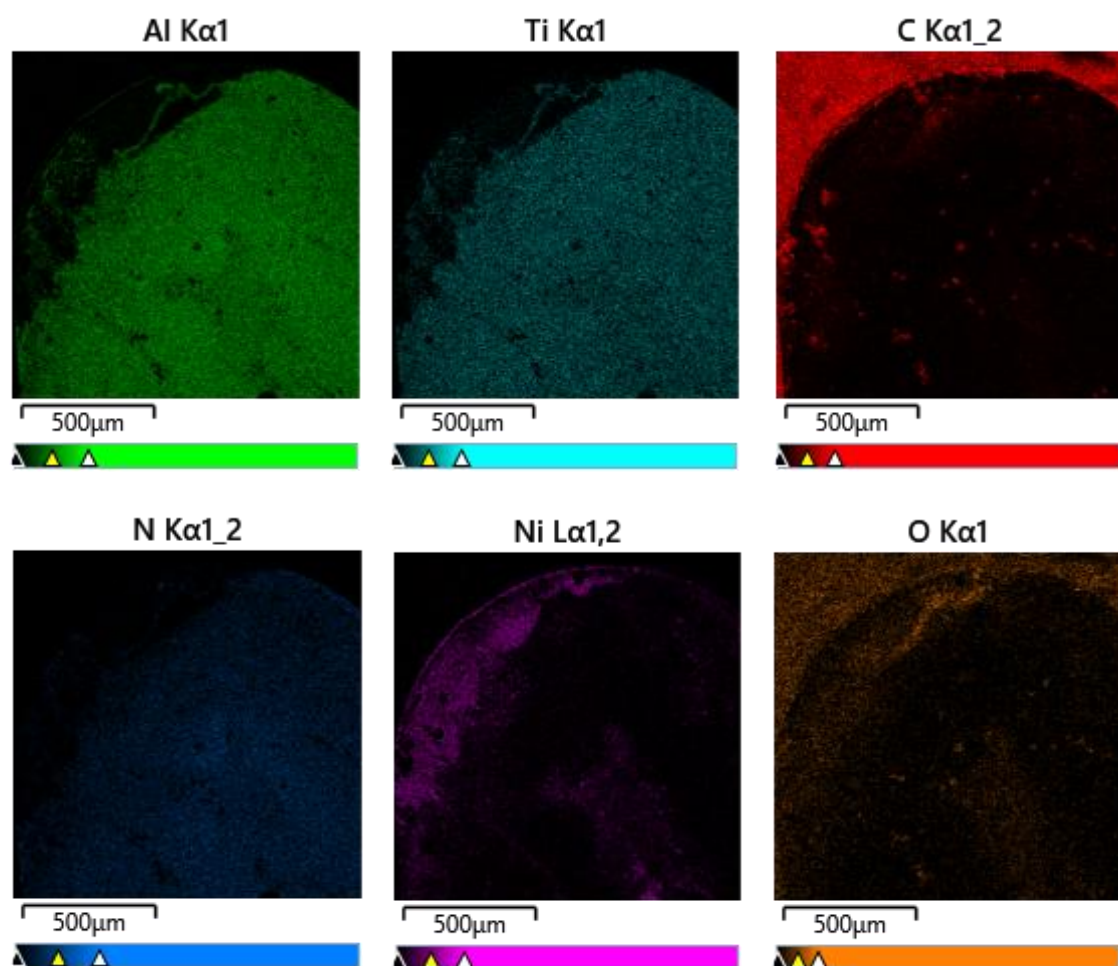
Analiza EDS ostrzy płytki KCS10B pozwala stwierdzić, że z ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 120 mm nie została całkowicie usunięta powłoka, o czym świadczy obecność pierwiastka tytanu (Ti) w strefie skrawania. W przypadku ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 700 mm występujące zużycie ostrza miało jeszcze mniej inwazyjny charakter, gdyż w obszarze skrawania nadal występują częściowo niewielkie ilości pierwiastków składowych powłoki takich jak glin (Al) i tytan (Ti). Oznacza to, że powłoka nie została całkowicie usunięta. Potwierdzeniem mniejszej degradacji ostrza pracującego w oprawce o dłuższym wysięgu jest również widoczna mniejsza zawartość węgla (C) na krawędzi skrawającej co świadczy o tym, że powłoka nie została całkowicie usunięta w porównaniu z ostrzem pracującym w oprawce o krótszym wysięgu. Jest to bardzo pozytywne i świadczy o dobrej kondycji krawędzi skrawającej. Oczywiście w przypadku obu ostrzy są miejsca gdzie powłoka została całkowicie starta o czym świadczy obecność wolframu (W). W obszarach, które uległy zużyciu widoczna jest obecność pierwiastków składowych

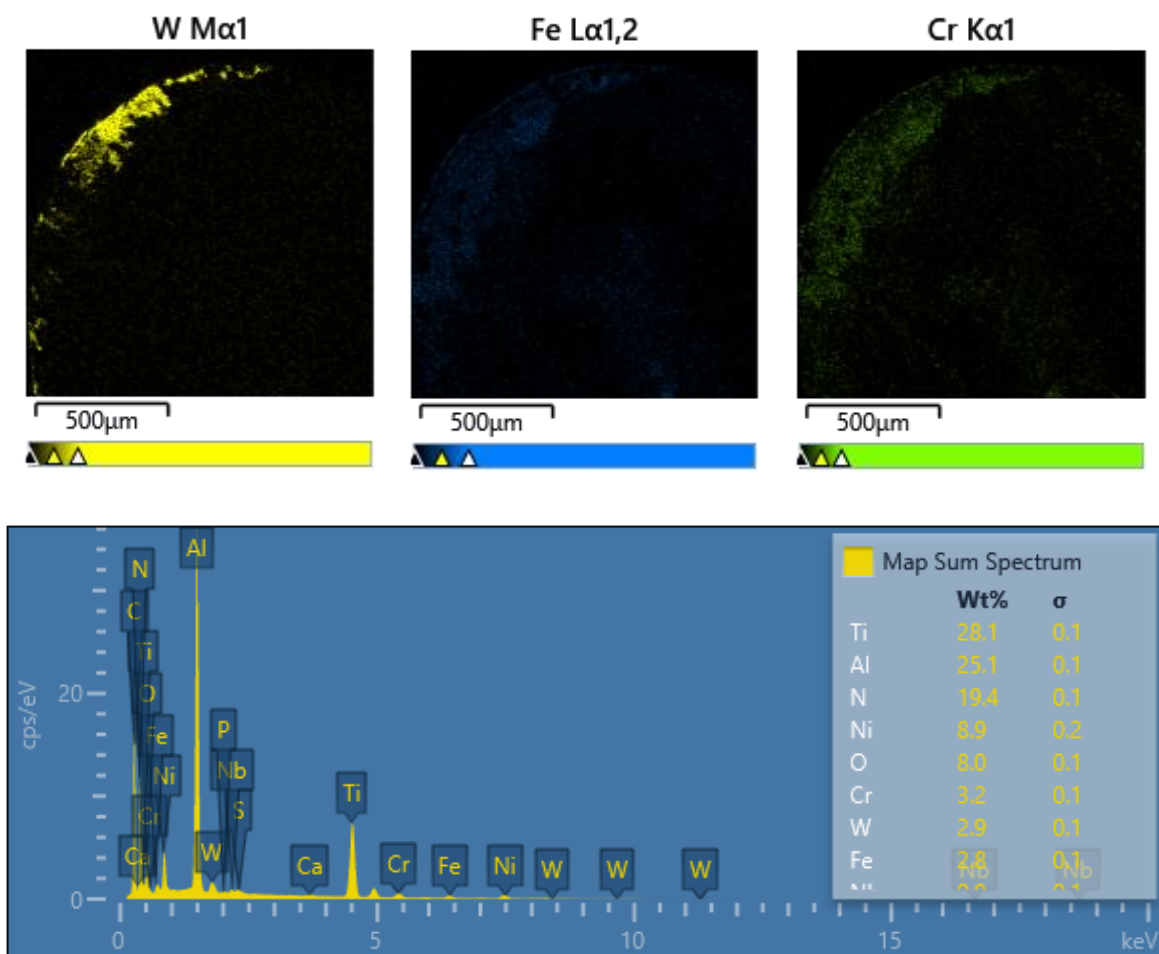
materiału obrabianego tj. niklu (Ni), chromu (Cr) i żelaza (Fe). Jest to wynikiem adhezji stopu 718 do materiału ostrza. W przypadku ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 120 mm, widoczna jest również większa ilość pierwiastka tlenu (O), co świadczy o występowaniu wyższej temperatury skrawania w porównaniu do ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 700 mm (Rys. 6.48 i Rys. 6.49).





Rys. 6.48. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VBGT 160408LF KCS10B po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 120 mm



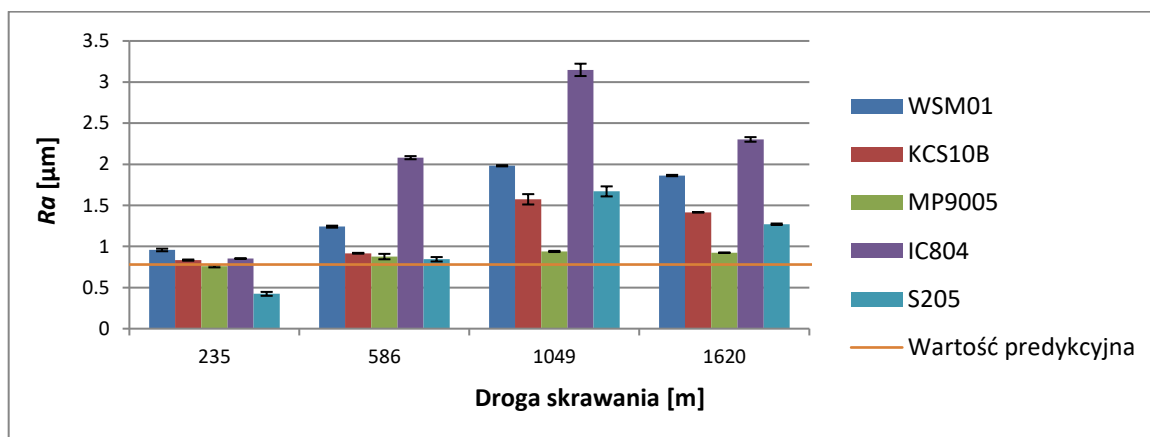


Rys. 6.49. Obrazy analizy EDS zużytego ostrza płytki VBGT 160408LF KCS10B po 19 min obróbki w oprawce o wysięgu 700 mm

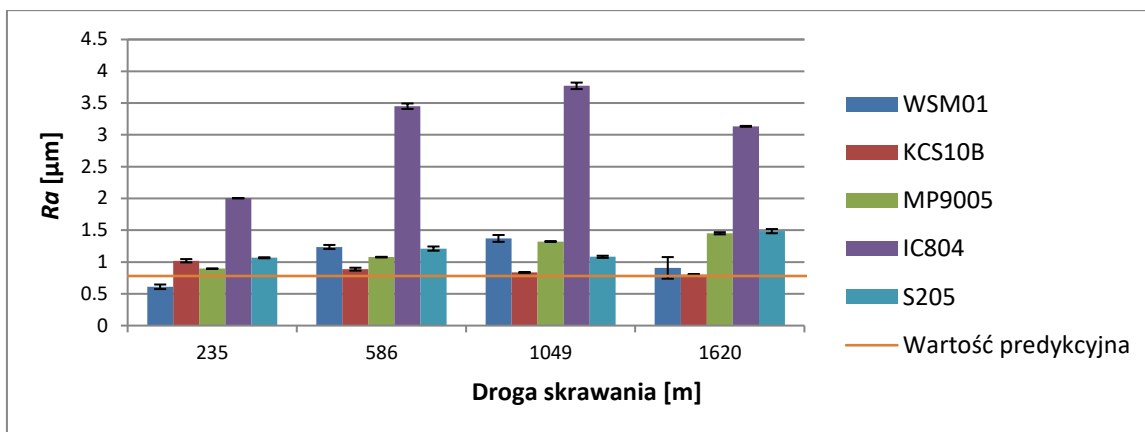
6.2.2 Ocena chropowatości i topografii powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej obrobionych próbek materiału

Biorąc pod uwagę wpływ wysięgu oprawki na chropowatość powierzchni, ocenianą parametrem R_a , należy zauważyć, że kontrolowana była ona w punktach odnoszących się do badanej dokładności wymiarowej. Prócz sztywności oprawki należy jeszcze uwzględnić aspekt wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, którego wartość według Niesłonego i innych [80] ma wpływ na chropowatość obrobionej powierzchni, ponieważ wpływa na minimalną grubość warstwy skrawanej. W przypadku obu narzędzi można zauważyć, że wartość chropowatości ewoluowała wraz z upływem pokonywanej przez ostrze drogi skrawania. Dla przyjętych parametrów skrawania, wykorzystując równania (3.3) i (3.4), wyznaczono teoretyczną – przewidywaną wartość parametru chropowatości R_a , która wynosi $R_a = 0,78 \mu\text{m}$. Ponieważ, zgodnie z pracą [71], dwuwymiarowy parametr R

określający chropowatość powierzchni jest uważany za równoważny parametrowi S w analizie trójwymiarowej, przyjęto zatem identyczną wartość predykcyjną dla parametru Sa . Dla oprawki o wysięgu 120 mm najmniejszą średnią wartość parametru Ra w początkowej fazie obróbki zarejestrowano dla powierzchni obrobionej płytką S205 i wyniosła $Ra = 0,423 \mu\text{m}$. Natomiast największą średnią wartość chropowatości na tym etapie zanotowano dla powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki płytką WSM01, która wyniosła $Ra = 0,957 \mu\text{m}$. Biorąc pod uwagę końcowy etap obróbki dla omawianego narzędzia najmniejszą średnią wartość parametru Ra zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką MP9005 i wyniosła $Ra = 0,924 \mu\text{m}$. Powierzchnią charakteryzującą się największą średnią wartością chropowatości była powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki płytką IC804, dla której $Ra = 2,302 \mu\text{m}$ (Rys. 6.50). W przypadku oprawki o wysięgu 700 mm, dla początkowego etapu obróbki najmniejszą średnią wartość parametru Ra zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką WSM01, gdzie $Ra = 0,610 \mu\text{m}$. Największą średnią wartość chropowatości w tej fazie zarejestrowano dla powierzchni obrobionej płytką IC804, dla której $Ra = 2,003 \mu\text{m}$. Rozpatrując końcowy etap obróbki dla niniejszego narzędzia, najmniejszą średnią wartość parametru Ra otrzymano dla powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki płytką KCS10B i wyniosła $Ra = 0,804 \mu\text{m}$. Natomiast największą średnią wartość chropowatości zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką IC804, gdzie $Ra = 3,133 \mu\text{m}$ (Rys. 6.51).



Rys. 6.50. Wartość parametru Ra chropowatości powierzchni w zależności od drogi skrawania dla ostrzy badanych w oprawce o wysięgu 120 mm



Rys. 6.51. Wartość parametru Ra chropowatości powierzchni w zależności od drogi skrawania dla ostrzy badanych w oprawce o wysięgu 700 mm

Na rysunku 6.52 przedstawiono przykładowe wydruki pomiarów parametru Ra chropowatości powierzchni dla grupy pięciu próbek obrobionych poszczególnymi ostrzami. Analizując wpływ wysięgu oprawki na topografię powierzchni, ocenianą parametrem Sa , można zauważyć, że wyniki pomiarów kształtują się na podobnym poziomie jak w przypadku wartości chropowatości powierzchni [120, 128]. W przypadku oprawki o wysięgu 120 mm najmniejszą średnią wartość parametru Sa w początkowej fazie procesu obróbki zarejestrowano dla powierzchni, którą obrobiono płytką S205 i wyniosła $Sa = 0,436 \mu\text{m}$. Największą średnią wartość topografii na tym etapie otrzymano dla powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki płytką WSM01, która wyniosła $Sa = 1,01 \mu\text{m}$. Odnosząc się do końcowego etapu obróbki dla niniejszego narzędzia, najmniejszą średnią wartość parametru Sa zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką MP9005 i wyniosła $Sa = 0,952 \mu\text{m}$. Powierzchnią charakteryzującą się największą średnią wartością tego parametru, była powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki płytką IC804, dla której $Sa = 2,606 \mu\text{m}$ (Rys. 6.53).

ACCRETECH Ver. 7.00 p3
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 0.751 μ m

1Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 0.858 μ m

2Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 0.935 μ m

3Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 0.922 μ m

4Z

ACCRETECH Ver. 7.00 p2
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 1.004 μ m

1W

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 0.901 μ m

2W

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 0.834 μ m

3W

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 0.801 μ m

4W

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A 2P

Work =
Comment =

Ra = 0.839 μ m

1Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 0.921 μ m

2Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 1.538 μ m

3Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 1.416 μ m

4Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A P1

Work =
Comment =

Ra = 0.589 μ m

1W

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 1.218 μ m

2W

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 1.404 μ m

3W

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 1.004 μ m

4W-

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A P1

Work =
Comment =

Ra = 0.949 μ m

1Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 1.234 μ m

2Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

Work =
Comment =

Ra = 1.986 μ m

3Z

ACCRETECH Ver. 7.00
surf from 130A

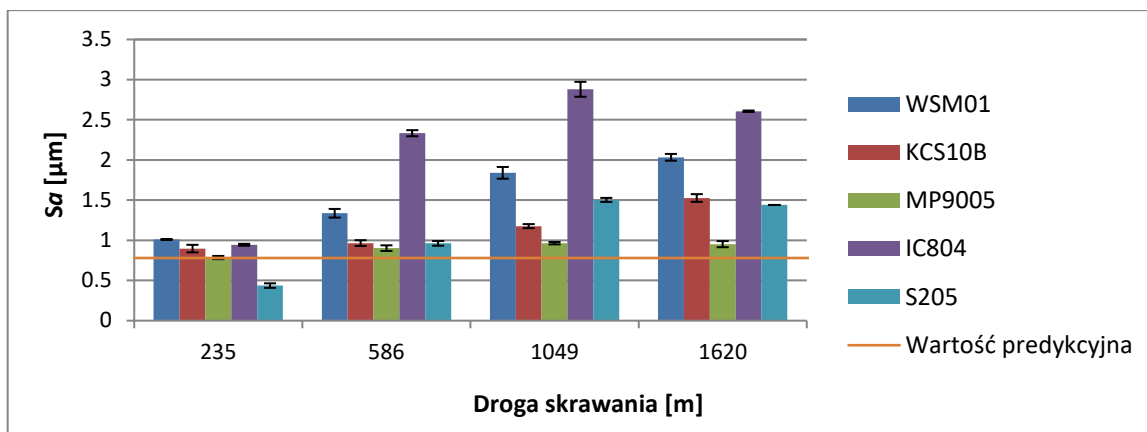
Work =
Comment =

Ra = 1.838 μ m

4Z

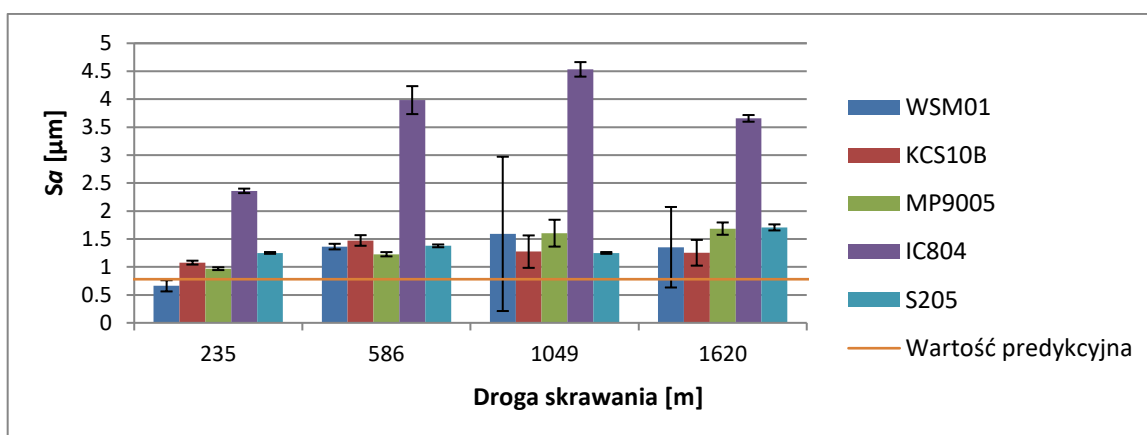
ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A	P5	ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A	P5	ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A	P4	ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A	P4	ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A	P3
Work Comment =	1W		Work Comment =	1Z		Work Comment =		1W	Work Comment =		1Z	Work Comment =		1W
Ra =	1. 072 μ m		Ra =	0. 438 μ m		Ra =	2. 004 μ m		Ra =	0. 855 μ m		Ra =	0. 897 μ m	
ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A	
Work Comment =	2W		Work Comment =	2Z		Work Comment =		2W	Work Comment =		2Z	Work Comment =		2W
Ra =	1. 232 μ m		Ra =	0. 861 μ m		Ra =	3. 477 μ m		Ra =	2. 092 μ m		Ra =	1. 074 μ m	
ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A	
Work Comment =	3W		Work Comment =	3Z		Work Comment =		3W	Work Comment =		3Z	Work Comment =		3W
Ra =	1. 093 μ m		Ra =	1. 707 μ m		Ra =	3. 802 μ m		Ra =	3. 194 μ m		Ra =	1. 319 μ m	
ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A		ACCURETECH surf from	Ver. 7.00 130A	
Work Comment =	4W		Work Comment =	4Z		Work Comment =		4W	Work Comment =		4Z	Work Comment =		4W
Ra =	1. 507 μ m		Ra =	1. 276 μ m		Ra =	3. 129 μ m		Ra =	2. 320 μ m		Ra =	1. 443 μ m	

Rys. 6.52. Przykładowe wydruki wartości parametru chropowatości R_a dla grupy pięciu próbek obrabianych poszczególnymi ostrzami: P1 – ostrze WSM01, P2 – ostrze KCS10B, P3 – ostrze MP9005, P4 – ostrze IC804, P5 – ostrze S205 (1Z – powierzchnia pierwsza zewnętrzna, 1W – powierzchnia pierwsza wewnętrzna)



Rys. 6.53. Wartość parametru Sa topografii powierzchni w zależności od drogi skrawania dla ostrzy badanych w oprawce o wysięgu 120 mm

Dla oprawki o wysięgu 700 mm w początkowym etapie obróbki najmniejszą średnią wartość parametru Sa zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką WSM01, gdzie $Sa = 0,662 \mu\text{m}$. Natomiast największą średnią wartość topografii w tej fazie procesu zarejestrowano dla powierzchni obrobionej płytką IC804, dla której $Sa = 2,36 \mu\text{m}$. Biorąc pod uwagę końcowy etap obróbki dla omawianego narzędzia, najmniejszą średnią wartość parametru Sa otrzymano dla powierzchni obrobionej płytką KCS10B i wyniosła $Sa = 1,253 \mu\text{m}$. Natomiast powierzchnią charakteryzującą się największą średnią wartością tego parametru, była powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki płytką IC804, dla której $Sa = 3,656 \mu\text{m}$ (Rys. 6.54).



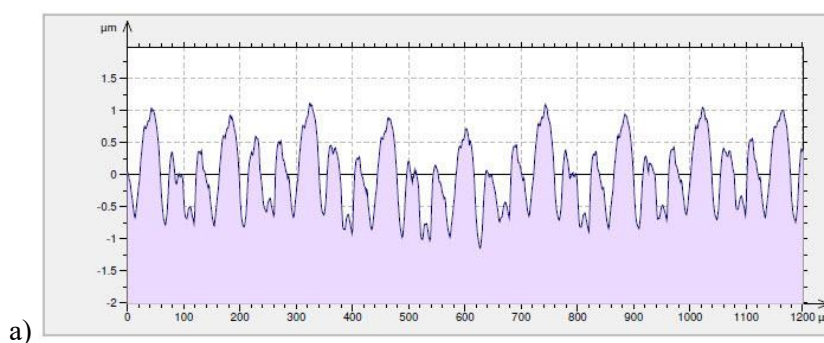
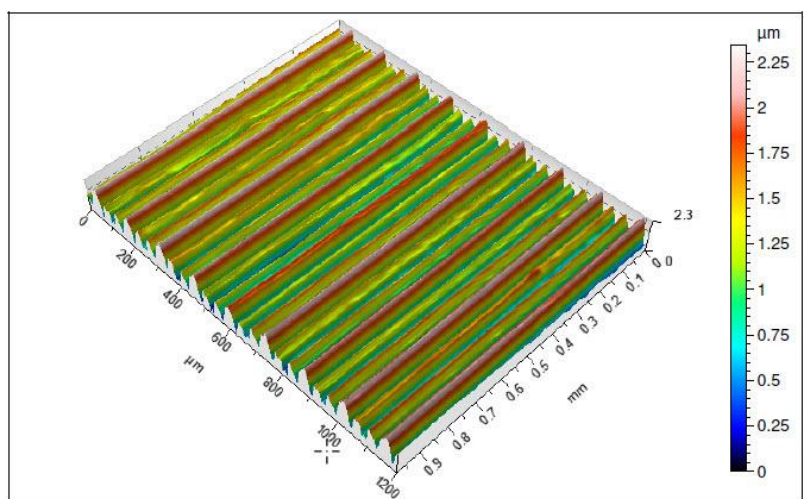
Rys. 6.54. Wartość parametru Sa topografii powierzchni w zależności od drogi skrawania dla ostrzy badanych w oprawce o wysięgu 700 mm

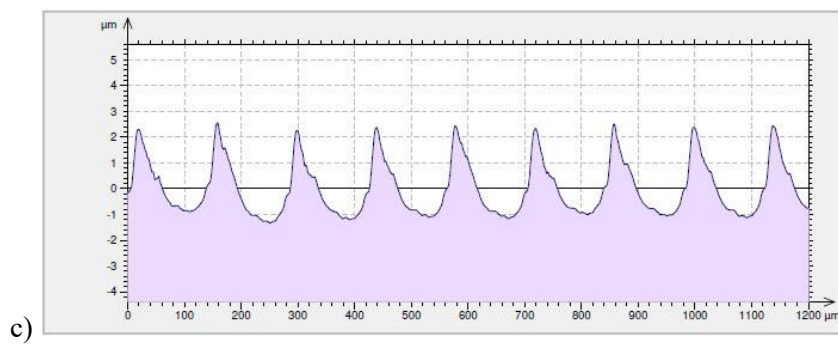
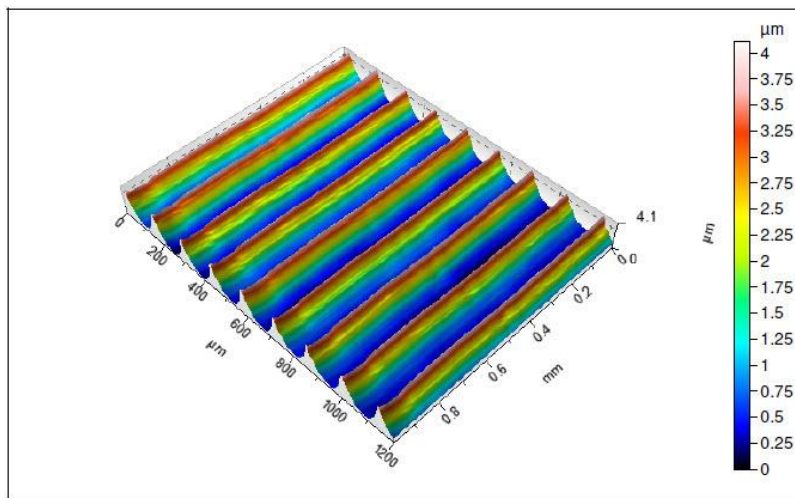
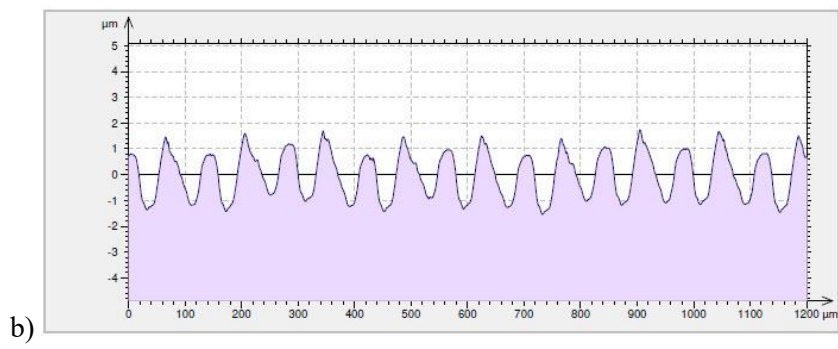
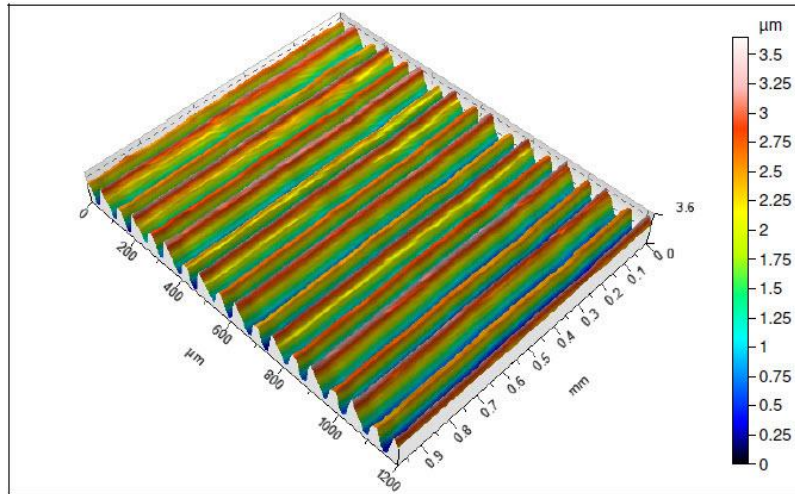
Należy zauważyć, że we wszystkich przypadkach parametry Sa mają większą wartość w porównaniu do parametrów Ra , co jest spowodowane wielkością badanego obszaru. Parametr topografii został zbadany powierzchniowo a nie liniowo, co powoduje, iż obejmuje

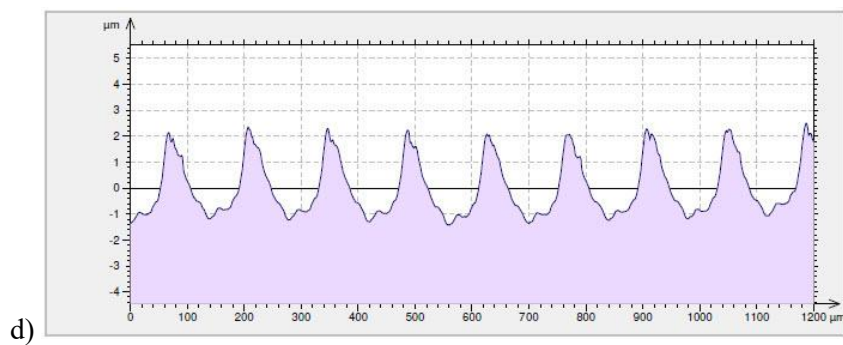
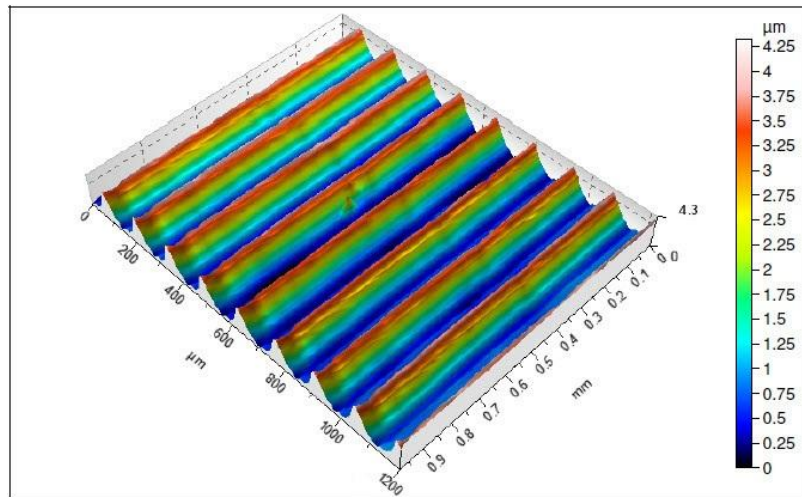
większe spektrum nierówności powierzchni. W przypadku obu oprawek największe wartości parametrów Ra i Sa w końcowym etapie obróbki zarejestrowano dla powierzchni obrobionych ostrzami płytki IC804. Trzeba jednak zaznaczyć, że oprócz maksymalnej wartości zużycia, ostrza te odznaczały się, największą wartością promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n , co częściowo przyczyniło się uzyskania największej wartości powyższych parametrów. Warto również zaznaczyć, że w miarę upływu czasu obróbki w przeciwieństwie do uzyskanej dokładności wymiarowej w przypadku chropowatości powierzchni, mniejsze jej wartości zarejestrowano dla niektórych ostrzy (WSM01, KCS10B) pracujących w oprawce o wysięgu 700 mm. Jest to spowodowane tym, iż krótsza oprawka zapewnia większą sztywność układu OUPN, co powoduje, że większe obciążenia są przenoszone bezpośrednio na ostrze skrawające. Z kolei oprawka o dłuższym wysięgu, ale wyposażona w tłumik drgań z racji swojej mniejszej sztywności przejmuje część obciążeń poprzez wspomniane wcześniej ugięcie. Powoduje to w przypadku niektórych ostrzy mniejsze zużycie powierzchni przyłożenia, jak również zmienia charakter samego zużycia ostrza co ma wpływ na uzyskiwaną chropowatość powierzchni.

Analizowane mapy izometryczne badanych powierzchni ukazują równomierny rozkład dolin i grzbietów w przypadku obróbki oprawką o wysięgu 120 mm. W odniesieniu do oprawki o wysięgu 700 mm rozkład ten nie przedstawia się tak równomiernie, co jest spowodowane mniejszą stabilnością procesu obróbki. W większości przypadków powierzchnie te mają różne wysokości mikronierówności. Omawiane w dalszej części mapy izometryczne dotyczą powierzchni z początkowego i końcowego etapu obróbki, kiedy przebyta droga skrawania ostrzy zbliżała się do wartości 1600 m. W celu uszczegółowienia analizowanych map, zostały również przedstawione ich wykresy dwuwymiarowe. W przypadku oprawki o wysięgu 120 mm najmniejszą średnią wartość wysokości nierówności Sz w początkowym etapie obróbki uzyskano dla powierzchni obrobionej płytką S205, gdzie $Sz = 2,363 \mu m$. Natomiast dla powierzchni obrobionej tym ostrzem parametr Sp czyli maksymalna wysokość pików powierzchni miał nieznacznie większe wartości w porównaniu do parametru Sv , określającego maksymalną wysokość dolin powierzchni. Średnie wartości omawianych parametrów zanotowano na poziomie $Sp = 1,273 \mu m$ i $Sv = 1,09 \mu m$. Rozważając nadal początkowy etap obróbki dla powierzchni wykonywanych ostrzami zamocowanymi w oprawce o wysięgu 120 mm, biorąc pod uwagę wartości wysokości nierówności, wzrastały one odpowiednio dla powierzchni obrabianych ostrzami MP9005, KCS10B, IC804 i WSM01. Dla powierzchni obrobionej ostrzem MP9005 średnią

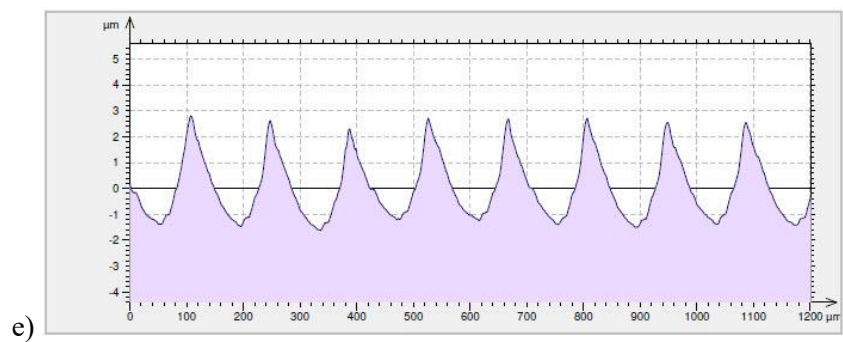
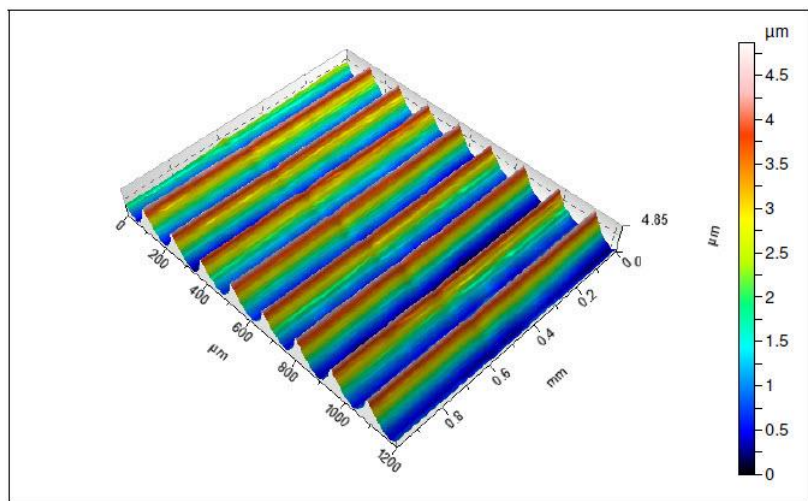
wartość wysokości nierówności zanotowano na poziomie $S_z = 3,586 \mu\text{m}$, natomiast wysokość pików wyniosła $S_p = 1,926 \mu\text{m}$ i wysokość dolin $S_v = 1,66 \mu\text{m}$. Z kolei na powierzchni obrobionej ostrzem KCS10B wysokość nierówności zarejestrowano na poziomie $S_z = 4,156 \mu\text{m}$, natomiast wysokość pików i dolin wyniosła odpowiednio $S_p = 2,75 \mu\text{m}$ i $S_v = 1,406 \mu\text{m}$. Dla powierzchni obrobionej ostrzem IC804 zanotowana wartość wysokości nierówności jest równa $S_z = 4,266 \mu\text{m}$, a wartości wysokości pików i dolin nierówności przedstawiają się następująco $S_p = 2,7 \mu\text{m}$ i $S_v = 1,563 \mu\text{m}$. Największą średnią wartość wysokości nierówności uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem WSM01, gdzie $S_z = 4,903 \mu\text{m}$. Z kolei średnie wartości wysokości pików i dolin nierówności zarejestrowano na poziomie $S_p = 3,106 \mu\text{m}$ i $S_v = 1,796 \mu\text{m}$ (Rys. 6.55).





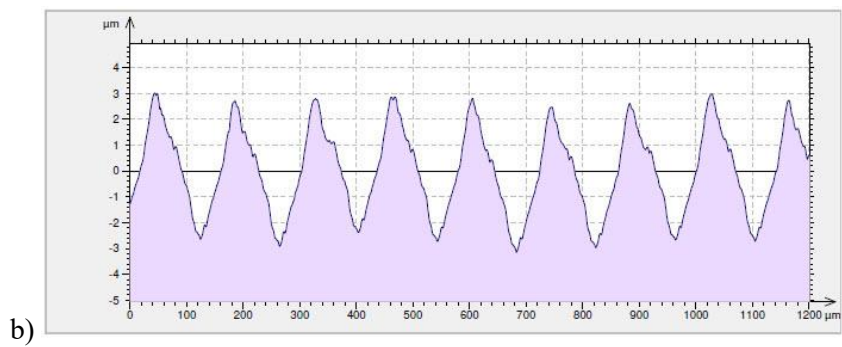
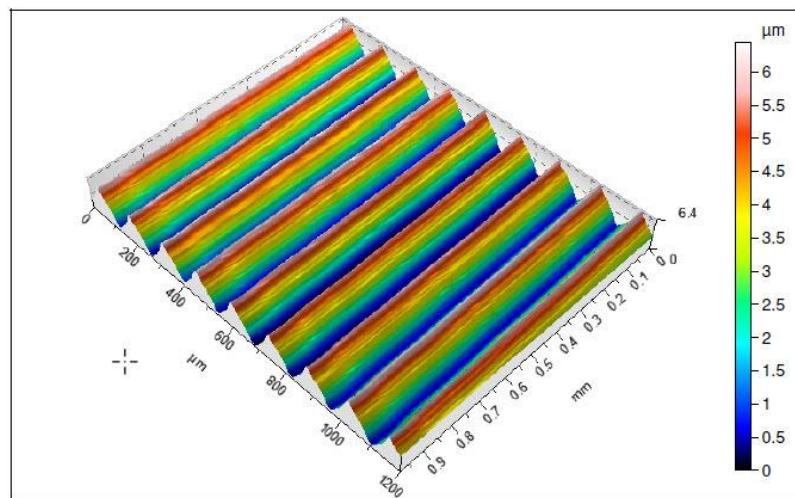
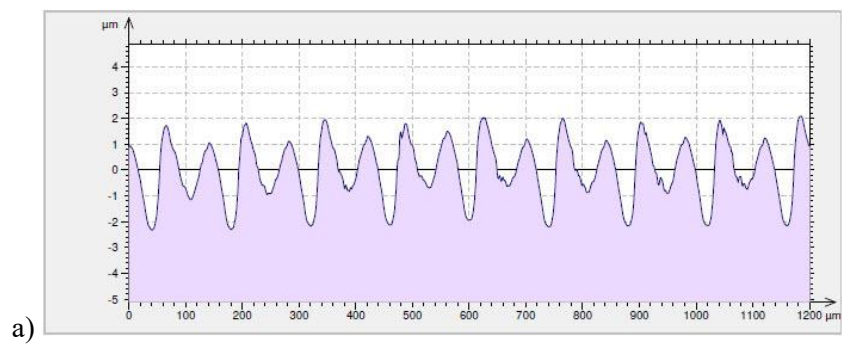
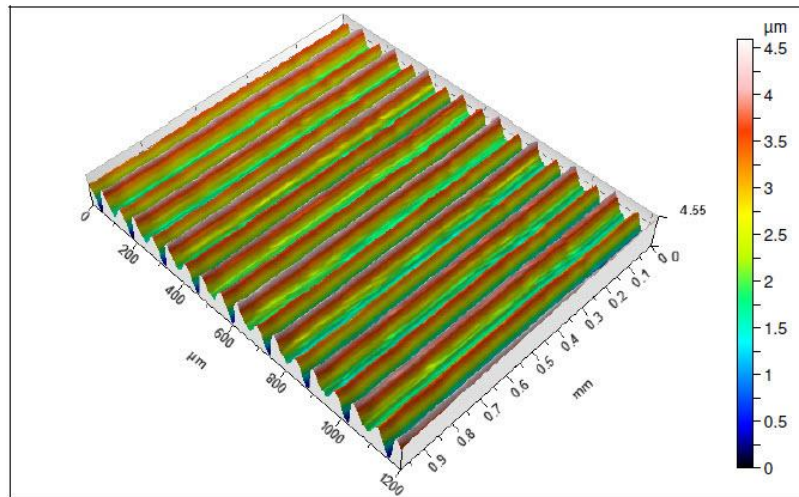


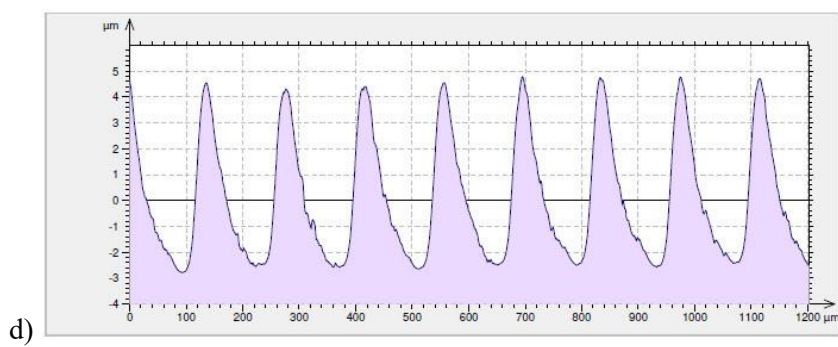
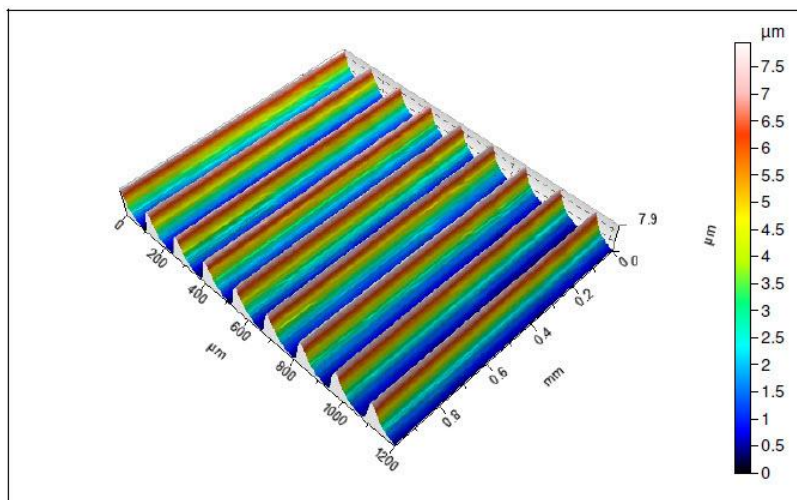
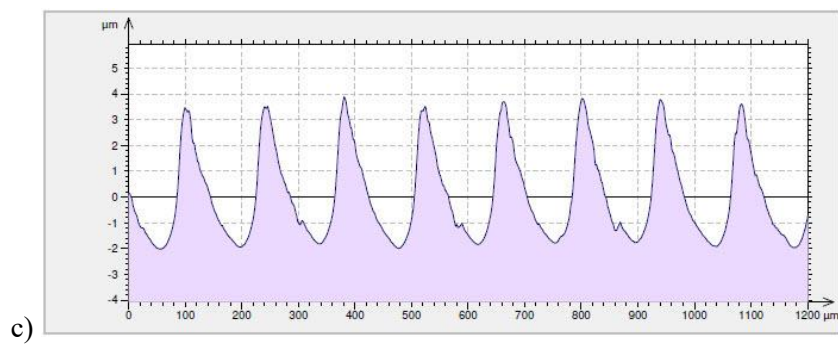
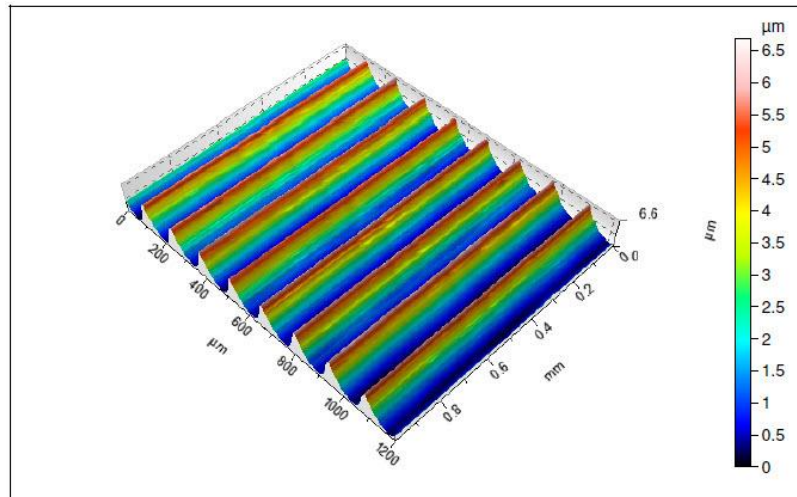
Rys. 6.55.
Topografia 3D
oraz profil
chropowatości
2D powierzchni
uzyskanych w
wyniku obróbki
ostrzem:
a) S205,
b) MP9005,
c) KCS10B,
d) IC804,
e) WSM01 w
oprawce o
wysięgu 120 mm
w początkowym
etapie obróbki

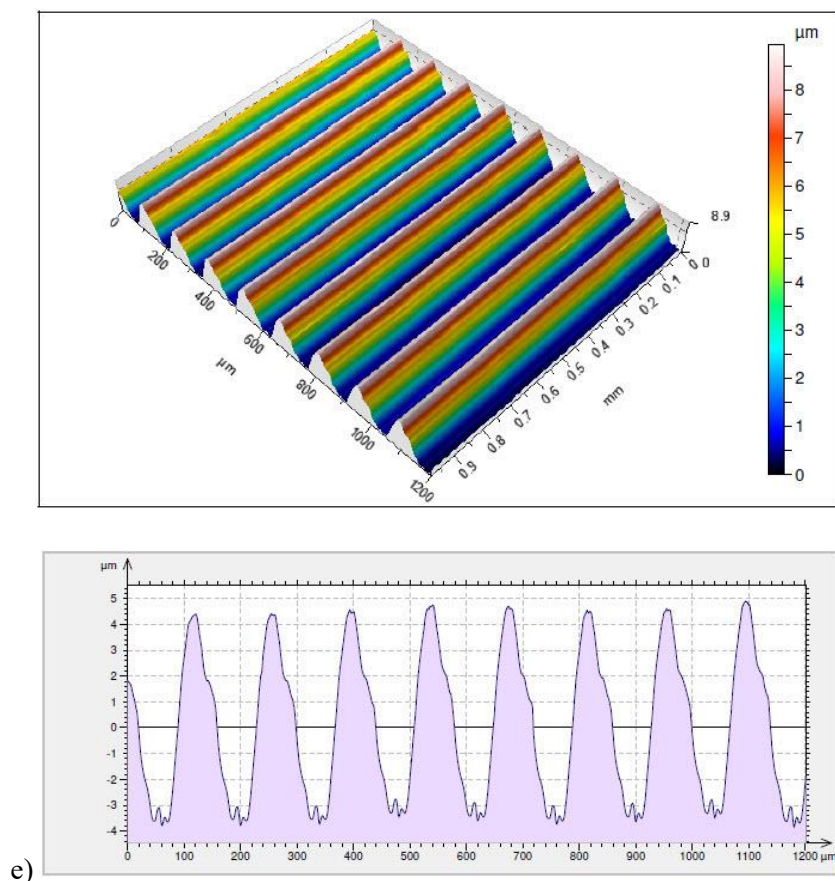


Odnosząc się do otrzymanych map izometrycznych powierzchni z rysunku 6.55, można wyciągnąć wnioski, że wartości wysokości nierówności nie są wysokie, co oznacza, że skrawność ostrzy skrawające była w kondycji, która nie wskazuje na jakiegokolwiek duże zużycie. Jednak analizując otrzymane parametry Sp i Sv należy zwrócić uwagę, iż we wszystkich przypadkach wartość parametru Sp była większa w porównaniu do wartości parametru Sv co oznacza, że charakterystyka topografii nie jest korzystna z punktu widzenia funkcjonalnego i tribologicznego, ponieważ sprzyja wzrostowi współczynnika pustki Sp/Sz , o którym wspomina Pawlus i inni [123].

Najmniejszą średnią wartość wysokości nierówności Sz w końcowym stadium obróbki uzyskano dla powierzchni obrobionej płytką MP9005, dla której $Sz = 4,67 \mu\text{m}$. Dla powierzchni obrobionej tym ostrzem parametr Sp czyli maksymalna wysokość pików powierzchni miał nieznacznie mniejsze wartości w porównaniu do parametru Sv , określającego maksymalną wysokość dolin powierzchni. Średnie wartości wspomnianych parametrów wynosiły $Sp = 2,203 \mu\text{m}$ i $Sv = 2,47 \mu\text{m}$. Wartości wysokości nierówności powierzchni dla końcowej fazy obróbki wzrastały odpowiednio dla powierzchni obrobionych ostrzami S205, KCS10B, WSM01 i IC804. Powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki ostrzem S205 prezentuje wartość średnią wysokości nierówności na poziomie $Sz = 6,39 \mu\text{m}$. Natomiast wysokości pików i dolin nierówności powierzchni przedstawiają się następująco $Sp = 3,22 \mu\text{m}$ i $Sv = 3,17 \mu\text{m}$. Dla powierzchni obrobionej ostrzem KCS10B średnia wartość wysokości nierówności wyniosła $Sz = 6,753 \mu\text{m}$. Parametry wysokości pików i dolin nierówności powierzchni zarejestrowano na poziomie $Sp = 4,546 \mu\text{m}$ i $Sv = 2,203 \mu\text{m}$. Z kolei dla powierzchni obrobionej ostrzem WSM01 zanotowano następującą wartość wysokości nierówności $Sz = 8,033 \mu\text{m}$. Wysokość pików i dolin nierówności powierzchni wykonanej tym ostrzem wyniosła $Sp = 5,07 \mu\text{m}$ i $Sv = 2,963 \mu\text{m}$. Największa wartość wysokości nierówności została zarejestrowana dla powierzchni obrobionej ostrzem IC804, gdzie $Sz = 8,966 \mu\text{m}$. Natomiast wartość wysokości pików i dolin nierówności powierzchni uzyskano na poziomie $Sp = 4,97 \mu\text{m}$ i $Sv = 3,993 \mu\text{m}$ (Rys. 6.56).



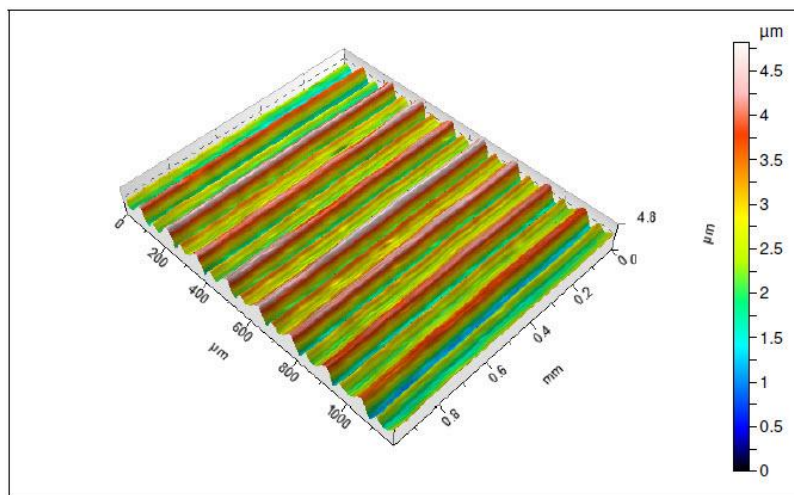


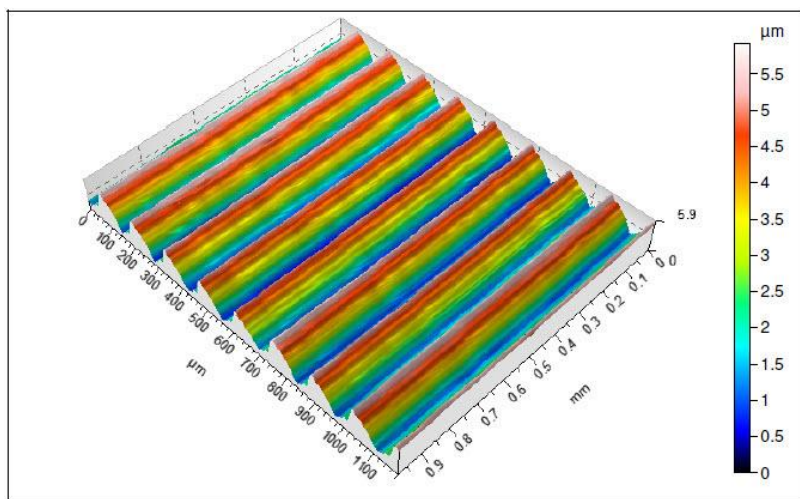
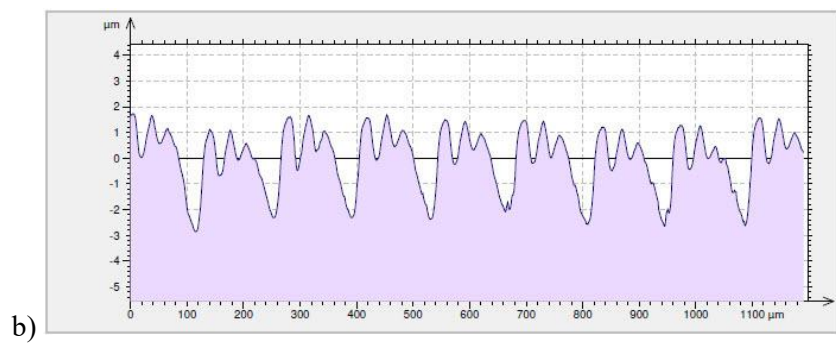
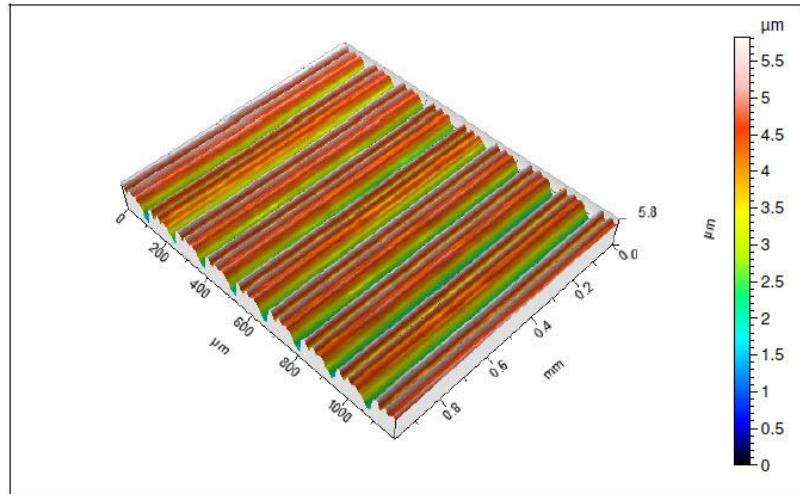
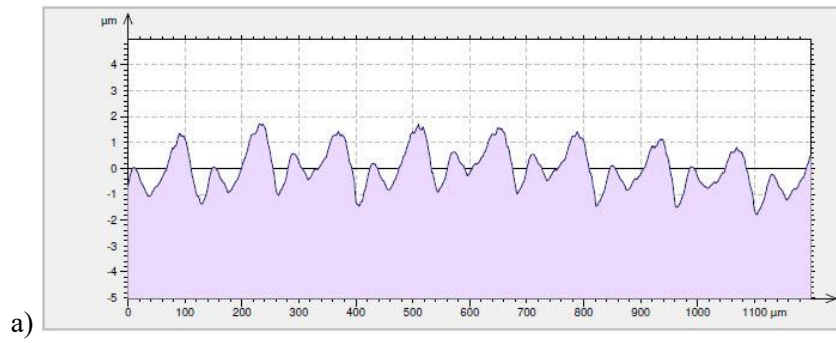


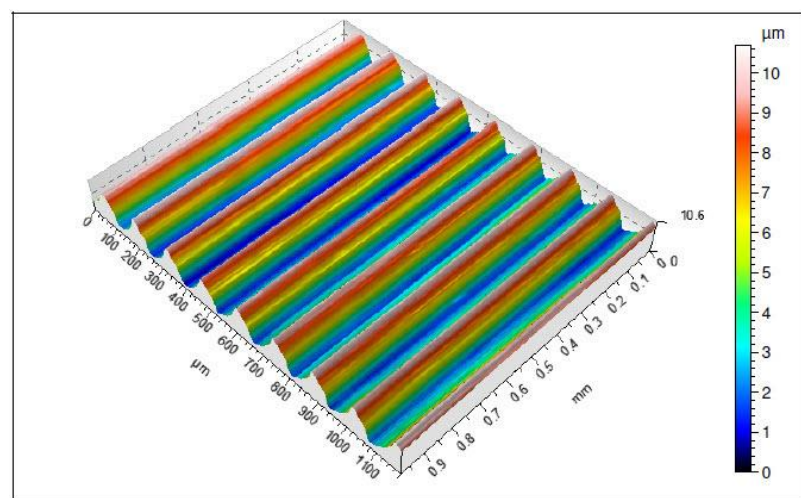
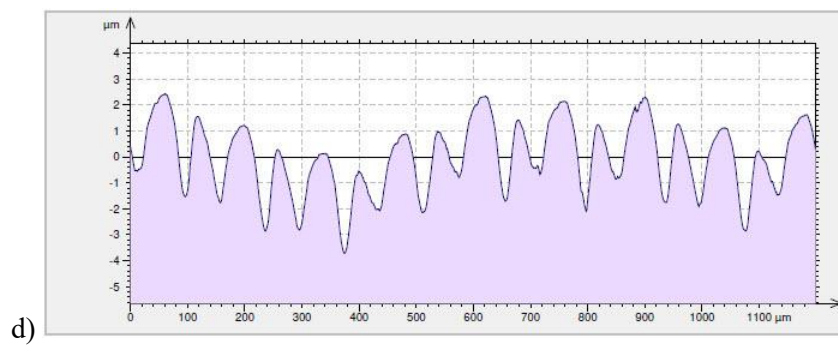
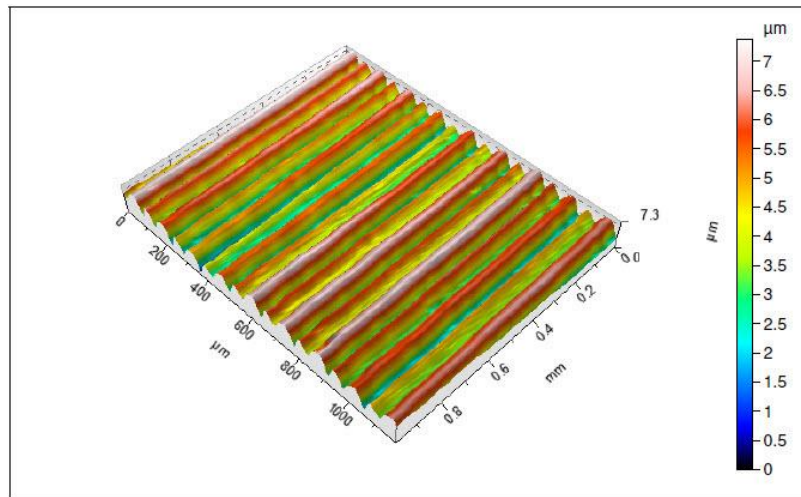
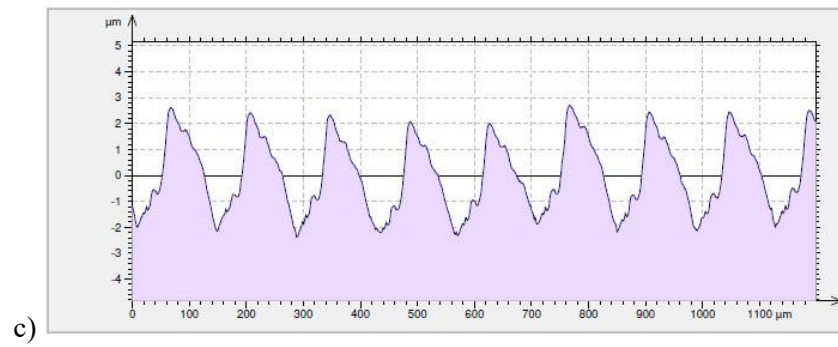
Rys. 6.56. Topografia 3D oraz profil chropowatości 2D powierzchni uzyskanych w wyniku obróbki ostrzem: a) MP9005, b) S205, c) KCS10B, d) WSM01, e) IC804 w oprawce o wysięgu 120 mm w końcowym etapie obróbki

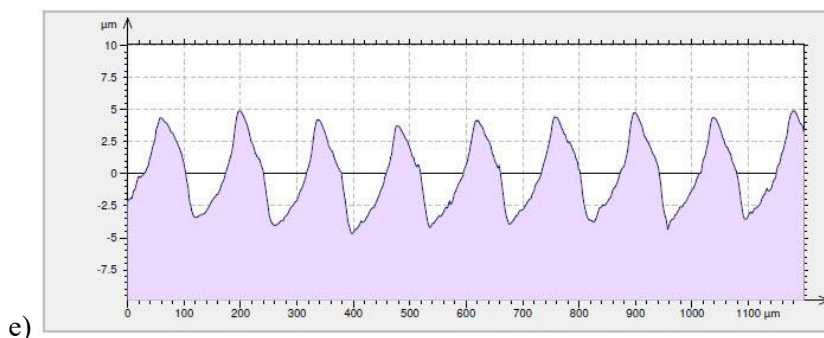
Biorąc pod uwagę ostateczny etap obróbki należy zwrócić uwagę, że pod względem funkcjonalnym i tribologicznym najkorzystniejszy rezultat uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem MP9005 nie tylko ze względu na mniejszą wartość wysokości nierówności. Pozytywna jest także rezultat uzyskanych parametrów wysokości pików S_p i dolin S_v nierówności powierzchni, ponieważ wartość wysokości pików jest mniejsza od wartości wysokości dolin nierówności powierzchni. Taki układ obu wielkości nie sprzyja wzrostowi współczynnika pustki. W przypadku powierzchni uzyskanej ostrzem S205 otrzymane rezultaty biorąc pod uwagę wartości S_p i S_v nie są już tak korzystne jak w przypadku powierzchni obrobionej ostrzem MP9005, chociaż ich wartość jest do siebie zbliżona. Najmniej korzystne wyniki uzyskano dla pozostałych trzech powierzchni obrobionych ostrzami KCS10B, WSM01 i IC804, biorąc pod uwagę względy funkcjonalne. Dla pozostałych trzech powierzchni wielkości pików nierówności powierzchni S_p miały znacznie większe wartości w porównaniu do wielkości dolin nierówności powierzchni S_v , co sprzyja wzrostowi współczynnika pustki.

Biorąc pod uwagę topografię powierzchni uzyskanych w wyniku obróbki płytkami skrawającymi pracującymi w oprawce o wysięgu 700 mm w początkowej fazie obróbki, najmniejszą wartość wysokości nierówności uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem WSM01, gdzie $S_z = 4,793 \mu\text{m}$. Powierzchnia ta charakteryzowała się mniejszymi wartościami pików nierówności powierzchni S_p , niż wartościami dolin nierówności powierzchni S_v , dla których $S_p = 2,023 \mu\text{m}$ i $S_v = 2,773 \mu\text{m}$. Wartości wysokości nierówności powierzchni na tym etapie obróbki wzrastały odpowiednio dla powierzchni obrobionych ostrzami MP9005, S205, KCS10B i IC804. Dla powierzchni obrobionej ostrzem MP9005 wartość wysokości nierówności powierzchni wyniosła $S_z = 6,04 \mu\text{m}$. Z kolei wartości wysokości pików nierówności i dolin nierówności powierzchni wyniosły na poziomie $S_p = 2,06 \mu\text{m}$ i $S_v = 3,976 \mu\text{m}$. Nieco większą wartość wysokości nierówności zarejestrowano dla powierzchni obrobionej ostrzem S205, gdzie $S_z = 6,55 \mu\text{m}$. Natomiast wartości pików nierówności powierzchni i dolin nierówności powierzchni uzyskano na poziomie $S_p = 2,893 \mu\text{m}$ i $S_v = 3,66 \mu\text{m}$. Powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki ostrzem KCS10B charakteryzowała się jeszcze większą wartością średnią wysokości nierówności powierzchni, dla której $S_z = 7,366 \mu\text{m}$. Powierzchnia ta charakteryzowała się wielkościami pików nierówności powierzchni i dolin nierówności powierzchni o wartościach $S_p = 2,513 \mu\text{m}$ i $S_v = 4,856 \mu\text{m}$. Natomiast powierzchnią, dla której zanotowano największą wartość wysokości nierówności jest powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki ostrzem IC804, gdzie $S_z = 10,89 \mu\text{m}$. Dla powierzchni tej wartość pików nierówności powierzchni oraz dolin nierówności powierzchni wyniosła $S_p = 5,246 \mu\text{m}$ i $S_v = 5,646 \mu\text{m}$ (Rys. 6.57). Analizując mapy izometryczne oraz profile 2D powierzchni na rysunku 6.57 można zauważyć, że powierzchnie nie są już tak równomierne jak w przypadku skrawania tymi samymi ostrzami w oprawce o wysięgu 120 mm, pomimo początkowego etapu obróbki.





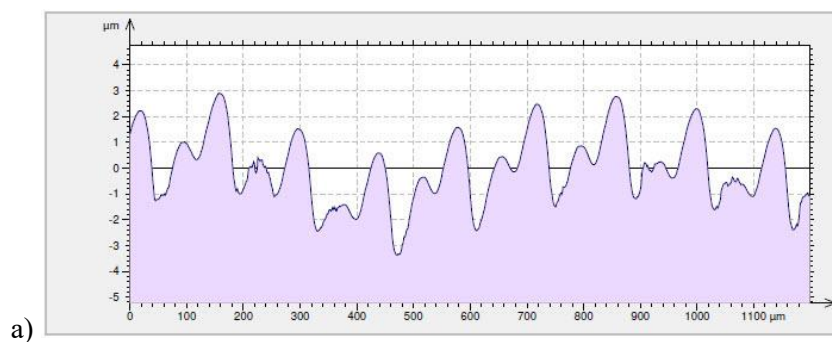
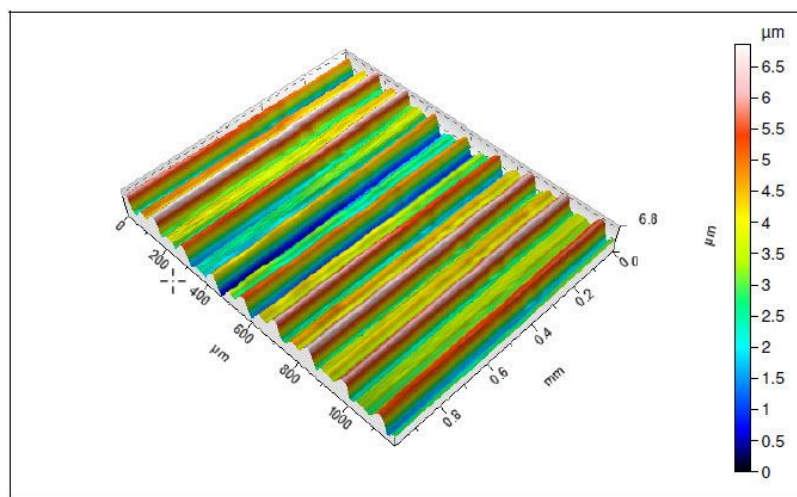


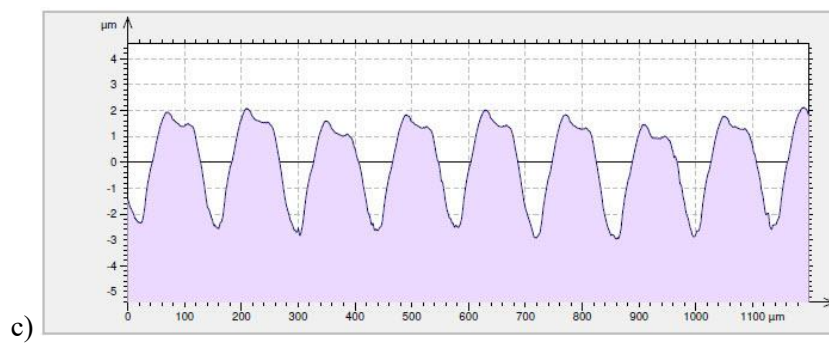
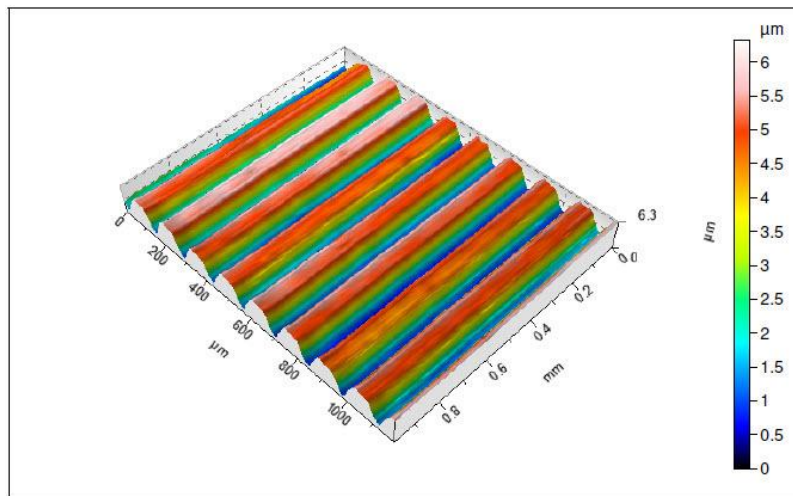
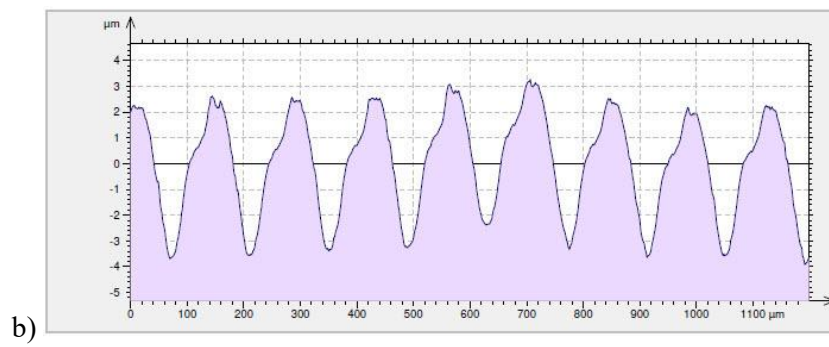
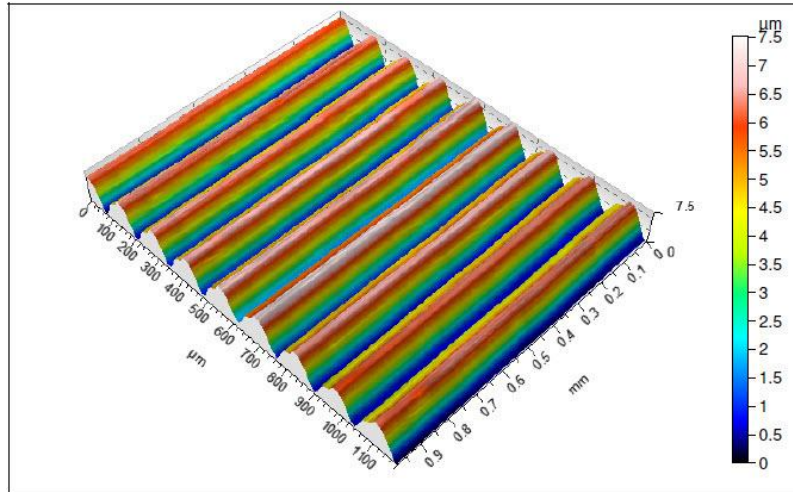


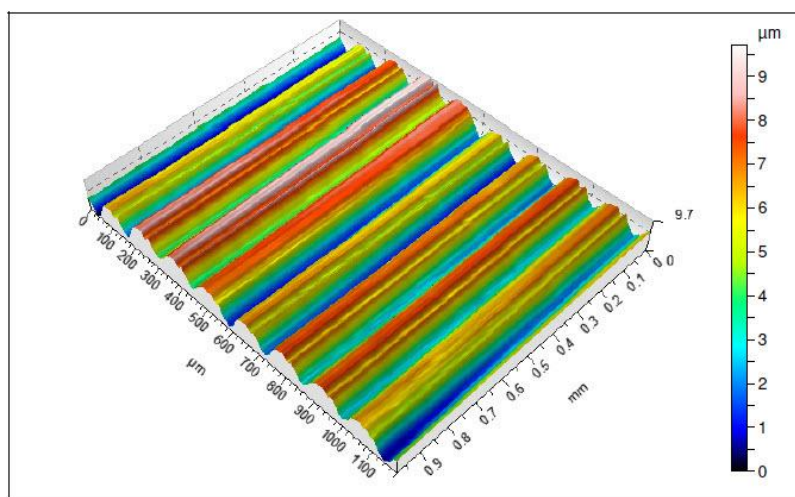
Rys. 6.57. Topografia 3D oraz profil chropowatości 2D powierzchni uzyskanych w wyniku obróbki ostrzem: a) WSM01, b) MP9005, c) S205, d) KCS10B, e) IC804 w oprawce o wysięgu 700 mm w początkowym etapie obróbki

Na powierzchniach uzyskanych ostrzami WSM01, S205 i KCS10B można dostrzec pewną falistość powierzchni zwracając uwagę na liniowość wierzchołków nierówności. Pozytywnym aspektem w przypadku wszystkich powierzchni uzyskanych w wyniku obróbki oprawką o wysięgu 700 mm są mniejsze wartości pików nierówności powierzchni S_p w porównaniu z wartościami dolin nierówności powierzchni S_v . Taki układ wartości parametrów S_p i S_v jest znacznie korzystniejszy z punktu widzenia funkcjonalności danej powierzchni. Biorąc pod uwagę powierzchnie uzyskane w wyniku obróbki oprawką o wysięgu 700 mm w końcowym etapie skrawania, najmniejszą średnią wartość wysokości nierówności zarejestrowano dla powierzchni obrobionej płytką KCS10B, gdzie $S_z = 6,819 \mu\text{m}$. Powierzchnia ta w porównaniu do powierzchni obrobionej oprawką o krótszym wysięgu, dla której zanotowano najmniejsze wartości parametru S_z , charakteryzuje się znacznie mniejszymi średnimi wartościami parametru S_p w porównaniu do S_v , których wyniki prezentują się następująco $S_p = 2,977 \mu\text{m}$ i $S_v = 3,832 \mu\text{m}$. Wartości wysokości nierówności powierzchni na tym etapie obróbki wzrastały odpowiednio dla powierzchni obrobionych ostrzami S205, WSM01, MP9005 i IC804. Powierzchnia, która została uzyskana w wyniku obróbki ostrzem S205 charakteryzowała się wartością wysokości nierówności na poziomie $S_z = 7,596 \mu\text{m}$. Natomiast wysokości pików i dolin nierówności zarejestrowane dla tej powierzchni osiągnęły wartość $S_p = 3,456 \mu\text{m}$ i $S_v = 4,14 \mu\text{m}$. Nieco większe wartości wysokości nierówności uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem WSM01, gdzie $S_z = 8,108 \mu\text{m}$. Wartości parametrów S_p i S_v dla omawianej powierzchni zanotowano na poziomie $S_p = 4,118 \mu\text{m}$ i $S_v = 3,983 \mu\text{m}$. Dla powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki ostrzem MP9005 wartość parametru S_z otrzymano na poziomie $S_z = 9,4 \mu\text{m}$. Natomiast omawiana powierzchnia charakteryzowała się wysokością pików i dolin nierówności o wartości $S_p = 3,951 \mu\text{m}$ i $S_v = 5,45 \mu\text{m}$. Z kolei największą wartość wysokości

nierówności otrzymano dla powierzchni obrobionej ostrzem IC804, gdzie $S_z = 14,7 \mu\text{m}$. Powierzchnia ta charakteryzowała się wysokością pików i dolin na poziomie $S_p = 7,66 \mu\text{m}$ i $S_v = 7,023 \mu\text{m}$ (Rys. 6.58). Oceniając mapy izometryczne oraz profile 2D powierzchni uzyskanych w końcowym etapie obróbki ostrzami skrawającymi w oprawce o wysięgu 700 mm, można dostrzec zwiększającą się falistość powierzchni. Zwracając uwagę na wierzchołki mikronierówności powierzchni, ewidentnie można zaobserwować ich nieliniowość. Taki stan rzeczy spowodowany był wzrastającym zużyciem ostrzy co w konsekwencji doprowadziło do intensyfikacji oporów skrawania a dalej obniżenia stabilności obróbki poprzez zwiększenie ugięcia oprawki narzędziowej. W przypadku powierzchni otrzymanych w wyniku obróbki ostrzami KCS10B, S205 i MP9005 korzystny jest układ parametrów S_p do S_v pod względem tribologicznym, ponieważ wielkości S_p mają mniejsze wartości niż S_v . Oznacza to, że nie ma w przypadku tych powierzchni tendencji do zwiększania współczynnika pustki S_p/S_z .







d)

Rys. 6.58.

Topografia 3D
oraz profil
chropowości
2D powierzchni
uzyskanych w
wyniku obróbki
ostrzem:

a) KCS10B,

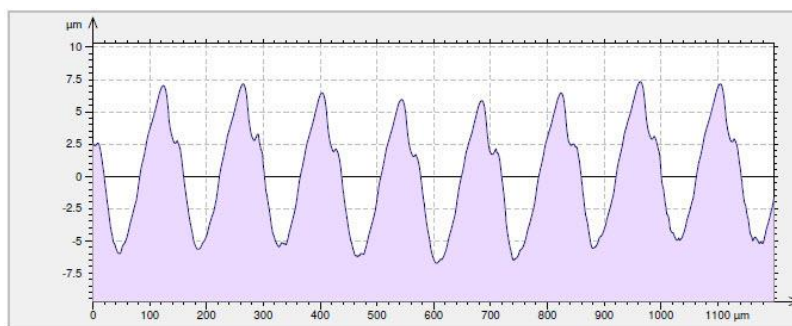
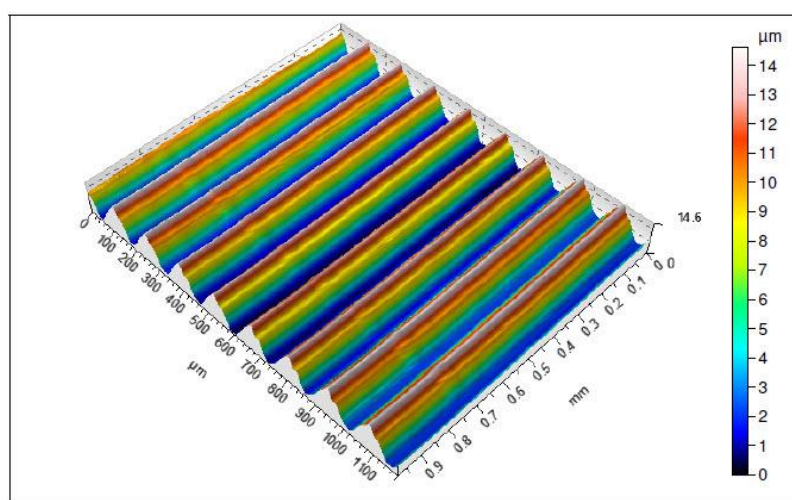
b) S205,

c) WSM01,

d) MP9005,

e) IC804 w

oprawce o
wysięgu 700 mm
w końcowym
etapie obróbki



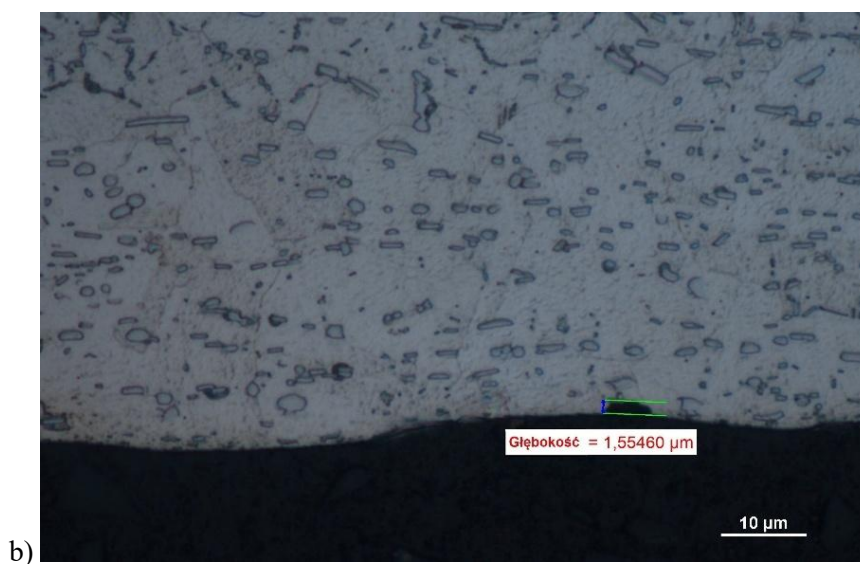
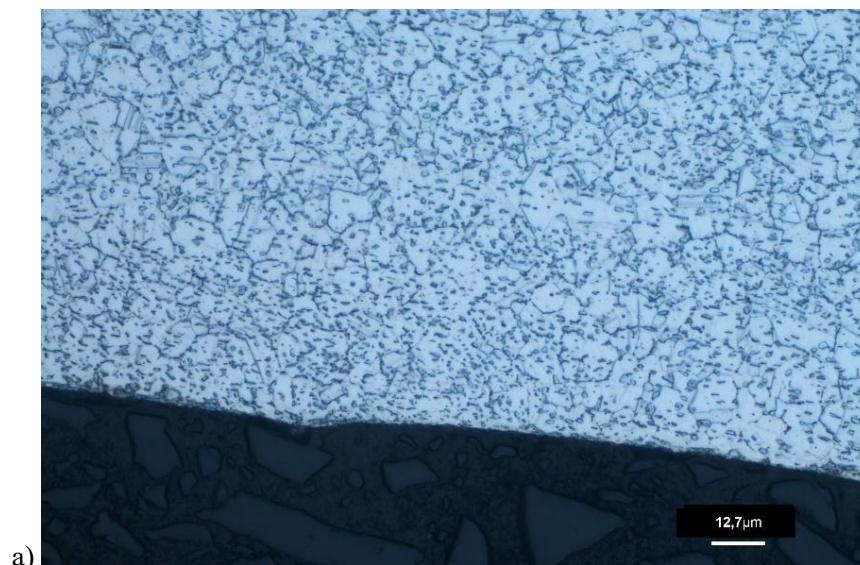
e)

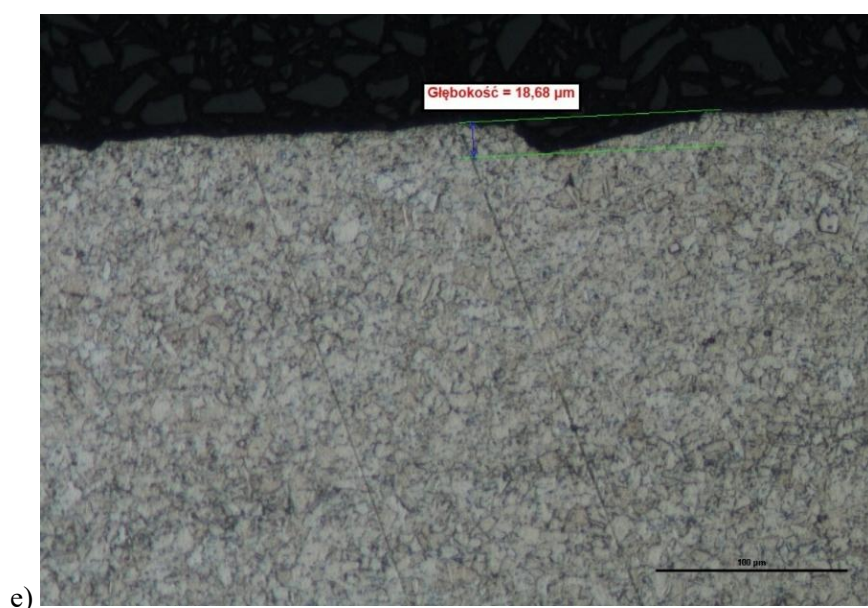
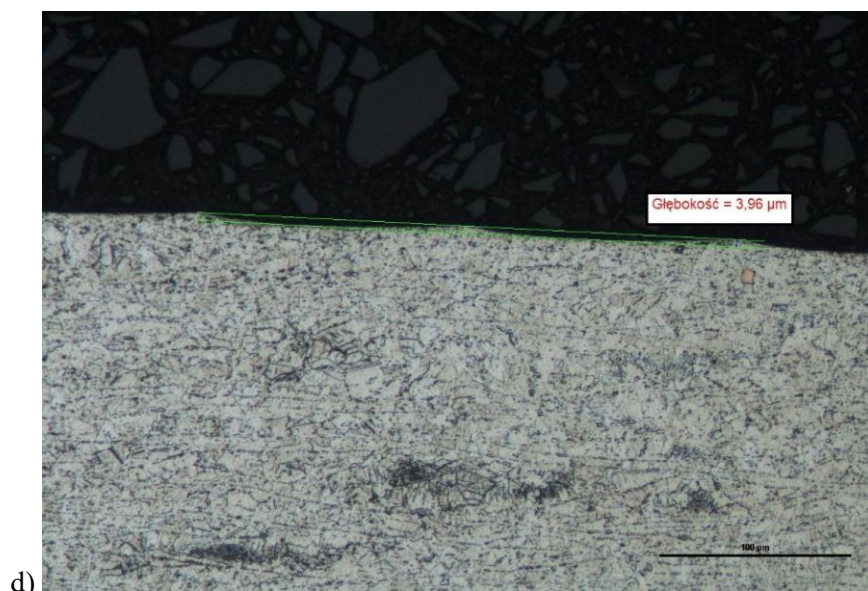
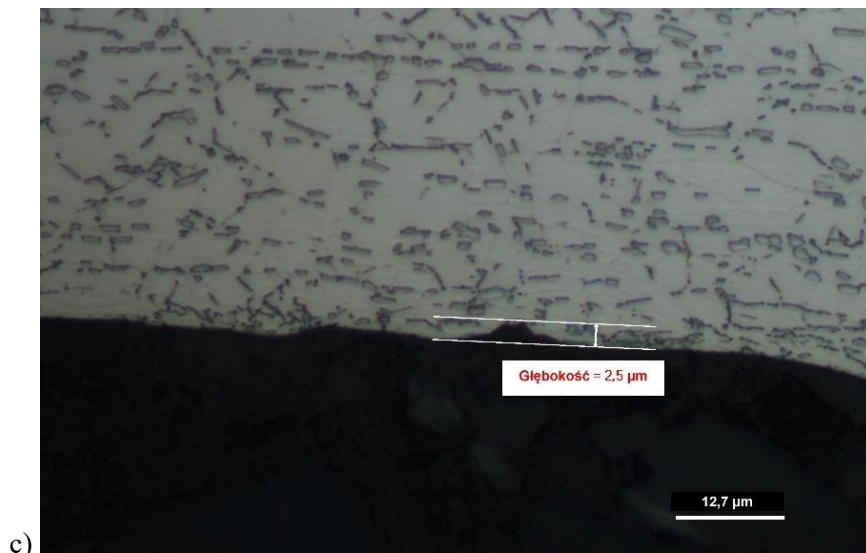
Należy jednak zwrócić uwagę, że w końcowym etapie obróbki, wszystkie powierzchnie uzyskane w wyniku skrawania narzędziem o wyścięgu 700 mm miały większą wartość parametru S_z w porównaniu z powierzchniami uzyskanymi podczas skrawania ostrzami umieszczonymi w oprawce o wyścięgu 120 mm. Natomiast bardzo interesującym jest wynik otrzymanych parametrów R_a i S_a , gdzie biorąc pod uwagę końcowy etap obróbki, mniejsze wartości tych wielkości uzyskano dla powierzchni obrobionych ostrzami KCS10B i WSM01 pracującymi w oprawce o wyścięgu 700 mm w porównaniu z powierzchniami, które zostały obrobione wspomnianymi ostrzami w oprawce o wyścięgu 120 mm.

6.2.3 Ocena mikrostruktury warstwy wierzchniej powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej obrobionych próbek materiału

Ocenie mikrostruktury warstwy wierzchniej poddane zostały wszystkie cztery powierzchnie zewnętrzne i wewnętrzne badanych próbek. Oceny dokonano według wymagań wewnętrznej normy E-166 firmy Pratt & Whitney US w akredytowanym laboratorium metalograficznym należącym do firmy Pratt & Whitney Kalisz. Wymagania tej samej normy dotyczą części produkcyjnej, w odniesieniu do której prowadzone są niniejsze badania. W pracy przedstawiono wyniki uzyskane dla powierzchni obrobionych wszystkimi ostrzami osadzonymi w oprawce o wyciągu 120 mm i 700 mm z początkowego i końcowego stadium obróbki. Biorąc pod uwagę powierzchnie uzyskane w wyniku obróbki ostrzami umieszczonymi w oprawce o wyścięgu 120 mm w początkowej fazie procesu, można stwierdzić, że w żadnej z badanych próbek nie zidentyfikowano deformacji ziaren w strukturze materiału. Świadczy to o prawidłowym przebiegu procesu skrawania, a także zachowaniu odpowiednich właściwości skrawnych przez wszystkie ostrza. Powierzchnią, dla której oprócz braku deformacji ziaren w mikrostrukturze warstwy wierzchniej nie zarejestrowano wad powierzchniowych była ta, którą uzyskano w wyniku obróbki ostrzem KCS10B. Natomiast dla warstwy wierzchniej powierzchni otrzymanej w wyniku obróbki ostrzem MP9005 zarejestrowano defekty powierzchni w postaci sporadycznie pojawiających się zagłębień o głębokości do 1,55 μm . Z kolei warstwa wierzchnia powierzchni obrobionej ostrzem IC804 także nie była wolna od wad powierzchniowych i charakteryzowała się sporadycznie występującymi zagłębieniami o głębokości do 2,5 μm . Warstwa wierzchnia powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki ostrzem WSM01 również charakteryzowała się defektami powierzchniowymi w postaci dominujących mikrowibracji sięgających do głębokości 4 μm . Natomiast najwięcej wad powierzchniowych zidentyfikowano w warstwie wierzchniej powierzchni obrobionej ostrzem S205, gdzie

zarejestrowano sporadycznie występujące zagłębienia do 18,7 μm , a także z większą częstotliwością pojawiające się zagłębienia o głębokości do 4,8 μm (Rys. 6.59).



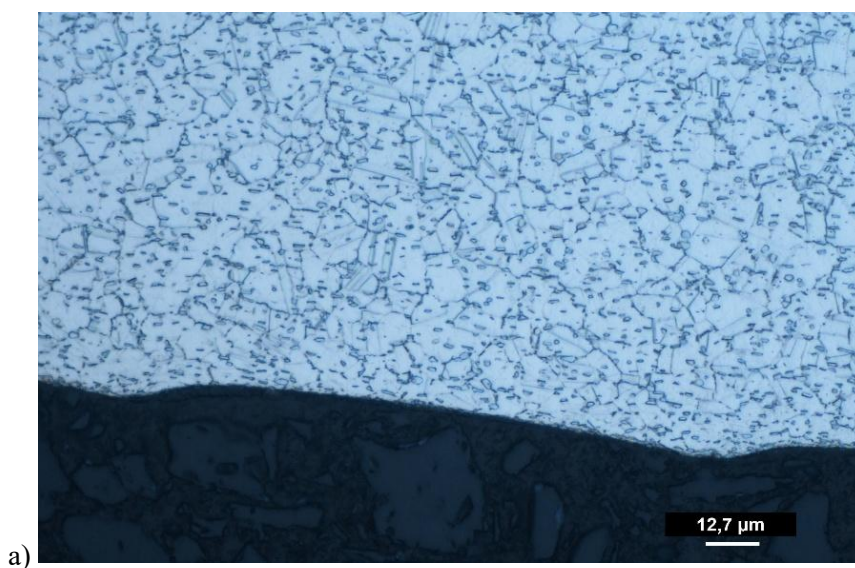


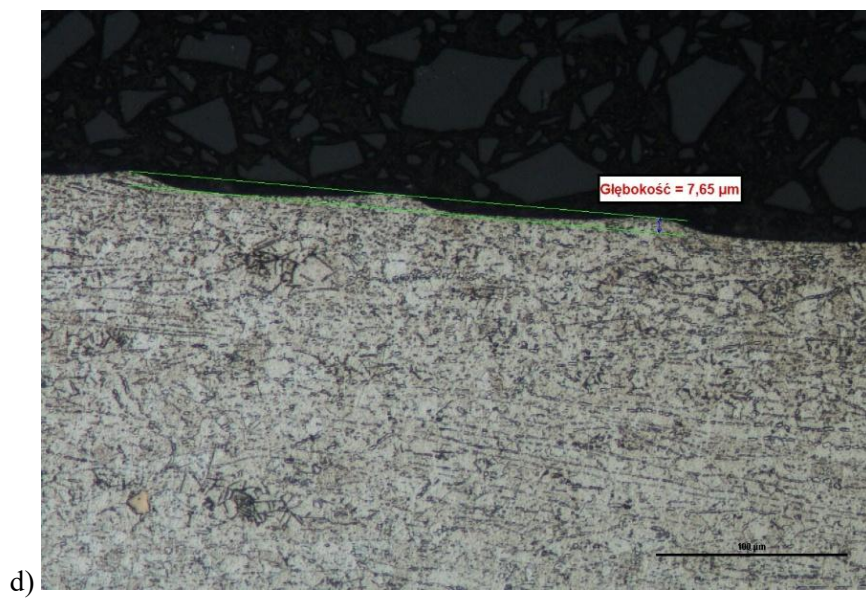
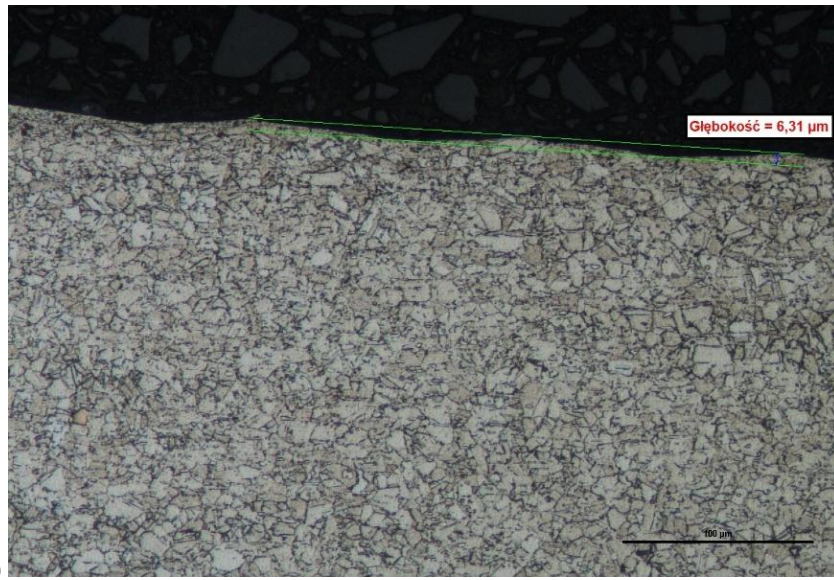
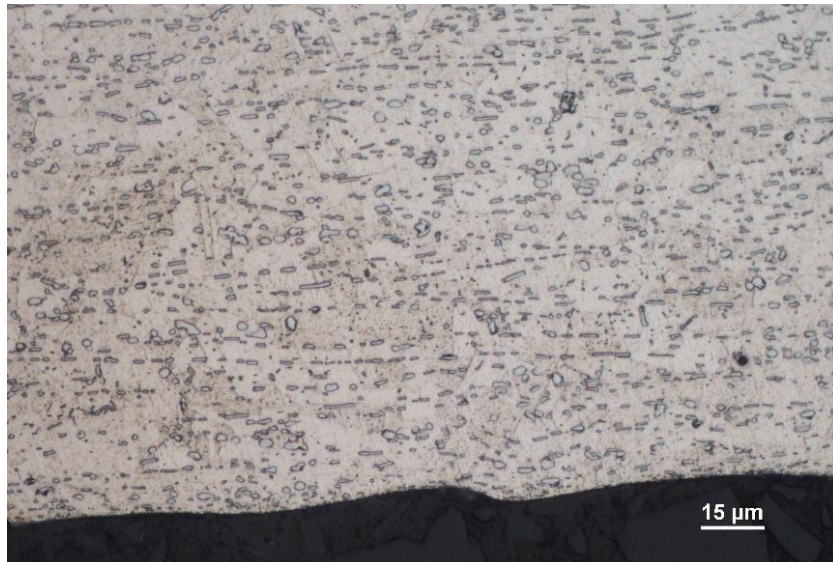
Rys. 6.59.
Mikrostruktura
warstwy
wierzchniej
powierzchni
uzyskanych w
wyniku obróbki
ostrzem:

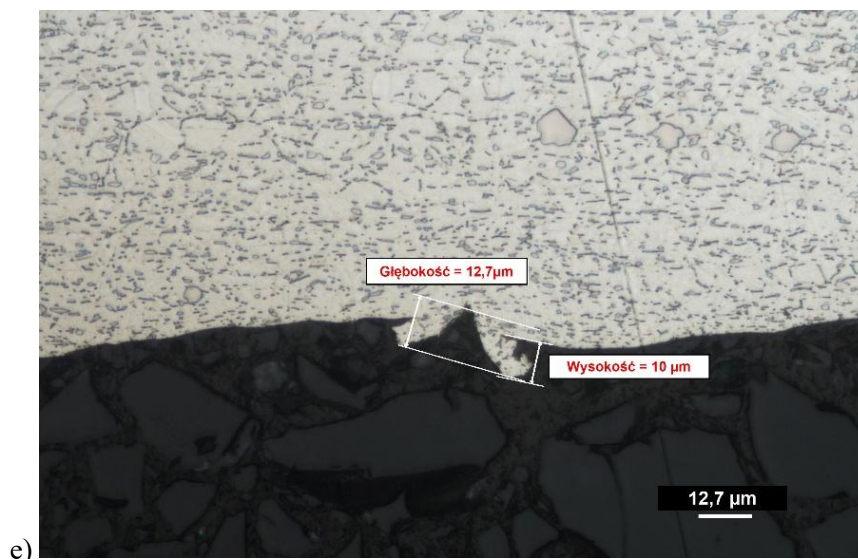
- a) KCS10B,
- b) MP9005,
- c) IC804,
- d) WSM01,
- e) S205 w
oprawce o
wysięgu 120
mm w
początkowym
etapie obróbki

Analizując obrazy z rysunku 6.59 można założyć, że występowanie wad powierzchniowych dla opisywanych czterech powierzchni na tym etapie obróbki ma raczej charakter losowy. Zastanawiająca jest natomiast stosunkowo duża głębokość rzadkich wad powierzchniowych dla próbki obrobionej ostrzem S205. Może to być efekt dostających się cząstek materiału obrabianego do strefy skrawania, które w wyniku płynięcia bocznego pod ostrzem powodowały wyżłobienia w warstwie wierzchniej powierzchni obrobionej.

Biorąc pod uwagę powierzchnie wykonane ostrzami pracującymi w oprawce o wysięgu 120 mm z końcowego etapu obróbki można również zauważyć, że mikrostruktura warstwy wierzchniej każdej z nich jest wolna od deformacji ziaren i umocnień. Należy także zwrócić uwagę, że powierzchnie skrawane ostrzami KCS10B i MP9005 nie wykazują wad powierzchniowych. W mikrostrukturze warstwy wierzchniej powierzchni otrzymanej w wyniku obróbki ostrzem S205 zarejestrowano defekty powierzchniowe o dominującej częstotliwości występowania w postaci mikrowibracji sięgających do głębokości $6,3\text{ }\mu\text{m}$. Sporadycznie wystąpiły również na tej powierzchni zagłębienia o głębokości do $5,9\text{ }\mu\text{m}$. Warstwa wierzchnia powierzchni obrobionej ostrzem WSM01 odznaczała się defektami powierzchniowymi, które dominująco miały charakter mikrowibracji, a głębokość ich sięgała $7,7\text{ }\mu\text{m}$. Natomiast największe wady powierzchniowe zidentyfikowano w warstwie wierzchniej powierzchni obrobionej ostrzem IC804, gdzie sporadycznie pojawiały się wypchnięcia materiału ale ich głębokość sięgała $10\text{ }\mu\text{m}$ i zagłębienia materiału, które sięgały głębokości $12\text{ }\mu\text{m}$ (Rys. 6.60).





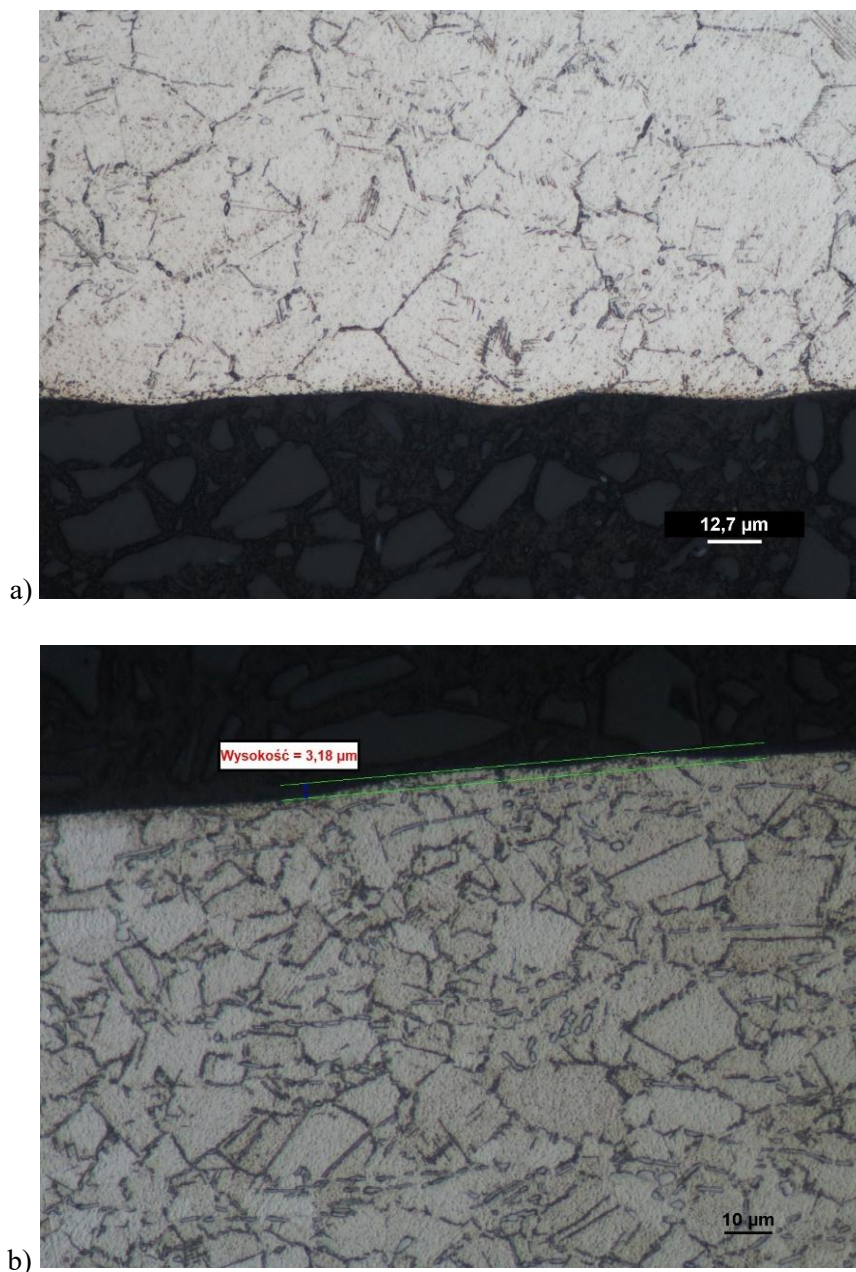


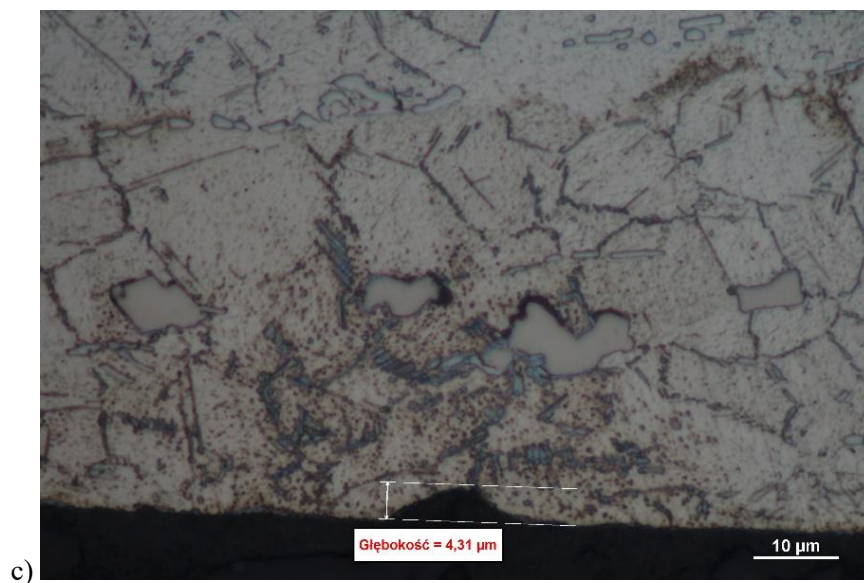
Rys. 6.60. Mikrostruktura warstwy wierzchniej powierzchni uzyskanych w wyniku obróbki ostrzem: a) KCS10B, b) MP9005, c) S205, d) WSM01, e) IC804 w oprawce o wysięgu 120 mm w końcowym etapie obróbki

Niewątpliwie wzrost poziomu głębokości mikrowibracji w warstwie wierzchniej powierzchni obrobionej ostrzem WSM01 i pojawiające się mikrowibracje w warstwie wierzchniej powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki ostrzem S205 są niewątpliwie wynikiem ewoluującego zużycia ostrza ocenianego wskaźnikiem VB_c . Również tak duże wady warstwy wierzchniej powierzchni otrzymanej w wyniku obróbki ostrzem IC804 w postaci wypchnięć materiału obrobionego są niewątpliwie powodem zużycia narzędzia. Ostrze IC804 charakteryzowało się największą wartością wskaźnika VB_c , przekraczającą dopuszczalne kryterium zużycia. Taki stan ostrza spowodował, że jego właściwości skrawne były na tyle pogorszone, iż zamiast skrawania zaczynało się miejscowe przepychanie materiału.

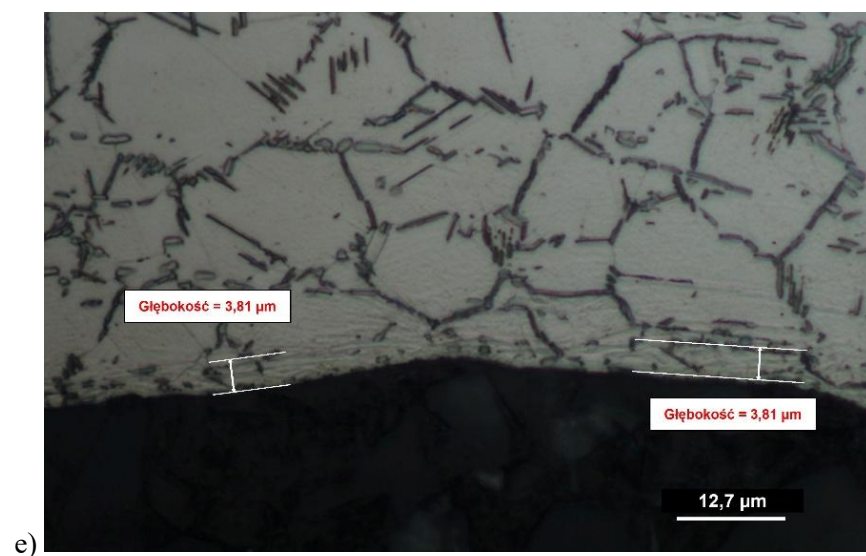
Oceniając powierzchnie uzyskane w wyniku obróbki ostrzami pracującymi w oprawce o wysięgu 700 mm w początkowym etapie obróbki można stwierdzić, że z wyjątkiem powierzchni obrobionej ostrzem IC804, wszystkie pozostałe były wolne od deformacji ziaren w strukturze warstwy wierzchniej materiału. Powierzchnią, dla której w warstwie wierzchniej nie zidentyfikowano żadnych defektów powierzchniowych, była ta, którą otrzymano w wyniku obróbki ostrzem KCS10B. Dla powierzchni, która została obrobiona ostrzem WSM01 zidentyfikowano w warstwie wierzchniej wady powierzchniowe w postaci okresowo występujących nieregularności o wysokości $3,2 \mu\text{m}$. Z kolei warstwa wierzchnia powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki ostrzem MP9005, charakteryzowała się

sporadycznie występującymi wadami powierzchniowymi w kształcie zagłębień o głębokości do 4,31 μm . Natomiast w przypadku powierzchni obrobionej ostrzem S205 występują również wady powierzchniowe w warstwie wierzchniej, które w dominującym stopniu przyjmują postać mikrodrgań o głębokości do 7,04 μm . Najmniej korzystną mikrostrukturę warstwy wierzchniej uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem IC804, gdzie okresowo wystąpiły deformacje ziaren, sięgające do głębokości 3,81 μm . Natomiast powierzchnia ta była wolna od wad powierzchniowych (Rys. 6.61).



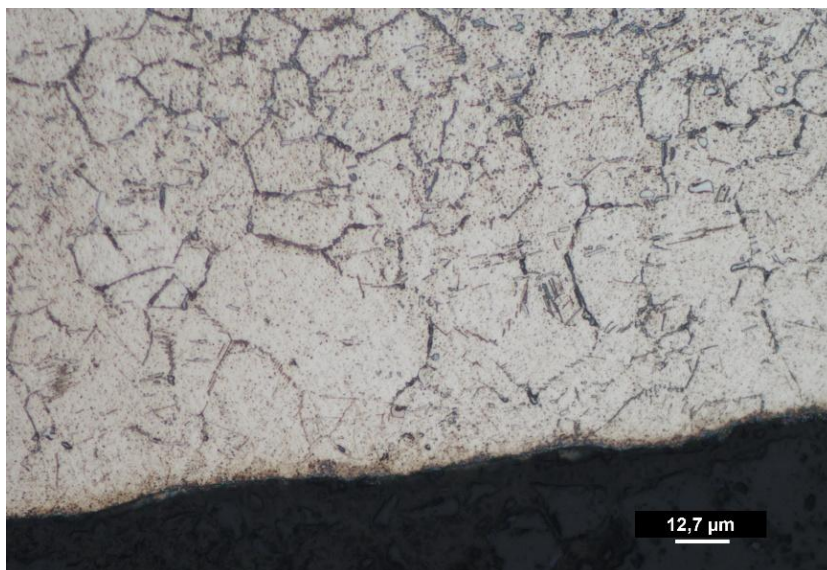


Rys. 6.61.
Mikrostruktura
warstwy
wierzchniej
powierzchni
uzyskanych w
wyniku
obróbki
ostrzem:
a) KCS10B,
b) WSM01,
c) MP9005,
d) S205,
e) IC804 w
oprawce o
wysięgu 700
mm w
początkowym
etapie obróbki

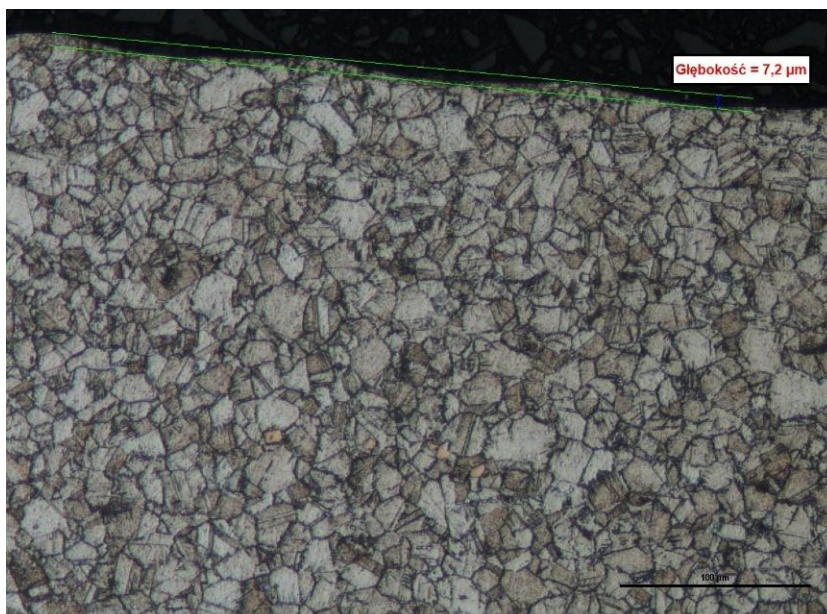


Odnosząc się do obrazów z rysunku 6.61 można stwierdzić, iż w przypadku mikrostruktury warstwy wierzchniej powierzchni otrzymanych w wyniku obróbki ostrzami WSM01 i S205 powstałe wady powierzchniowe są efektem zmniejszonej sztywności oprawki narzędziowej, która pomimo tłumienia drgań może ulec ugięciu podczas obróbki. Natomiast deformacje w mikrostrukturze warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej ostrzem IC804 są niewątpliwie efektem przyspieszonego zużycia narzędzia, które prawdopodobnie postępowało już od samego początku obróbki. Ewolucji zużycia w przypadku ostrza tej płytki prawdopodobnie również sprzyjała mniejsza stabilność procesu obróbki ze względu na wysięg narzędzia.

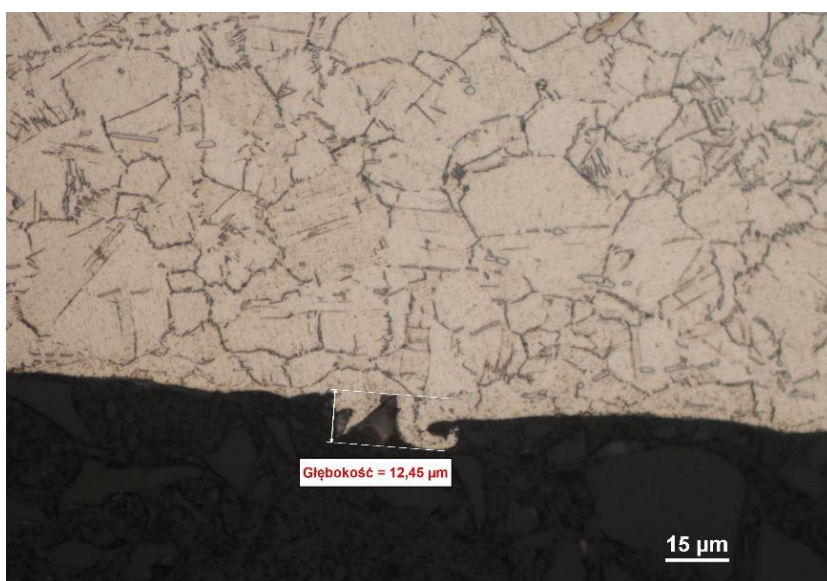
W przypadku mikrostruktury warstwy wierzchniej powierzchni obrobionych ostrzami umieszczonymi w oprawce o wysięgu 700 mm z końcowego etapu obróbki, także wszystkie powierzchnie z wyjątkiem tej, którą otrzymano w wyniku obróbki ostrzem IC804 były wolne od deformacji ziaren. Warstwa wierzchnia powierzchni obrobionej ostrzem KCS10B była również wolna od defektów powierzchniowych. Z kolei warstwa wierzchnia powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki ostrzem S205 na tym etapie obróbki charakteryzowała się mikrowibracjami, których głębokość sięgała 7,2 μm , a obecność była dominująca. Natomiast w warstwie wierzchniej powierzchni obrobionej ostrzem MP9005 także zarejestrowano wady powierzchniowe w postaci sporadycznie obecnych występow (wypchnięć materiału) połączonych z zagłębieniem sięgającym głębokości do 12,45 μm . Warstwa wierzchnia powierzchni otrzymanej w wyniku obróbki ostrzem WSM01 charakteryzowała się defektami powierzchniowymi w postaci wibracji sięgających głębokości do 90,9 μm , których występowanie było dominujące. Najmniej korzystny wynik uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem IC804, gdzie w mikrostrukturze warstwy wierzchniej zidentyfikowano występowanie silnych deformacji ziaren, sięgających do głębokości 2,54 μm . Występowanie ich jest okazjonalne. Powierzchnia ta nie jest także wolna od wad i zarejestrowano tutaj obecność sporadycznie występujących zagłębień sięgających głębokości do 25,4 μm (Rys. 6.62).



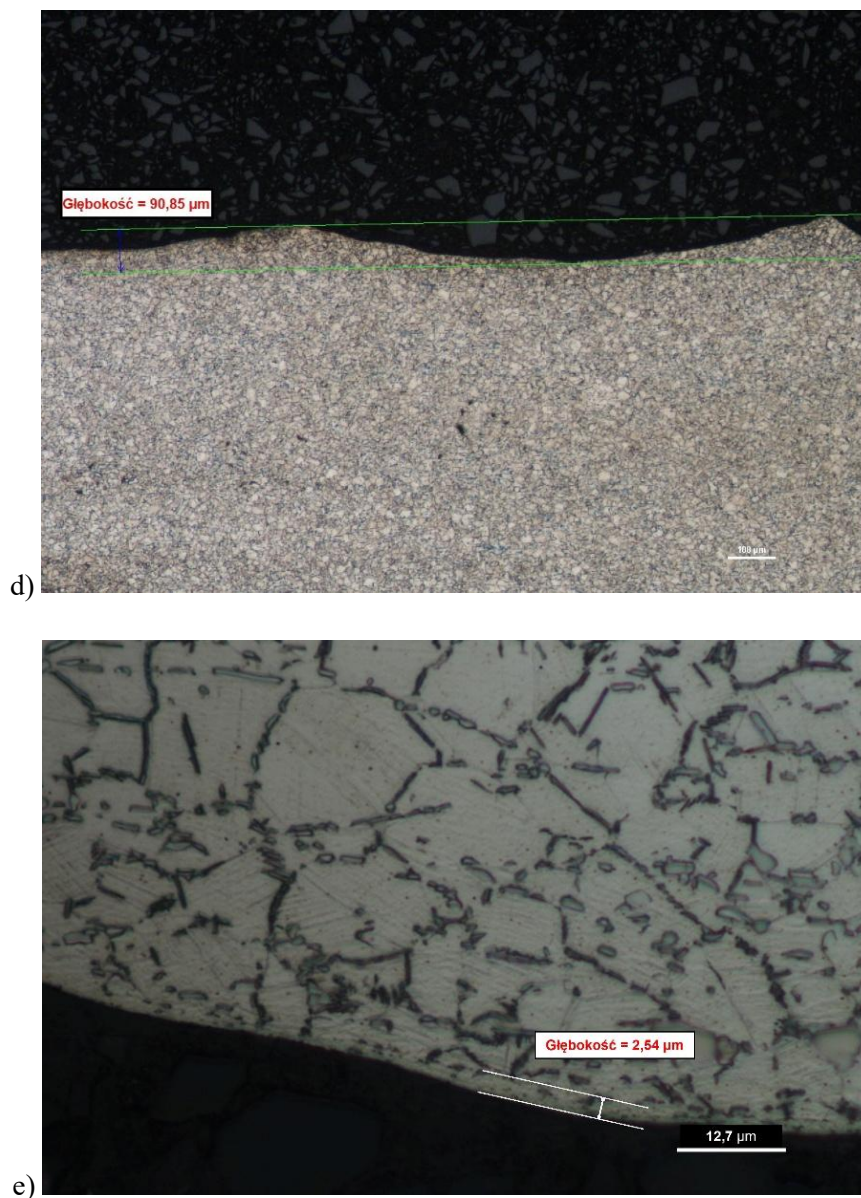
a)



b)



c)



Rys. 6.62. Mikrostruktura warstwy wierzchniej powierzchni uzyskanych w wyniku obróbki ostrzem: a) KCS10B, b) S205, c) MP9005, d) WSM01, e) IC804 w oprawce o wysięgu 700 mm w końcowym etapie obróbki

Biorąc pod uwagę mikrostrukturę warstwy wierzchniej powierzchni uzyskanych w końcowym etapie obróbki ostrzami umieszczonymi w oprawce o wysięgu 700 mm, niewątpliwie najkorzystniejszy wynik uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem KCS10B. Warstwa wierzchnia jest tutaj wolna od deformacji ziaren i wad powierzchniowych, co jest spowodowane najmniejszym zużyciem ostrza, ocenianym wskaźnikiem VB_c . Mikrostruktura warstwy wierzchniej pozostałych powierzchni z wyjątkiem uzyskanej w wyniku obróbki ostrzem IC804 jest wolna od deformacji ziaren i umocnień. Warstwa wierzchnia powierzchni otrzymanych w wyniku obróbki ostrzami

S205 i WSM01 charakteryzowała się wadami powierzchniowymi w postaci mikrowibracji i wibracji o zwiększonych głębokościach w porównaniu z etapem początkowym z powodu znacznego zużycia ostrza. Zwiększone zużycie omawianych narzędzi zmniejszyło stabilność pracy oprawki narzędziowej, co sprzyjało wzrostowi oscylacji wierzchołka płytki skrawającej. Najbardziej interesujące rezultaty w mikrostrukturze warstwy wierzchniej uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem IC804. W strukturze tej wystąpiły silne deformacje ziaren spowodowane znacznym zużyciem ostrza, choć ich głębokość zmniejszyła się w porównaniu z głębokością deformacji dla tej samej powierzchni w początkowym etapie obróbki. Taki stan rzeczy spowodowany był najprawdopodobniej sytuacją, w której zwiększające się zużycie powodowało cofanie się krawędzi skrawającej, co w konsekwencji doprowadziło do wzrostu oporów skrawania. Wzrost przede wszystkim składowej odporowej siły skrawania doprowadził do ugięcia oprawki narzędziowej. Wspomniane ugięcie oprawki antywibracyjnej doprowadziło do sytuacji, w której ostrze nie wywierało nacisku na powierzchnie obrobioną, pogorszył się proces skrawania, a zaczął postępować poślizg ostrza po powierzchni.

6.2.4 Ocena uzyskiwanych wymiarów średnicowych po toczeniu wzdłużnym powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej obrobionych próbek materiału

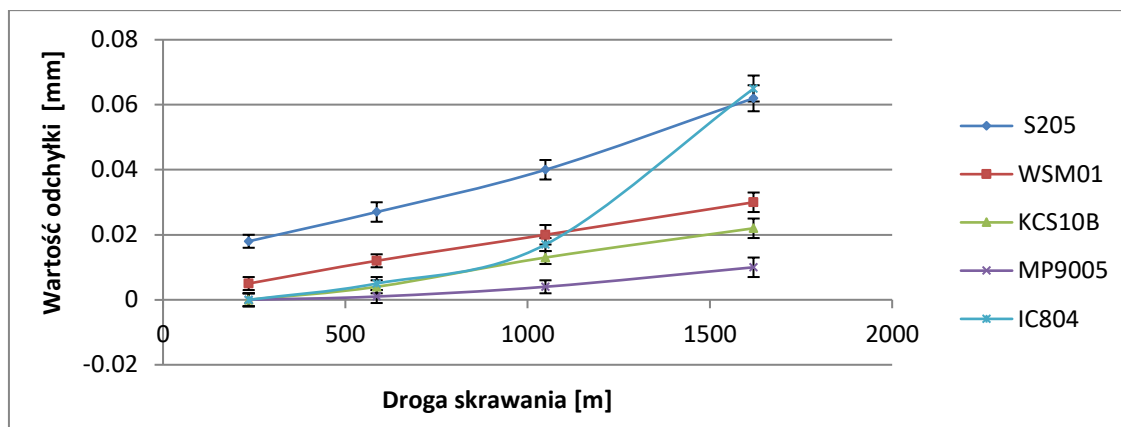
Pomiaru średnicy dokonano zgodnie z metodyką po przejściu 2, 5, 9 oraz 14, odpowiednio dla każdego narzędzia (Tab. 6.4 i 6.5). Analizując wpływ wysięgu zastosowanej oprawki narzędziowej na dokładność wymiarową podczas toczenia wzdłużnego można zauważyć, że długość zestawu narzędziowego odgrywa ogromną rolę w utrzymaniu wymaganego wymiaru podczas pracy narzędzia. Poniższe wyniki pokazują, że po przebyciu wymaganej drogi skrawania najmniejsze odchylenie od wymiaru nominalnego dla oprawki o wysięgu 120 mm zarejestrowano dla powierzchni obrobionej ostrzem MP9005 i wyniosło 0,01 mm. Największe wartości odchyłek wymiarowych zanotowano dla powierzchni obrobionych ostrzami S205 i IC804, które wyniosły odpowiednio 0,062 mm i 0,065 mm (Rys. 6.63). Natomiast dla oprawki o wysięgu 700 mm odchylenie od wymiaru nominalnego wzrosło i najmniejsza jego wartość wyniosła 0,21 mm dla powierzchni obrobionej ostrzem S205. Natomiast największe odchylenie od wymiaru zarejestrowano dla powierzchni obrobionej płytką IC804, które wyniosło 0,72 mm. Wartości odchyłek od wymiaru nominalnego dla powierzchni obrobionych płytkami KCS10B i MP9005 prezentują się na podobnym poziomie i wyniosły odpowiednio 0,24 mm i 0,25 mm (Rys. 6.64).

Tabela 6.4. Wartości średnie wymiarów średnicowych zewnętrznych uzyskanych podczas badań dla oprawki o wysięgu 120 mm.

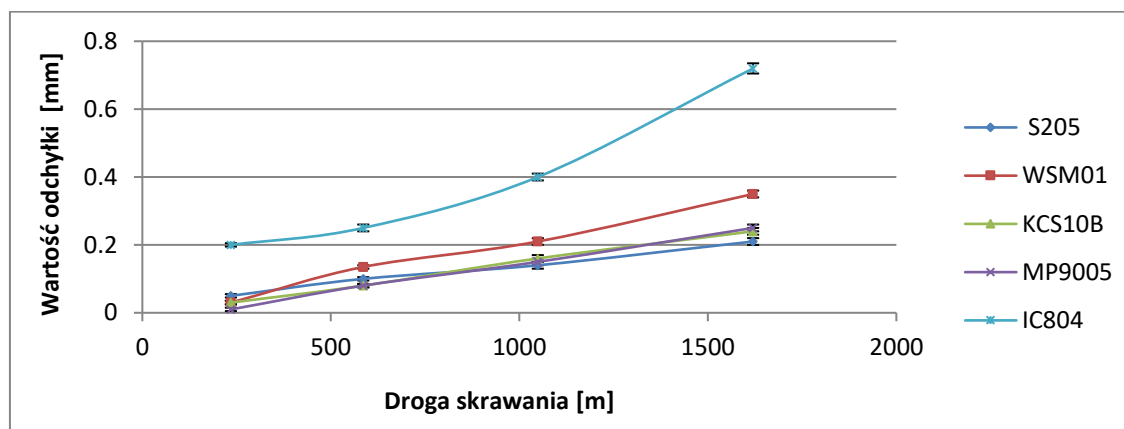
Numer przejścia narzędzia/Droga skrawania [m]	Wymiar nominalny [mm]	Ostrze z powłoką S205 [mm]	Ostrze z powłoką WSM01 [mm]	Ostrze z powłoką KCS10B [mm]	Ostrze z powłoką MP9005 [mm]	Ostrze z powłoką IC804 [mm]
2/235	131,2	131,218 ± 0,002	131,205 ± 0,002	131,2 ± 0,002	131,2 ± 0,002	131,2 ± 0,002
5/586	130	130,027 ± 0,003	130,012 ± 0,002	130,004 ± 0,002	130,001 ± 0,002	130,005 ± 0,002
9/1049	128,4	128,444 ± 0,003	128,42 ± 0,003	128,413 ± 0,002	128,404 ± 0,002	128,417 ± 0,002
14/1620	126,4	126,462 ± 0,004	126,43 ± 0,003	126,422 ± 0,003	126,41 ± 0,003	126,465 ± 0,004

Tabela 6.5. Wartości średnie wymiarów średnicowych wewnętrznych uzyskanych podczas badań dla oprawki o wysięgu 700 mm.

Numer przejścia narzędzia/Droga skrawania [m]	Wymiar nominalny [mm]	Ostrze z powłoką S205 [mm]	Ostrze z powłoką WSM01 [mm]	Ostrze z powłoką KCS10B [mm]	Ostrze z powłoką MP9005 [mm]	Ostrze z powłoką IC804 [mm]
2/235	78,2	78,15 ± 0,005	78,17 ± 0,005	78,17 ± 0,005	78,19 ± 0,005	78,0 ± 0,005
5/586	79,4	79,30 ± 0,005	79,265 ± 0,005	79,32 ± 0,005	79,32 ± 0,005	79,15 ± 0,005
9/1049	81	80,86 ± 0,01	80,79 ± 0,01	80,84 ± 0,01	80,85 ± 0,01	80,60 ± 0,01
14/1620	83	82,79 ± 0,01	82,65 ± 0,01	82,76 ± 0,01	82,75 ± 0,01	82,28 ± 0,015



Rys. 6.63. Wartości odchyłek od wymiaru nominalnego w zależności od drogi skrawania dla ostrzy badanych w oprawce o wysięgu 120 mm



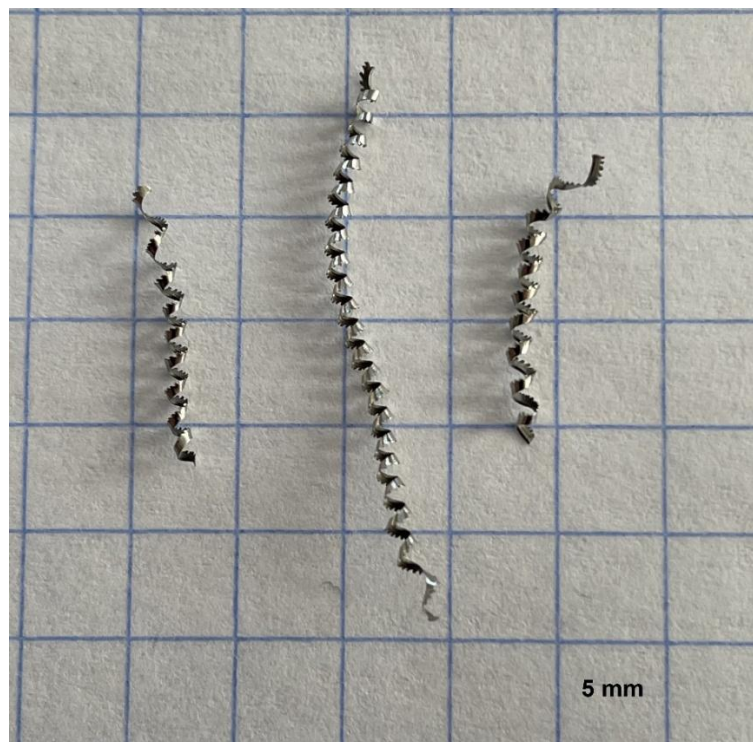
Rys. 6.64. Wartości odchyłek od wymiaru nominalnego w zależności od drogi skrawania dla ostrzy badanych w oprawce o wysięgu 700 mm

6.2.5 Ocena chropowatości powierzchni wewnętrznej obrabianych części produkcyjnych

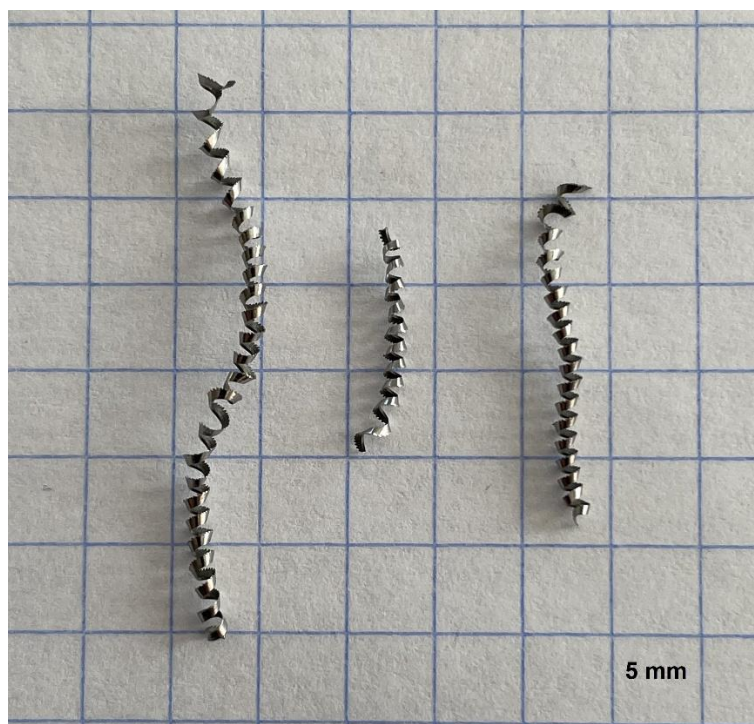
6.2.6 Ocena uzyskiwanych wymiarów średnicowych po toczeniu wzdłużnym powierzchni wewnętrznej części produkcyjnych

6.2.7 Ocena kształtu wiórów po toczeniu wzdłużnym powierzchni wewnętrznej

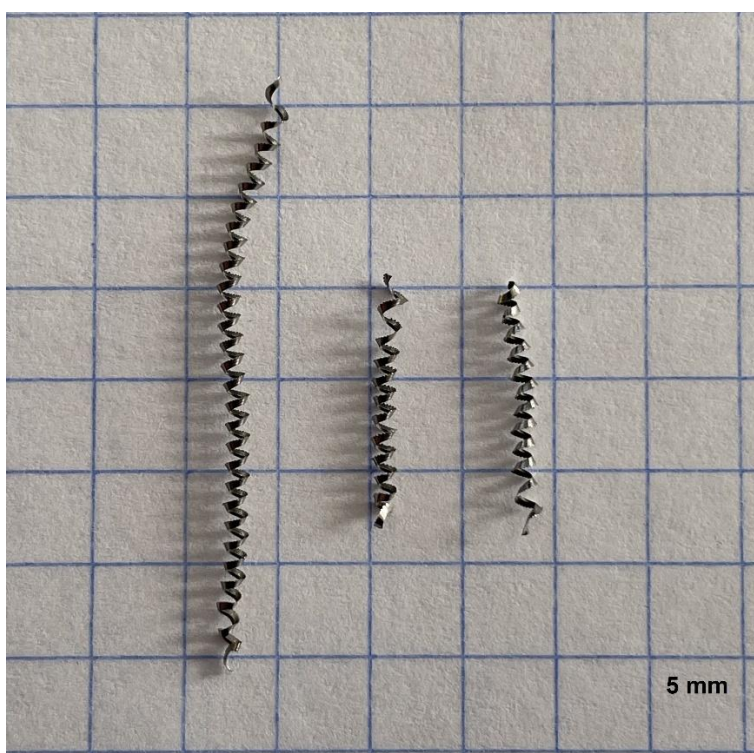
Wióry, które poddano ocenie zostały zgromadzone po toczeniu wzdłużnym powierzchni wewnętrznej, przeprowadzonym na zbrakowanych częściach produkcyjnych, których obrobione powierzchnie oceniono w rozdziałach 6.2.5 i 6.2.6. Otrzymane wióry, uzyskane w wyniku skrawania ostrzami MP9005, KCS10B oraz S205 przedstawiono odpowiednio na rysunkach 6.71, 6.72 i 6.73.



Rys. 6.71. Wióry uzyskane w wyniku obróbki ostrzem płytki MP9005; $f = 0,14$ mm/obr,
 $a_p = 0,2$ mm, $v_c = 85$ m/min



Rys. 6.72. Wióry uzyskane w wyniku obróbki ostrzem płytki KCS10B; $f = 0,14$ mm/obr, $a_p = 0,2$ mm, $v_c = 85$ m/min



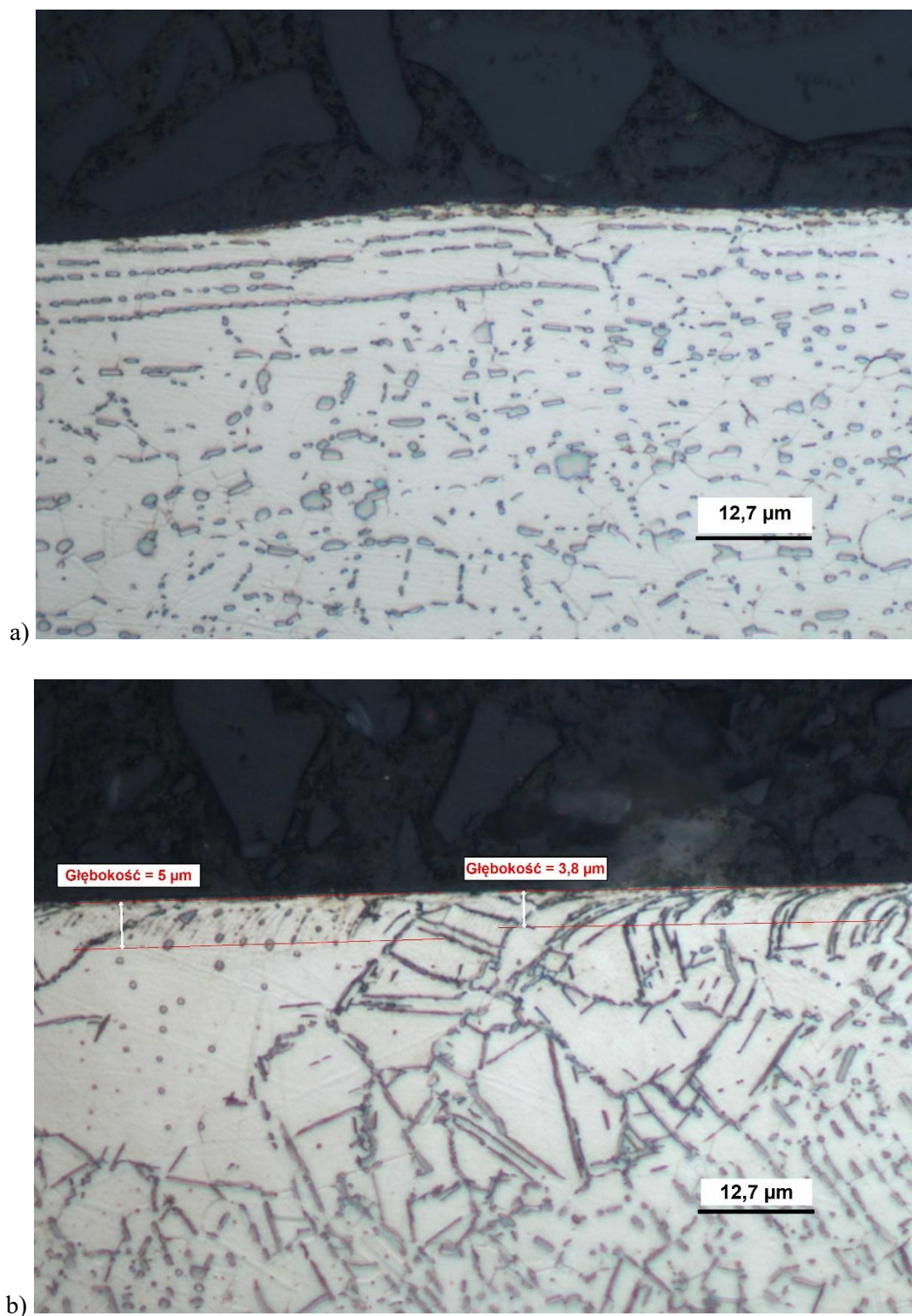
Rys. 6.73. Wióry uzyskane w wyniku obróbki ostrzem płytki S205; $f = 0,14$ mm/obr, $a_p = 0,2$ mm, $v_c = 85$ m/min

Kształt otrzymanych w wyniku obróbki poszczególnymi ostrzami wiórów jest bardzo zbliżony i można je zakwalifikować jako wióry śrubowe stożkowe długie 5.1. Powodem uzyskania takiego kształtu wióra, była niewątpliwie zastosowana w badaniach stosunkowo duża wartość prędkości skrawania [66]. W trakcie obróbki wszystkimi ostrzami pojawiały się wióry o długości do 30 mm, choć największą ich ilość zarejestrowano podczas obróbki ostrzem S205. We wszystkich przypadkach największą ilość stanowiły wióry o długości w zakresie $12 \div 20$ mm. Średnica wiórów uzyskanych w wyniku obróbki ostrzem MP9005 wyniosła 1,2 mm, natomiast ostrzem KCS10B 1,4 mm. Z kolei średnica wiórów otrzymanych z obróbki ostrzem S205 wyniosła 1,3 mm. Największa wartość średnicy wiórów uzyskanych z obróbki ostrzem KCS10B jest wynikiem nieco większych nieregularności śrubowego kształtu w porównaniu do kształtu pozostałych, co można zauważyć na rysunku 6.72. Wióry otrzymane w wyniku obróbki ostrzem MP9005 charakteryzowały się największym ząbkowaniem jednej z jego krawędzi. Jednak wysokość zauważonego ząbkowania była niewielka, a częstotliwość stosunkowo duża. Było to spowodowane stosunkowo dużą wartością posuwu, gdyż przy mniejszych wartościach tego parametru zauważa się większe wysokości ząbkowania. Ponadto występowanie tego zjawiska przypisuje się również fragmentacji wióra, a także powstałemu narostowi na ostrzu MP9005 pracującemu w oprawce o wysięgu 700 mm. Występujące oblepienia materiału skrawającego na ostrzu pochodzą prawdopodobnie z ubytków powstałych na krawędzi wióra [66, 120]. Na uzyskanych podczas testów wiórach nie zaobserwowano przebarwień spowodowanych wpływem wysokiej temperatury w strefie skrawania. Wpływ na to miało zastosowanie wysokiego ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej. Dodatkowo stosunkowo duża wartość ciśnienia CCS, przyczyniła się do łamania wiórów o długości 30 mm do wskazanych mniejszych długości, gdyż to ich ilość była największa.

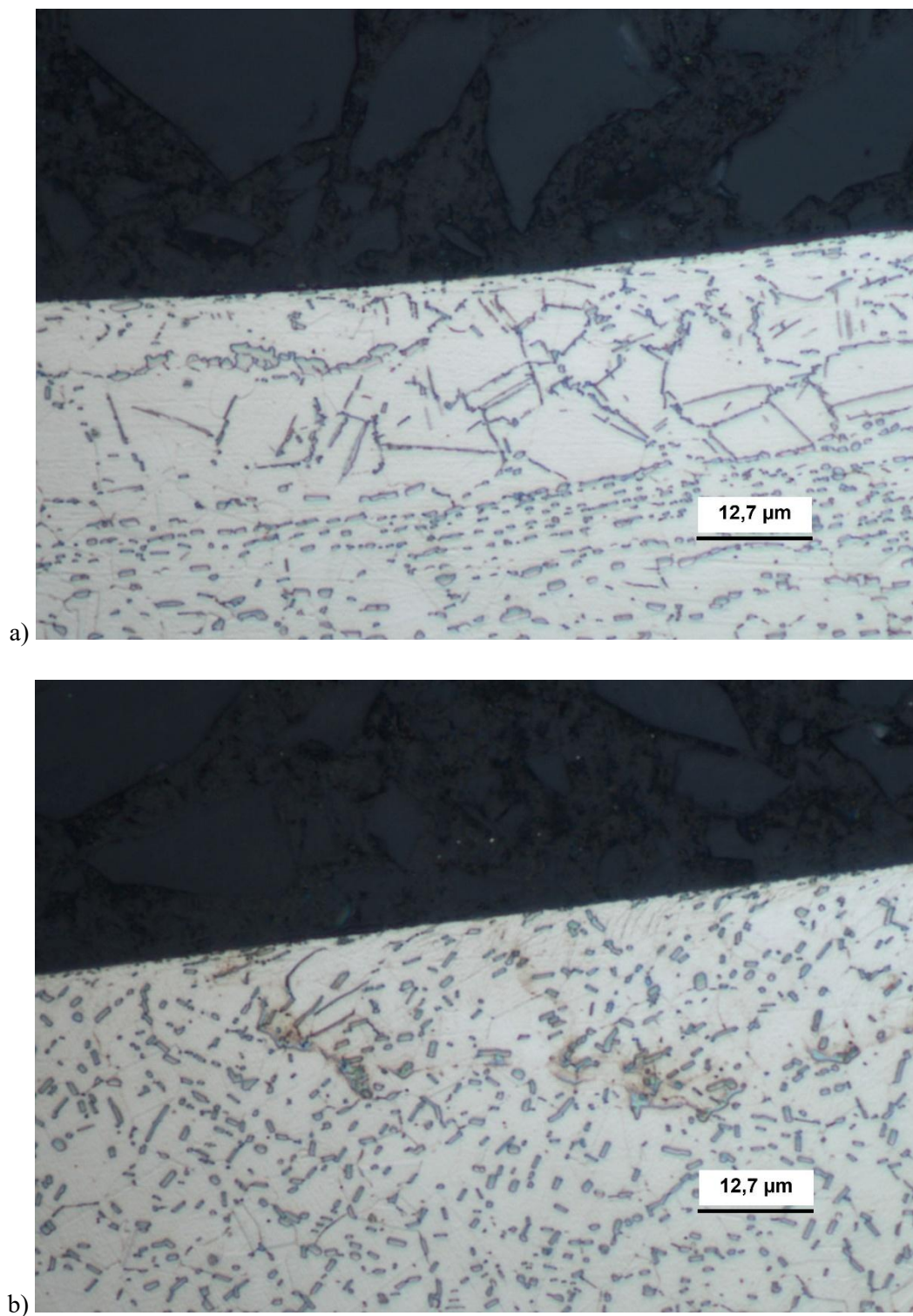
6.2.8 Badanie wpływu ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej na mikrostrukturę warstwy wierzchniej

Badanie wpływu ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej CCS na mikrostrukturę warstwy wierzchniej przeprowadzono na próbkach materiału o kształcie i wymiarach takich samych jak te, które wykorzystano w badaniach podstawowych i zasadniczych. Niniejsze testy przeprowadzono według warunków opisanych w tabeli 4.4. Istotnym faktem jest to, że zostały przetoczone dwie powierzchnie o średnicy $\varnothing 131.6$ i długości 10 mm, każda z innym ciśnieniem CCS. Żeby wyeliminować wpływ zużycia ostrza na uzyskaną mikrostrukturę warstwy wierzchniej, każda powierzchnia została przetoczona nowym ostrzem. Na

rysunkach 6.74 i 6.75 przedstawiono wyniki z badań mikrostruktury warstwy wierzchniej toczonych średnic, które były przecięte wzdłużnie (w kierunku posuwu narzędzia) i poprzecznie.



Rys. 6.74. Mikrostruktura warstwy wierzchniej powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki przy zastosowanym ciśnieniu CCS 80 bar: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój wzdłużny



Rys. 6.75. Mikrostruktura warstwy wierzchniej powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki przy zastosowanym ciśnieniu CCS 10 bar: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój wzdłużny

Dla powierzchni otrzymanych w wyniku obróbki z zastosowaniem ciśnienia CCS równego 80 bar zarejestrowano odkształcenia ziaren w mikrostrukturze warstwy wierzchniej o charakterze ciągłym na poziomie głębokości do 3,8 μm . Okazjonalnie głębokość deformacji tych zmniejszała się do 2,5 μm . Pojawiły się także linie odkształceń, których

częstotliwość występowania charakteryzowała się pojedynczymi obecnościami o głębokości do 7,6 μm , a także występującymi dominująco o głębokości do 5 μm .

Z kolei powierzchnie uzyskane w wyniku obróbki z zastosowaniem ciśnienia CCS 10 bar charakteryzowały się także odkształceniami ziaren w mikrostrukturze warstwy wierzchniej o głębokości do 2,5 μm . Częstotliwość ich występowania miała również charakter ciągły. Dla powierzchni tych również zauważono linie odkształceń, które występowały na głębokości do 3,8 μm , a ich obecność miała charakter okresowy.

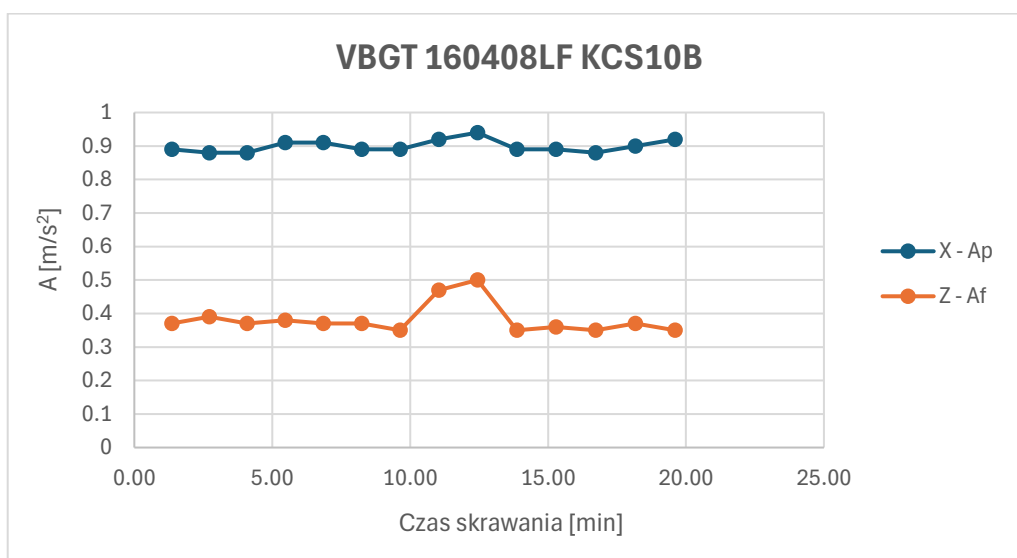
Pomimo niewielkich wartości głębokości deformacji ziaren w przypadku obu powierzchni, należy zaznaczyć, że deformacje ziaren w warstwie wierzchniej powierzchni otrzymanej w wyniku skrawania z zastosowanym ciśnieniem CCS równego 80 bar oprócz większej głębokości odznaczały się także silniejszymi zniekształceniami ziaren. Taki stan rzeczy jest najprawdopodobniej spowodowany znacznie szybszym odprowadzaniem ciepła ze strefy skrawania, a tym samym krótszym czasem chłodzenia obrobionej powierzchni, co sprzyja powstawaniu naprężeń.

Powyższe wyniki potwierdzają tezę, że wzrost ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej powyżej 50 bar podczas toczenia wykończeniowego stopu Inconel 718, ma niekorzystny wpływ na mikrostrukturę warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej.

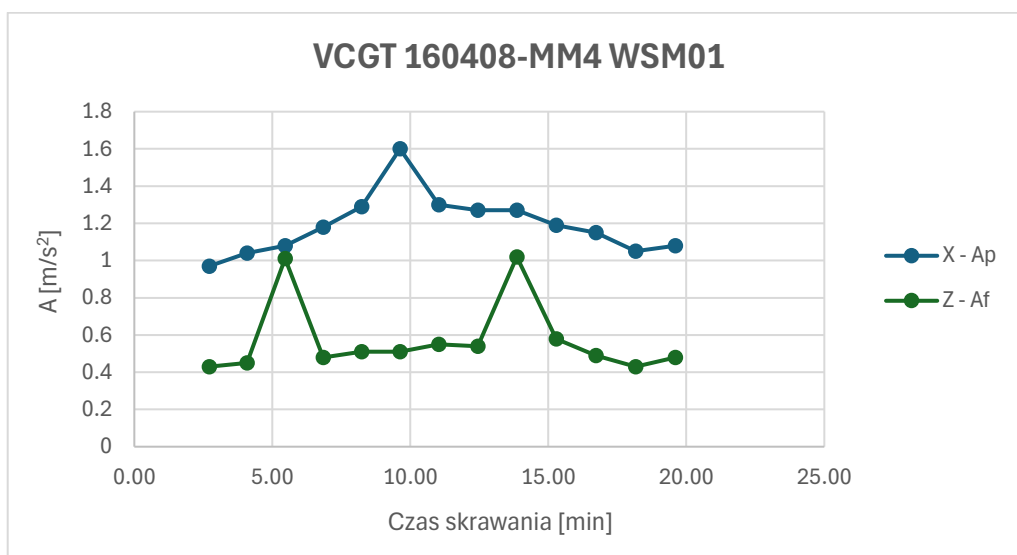
6.2.9 Analiza wartości skutecznych RMS przyspieszeń drgań

Teoretyczne modelowanie wartości chropowatości powierzchni oparte jest w szczególności o analizę czynników kinematyczno-geometrycznych, takich jak wartość promienia naroża r_e , posuwu f , czy promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n . Bardziej złożone modele mogą uwzględniać wartości przemieszczeń narzędzia, które są skutkiem drgań elementów składowych układu OUPN. Na rysunkach 6.76, 6.77 przedstawiono przykładowe przebiegi przyspieszeń drgań dla kierunku posuwowego A_f oraz odporowego A_p dla wytaczania otworów próbek materiału. Natomiast na rysunkach 6.78 i 6.79 przedstawiono dodatkowo przebiegi przyspieszeń drgań dla wspomnianych kierunków oraz dla składowej skrawania A_c , podczas wytaczania otworów części produkcyjnych z czujnikiem umieszczonym na wrzecionie oraz na podtrzymce. Rysunki 6.76 i 6.77 przedstawiają zmianę wartości średniokwadratowej w funkcji czasu obróbki, natomiast rysunki 6.78 i 6.79 w funkcji długości przejścia narzędzia. Wartości RMS na próbkach obliczono dla ostrza KCS10B, które najlepiej pracowało w oprawce o wysięgu 700 mm, oraz dla ostrza WSM01, które pracując w oprawce o wysięgu 700 mm w czasie

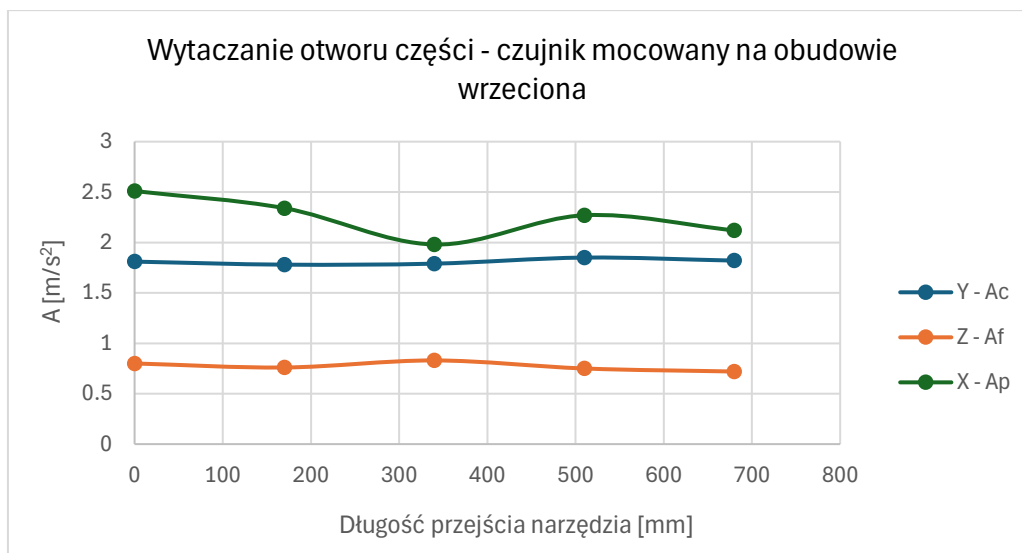
przeprowadzonych testów wykazywało chwilowe tendencje do powstawania nadmiernych wibracji. Ponieważ na próbkach wykonywano 14 przejść każdym z ostrzy, dlatego dla każdego przypadku wyznaczono wartości średniokwadratowe. Podczas wytaczania otworu części produkcyjnych pomiaru dokonano po wejściu narzędzia w materiał obrabiany oraz w czterech punktach kontrolnych. Pomiar wykonywano przez 60 s.



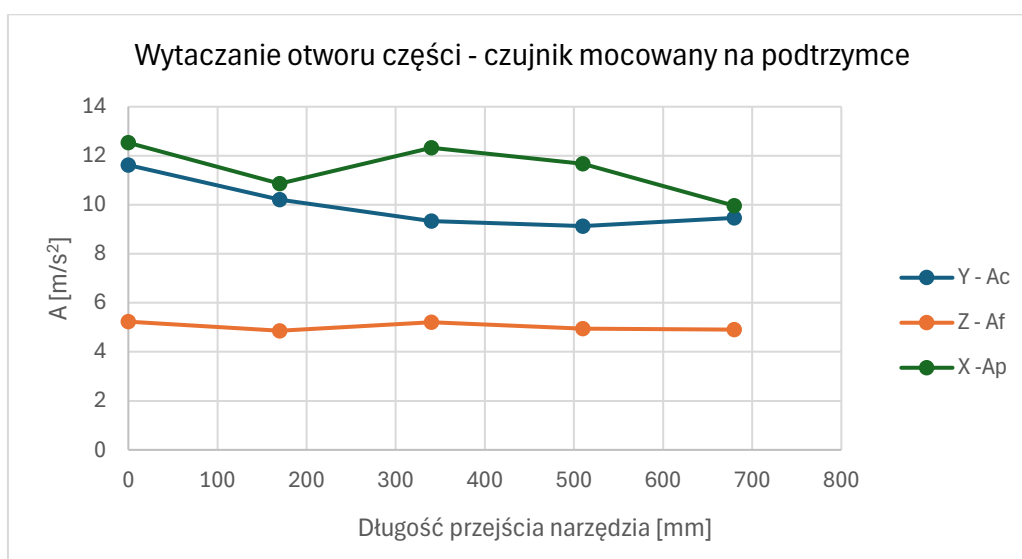
Rys. 6.76. Wartości skuteczne *RMS* przyspieszeń drgań dla składowej odporowej A_p i posuwowej A_f podczas wytaczania próbki materiału ostrzem KCS10B; $f = 0,14$ mm/obr, $v_c = 85$ m/min, $a_p = 0,2$ mm



Rys. 6.77. Wartości skuteczne *RMS* przyspieszeń drgań dla składowej odporowej A_p i posuwowej A_f podczas wytaczania próbki materiału ostrzem WSM01; $f = 0,14$ mm/obr, $v_c = 85$ m/min, $a_p = 0,2$ mm



Rys. 6.78. Wartości skuteczne *RMS* przyspieszeń drgań dla składowej odporowej A_p , skrawania A_c i posuwowej A_f podczas wytaczania otworu części produkcyjnej ostrzem KCS10B; $f = 0,14$ mm/obr, $v_c = 85$ m/min, $a_p = 0,2$ mm



Rys. 6.79. Wartości skuteczne *RMS* przyspieszeń drgań dla składowej odporowej A_p , skrawania A_c i posuwowej A_f podczas wytaczania otworu części produkcyjnej ostrzem KCS10B; $f = 0,14$ mm/obr, $v_c = 85$ m/min, $a_p = 0,2$ mm

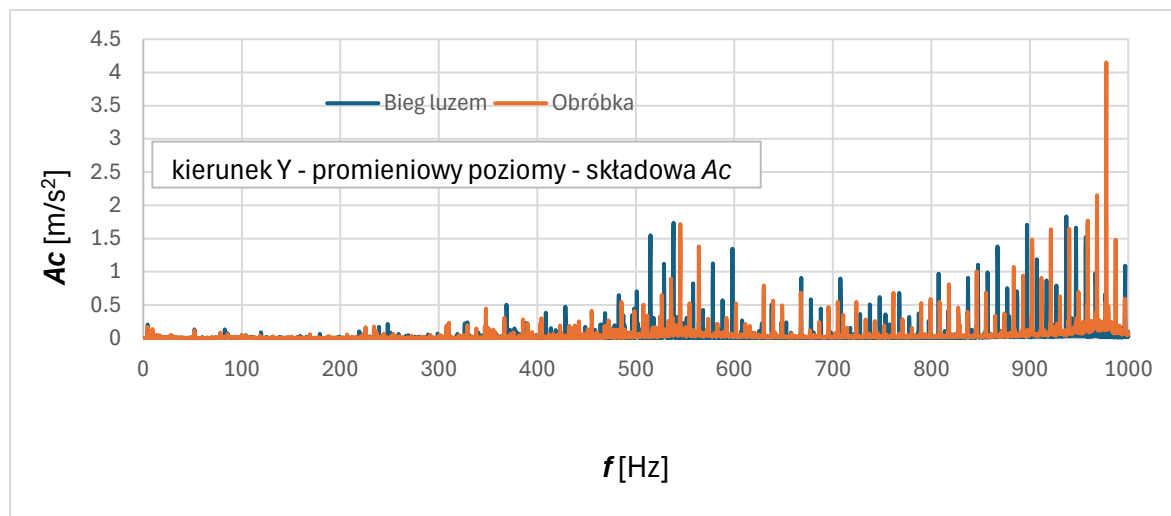
Na podstawie wyników wartości średniokwadratowych przyspieszeń drgań można stwierdzić, że w każdym z badanych przypadków największe ich wartości zarejestrowano dla składowej odporowej A_p . Jest to oczywiste, ponieważ podczas obróbki narzędziem o wysięgu 700 mm, to ta składowa ma największy wpływ na przemieszczenie ostrza narzędzia. Tym samym kierunek ten jest najbardziej podatny na drgania. W wyniku pomiarów wykonanych na próbkach materiału, amplitudy przyspieszeń drgań dla ostrza

KCS10B uzyskano na poziomie $0,9 \text{ m/s}^2$ dla składowej odporowej A_p , oraz w zakresie $0,35 \div 0,5 \text{ m/s}^2$ dla składowej posuwowej A_f . Natomiast dla ostrza WSM01 wartości składowej odporowej A_p zanotowano w zakresie $1 \div 1,6 \text{ m/s}^2$ z kolei wartości składowej posuwowej zarejestrowano w zakresie $0,4 \div 1 \text{ m/s}^2$. Zdecydowanie mniejsze wartości przyspieszeń drgań obu składowych definitywnie potwierdzają, że ostrze KCS10B wykazuje mniejszą tendencję do generowania drgań podczas obróbki.

Analizując wyniki uzyskane podczas pomiarów wykonywanych na częściach produkcyjnych stwierdzono, że dla przypadku gdy czujnik mocowany był na podtrzymce amplitudy drgań były prawie pięć razy większe dla wszystkich składowych w porównaniu z wartościami, które zanotowano podczas położenia czujnika na obudowie wrzeciona. Jest to oczywiste ze względu na lokalizację czujnika bliżej źródła drgań. Największe wartości skuteczne przyspieszeń drgań przy położeniu czujnika na podtrzymce zarejestrowano dla składowej odporowej A_p , gdzie wyniosły one w zakresie $10 \div 12,5 \text{ m/s}^2$. Z kolei dla składowych A_c i A_f wartości przyspieszeń wyniosły odpowiednio $9 \div 11,5 \text{ m/s}^2$ oraz $5 \div 5,5 \text{ m/s}^2$. Natomiast dla pozycji czujnika umieszczonego na obudowie wrzeciona, największe wartości skuteczne również zarejestrowano dla składowej odporowej A_p , które wyniosły $2 \div 2,5 \text{ m/s}^2$. Wartości składowych A_c i A_f zanotowano odpowiednio na poziomie $1,8 \text{ m/s}^2$ oraz $0,7 \div 0,8 \text{ m/s}^2$.

Na podstawie uzyskanych danych można stwierdzić, że pozycja podtrzymki w przestrzeni roboczej obrabiarki, która wynika z długości obrabianej części jest miejscem, które charakteryzuje się stosunkowo dużą podatnością na powstawanie wibracji. Świadczy to również o dodatkowych trudnościach jakie towarzyszą podczas obróbki częściom o dużej smukłości, w porównaniu do krótkich części zamocowanych tylko w uchwycie obrabiarki. Ponadto odnosząc się do wyników uzyskanych dla lokalizacji czujnika na podtrzymce można zauważyć, że w początkowym etapie obróbki wartości *RMS* wszystkich składowych chwilowo wzrastają, natomiast po chwili maleją. Jest to prawdopodobnie związane ze wzrostem przyspieszeń drgań spowodowanych wejściem ostrza w materiał, natomiast późniejsze obniżenie ich wartości można przypisać wytłumieniu wywołanemu przez oprawkę antywibracyjną. Z kolei późniejszy wzrost wartości skutecznych przyspieszeń drgań, szczególnie składowej A_p można przypisać zużywającemu się narzędziu, dla którego wskaźnik $VB_C = 0,134 \text{ mm}$.

Na rysunku 6.80 przedstawiono także przebieg widma drgań w procesie obróbki części produkcyjnej z wytaczania na początku otworu na długości $L = 0 \div 40$ mm.



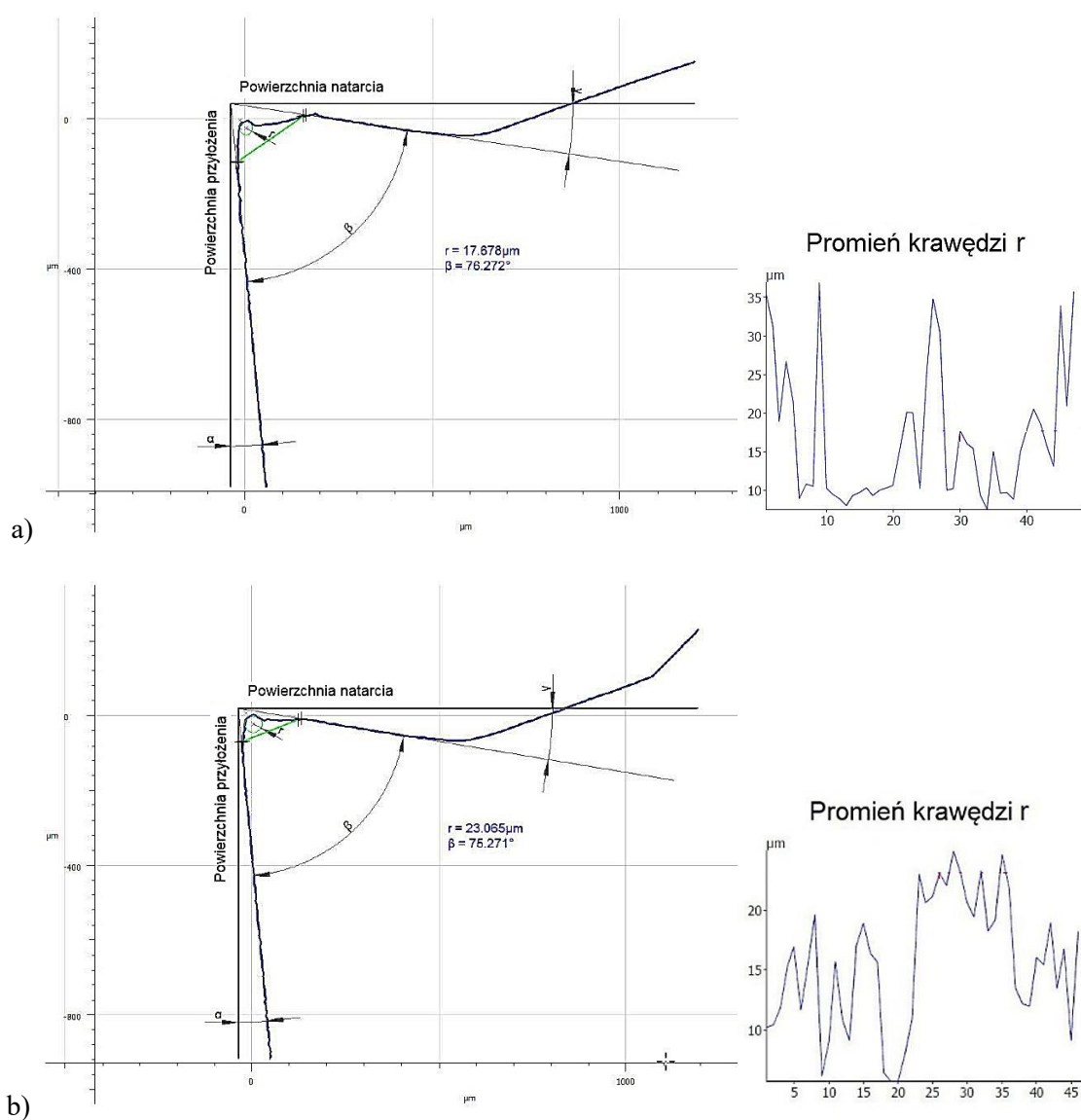
Rys. 6.80. Widmo przyspieszeń drgań dla składowej skrawania A_c podczas wytaczania początku otworu części produkcyjnej ostrzem KCS10B; $f = 0,14$ mm/obr, $v_c = 85$ m/min, $a_p = 0,2$ mm

Przedstawione widmo dla składowej skrawania A_c , pokazuje porównanie przyspieszeń drgań podczas biegu jałowego obrabiarki i podczas skrawania. Piki wartości przyspieszeń biegu jałowego pochodzą zapewne od kinematyki obrabiarki. Natomiast piki wartości przyspieszeń z procesu obróbki, które nie pokrywają się z wartościami biegu jałowego pochodzą prawdopodobnie od częstotliwości drgań własnych wytaczadła.

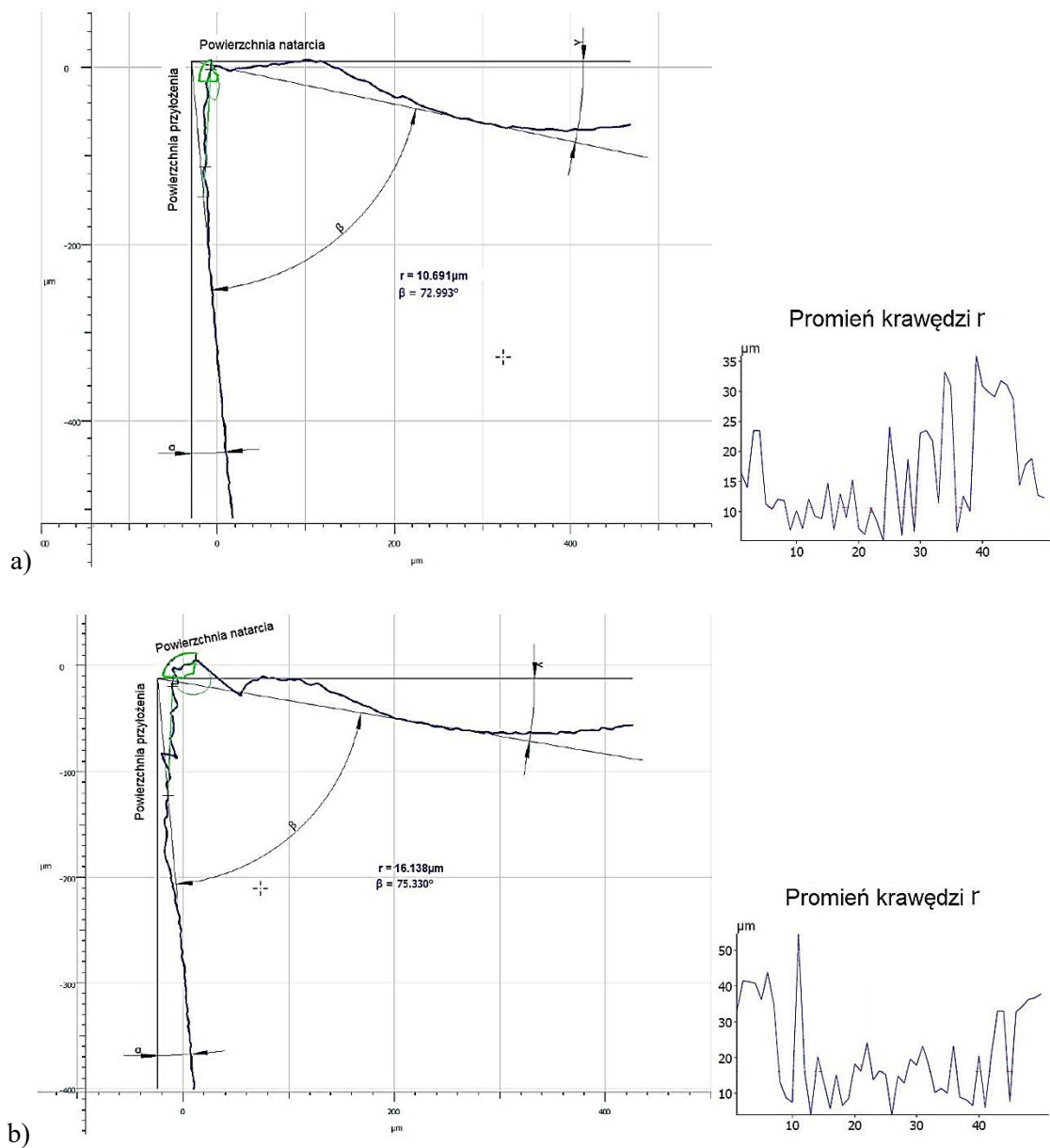
6.2.10 Wpływ wysięgu zastosowanej oprawki narzędziowej na zmianę mikrogeometrii ostrza

Badania przeprowadzone na próbkach materiału Inconel 718 były wykonywane z zastosowaniem oprawek o wysięgach 120 mm i 700 mm. Jednym z celów tych badań było określenie wpływu zastosowanych wysięgów na zmianę mikrogeometrii ostrza skrawającego z uwzględnieniem zużycia ostrzy po 19 min skrawania. Wyniki takich badań będą miarodajne, jeśli proces skrawania odbywać się będzie w stabilnych warunkach, tzn. nie pojawią się drgania, które znacznie intensyfikują proces zużycia ostrza skrawającego. Jednym z czynników wpływających na pojawianie się drgań podczas obróbki są parametry skrawania. Zaimplementowane w badaniach parametry skrawania nie wywoływały drgań w czasie prowadzonych testów. Jak przedstawiono w rozdziale 6.2.1 dla większości badanych narzędzi z wyjątkiem WSM01, zarejestrowano mniejsze wartości wskaźnika VB_C dla ostrzy pracujących w oprawce o wysięgu 700 mm z tłumieniem drgań. Na rysunkach

6.81 i 6.82 przedstawiono zmianę mikrogeometrii ostrzy skrawających KCS10B oraz S205, pracujących w obu oprawkach. Termin mikrogeometrii odniesiony jest przede wszystkim do wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n . Natomiast na rysunku 6.83 przedstawiono wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n dla zużytych ostrzy KCS10B, S205, MP9005 oraz IC804 pracujących w obu oprawkach, zarejestrowanych dla 47 profili z całej strefy skrawania mikroskopem optycznym Alicona.

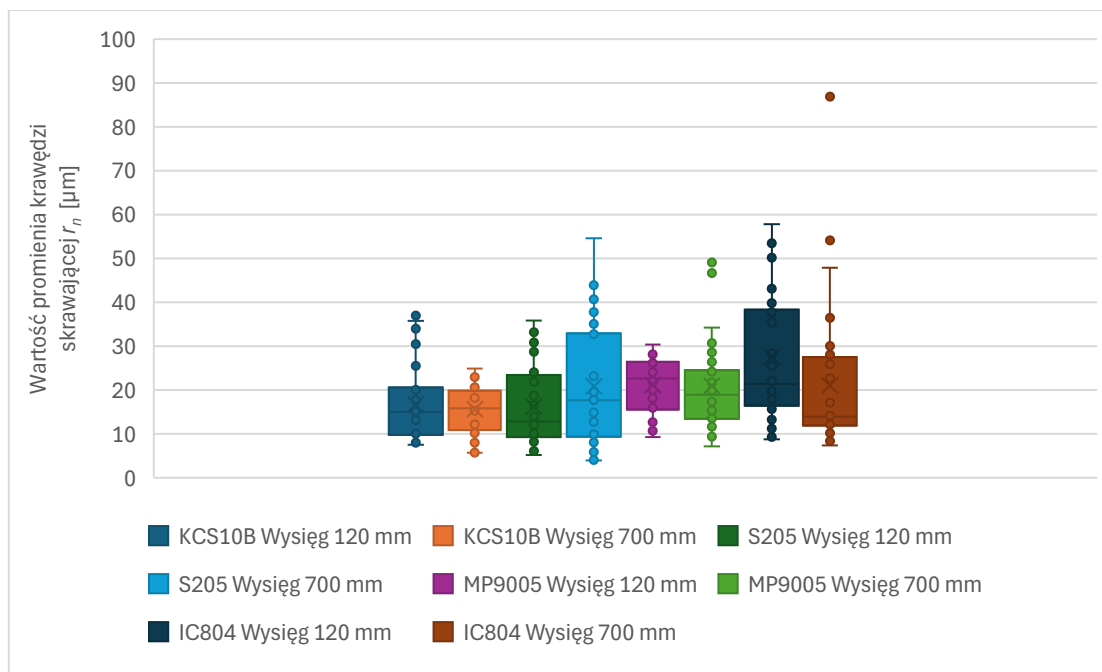


Rys. 6.81. Profile przekroju zużytej krawędzi skrawającej oraz wartości promienia krawędzi r_n w obszarze zużycia ostrza KCS10B; a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm



Rys. 6.82. Profile przekroju zużytej krawędzi skrawającej oraz wartości promienia krawędzi r_n w obszarze zużycia ostrza S205; a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm

Większe zużycie ostrza WSM01 oceniane wskaźnikiem VB_C uzyskane podczas pracy w oprawce o wysięgu 700 mm, mogło być spowodowane uszkodzeniem substratu ostrza wywołanym pojawiającymi się chwilowo wibracjami, o których wspomniano w rozdziale 6.2.9. Tendencję do powstawania drgań dla tego ostrza potwierdził także pomiar wartości przyspieszeń drgań.

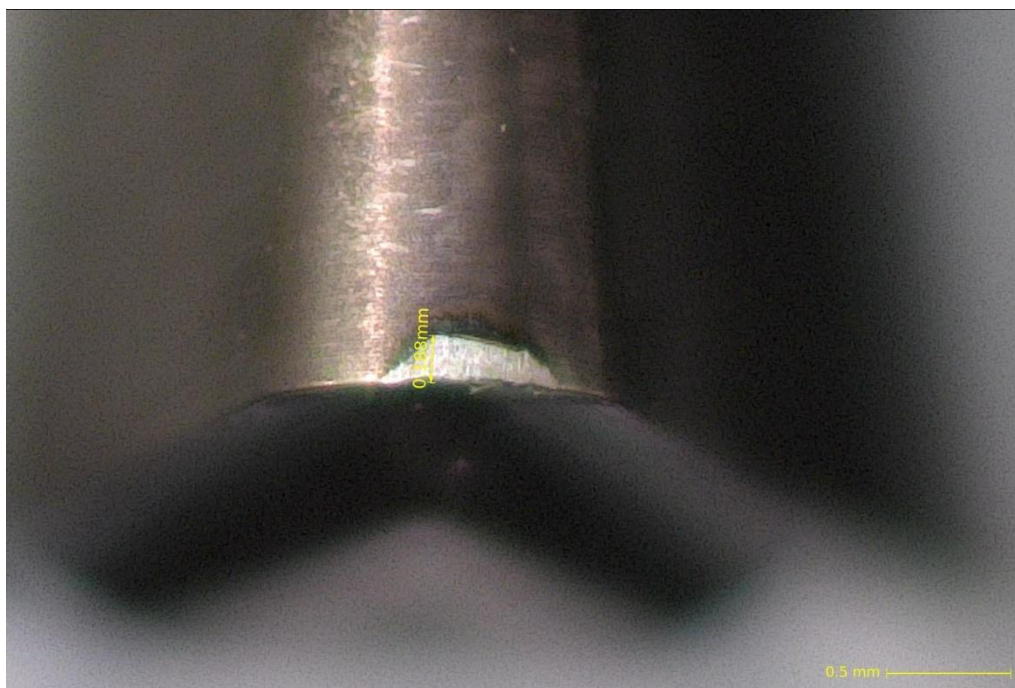


Rys. 6.83. Wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n w obszarze zużycia ostrzy KCS10B, S205, MP9005 i IC804 pracujących w oprawkach o wysięgu 120 mm i 700 mm

Na podstawie rysunków 6.81, 6.82 i 6.83 można zauważyć, że wysięg zastosowanej oprawki narzędziowej ma niewielki wpływ na zmianę mikrogeometrii zużytego ostrza, definiowanej wartością promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej. Po 19 min obróbki niezależnie od zastosowanej oprawki wartości średnie promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n dla danego ostrza są na zbliżonym poziomie i różnią się jedynie wartością rozrzutu otrzymanych wyników. Należy także zaznaczyć, że odczytane wartości niektórych promieni krawędzi z danego obszaru zużycia narzędzia, mogą być obarczone błędem pomiarowym ze względu na pojawiający się narost na niektórych ostrzach. Ponadto w niektórych przypadkach zbyt duże zużycie i deformacje ostrza, mogły również spowodować niewłaściwe odczytanie wartości r_n . W większości przypadków, niezależnie od wysięgu oprawki narzędziowej wartość promienia krawędzi zmniejszyła się w porównaniu do wartości początkowych, zarejestrowanych dla nowych ostrzy. Taki stan rzeczy mógł być spowodowany zużyciem ściernym nie samego promienia, ale graniczących z nim obszarów powierzchni przyłożenia i natarcia, co zmniejszało jego wartość. Zatem wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n przy tak długim czasie pracy w materiale Inconel 718, nie jest zależna od wysięgu zastosowanej oprawki narzędziowej ale od wielkości i charakteru zużycia samego ostrza.

6.2.11 Wpływ wartości posuwu na zużycie ostrza, dokładność uzyskiwanych wymiarów oraz chropowatość powierzchni

Badania wpływu wartości posuwu na zużycie ostrza, dokładność wymiarową oraz chropowatość powierzchni zostały przeprowadzone na zbrakowanych częściach produkcyjnych według warunków zapisanych w tabeli 4.4. Ich celem była weryfikacja wpływu zmniejszonej wartości posuwu do $f = 0,1$ mm/obr na zużycie ostrza, co w konsekwencji wpłynie na dokładność uzyskiwanych wymiarów oraz jakość powierzchni, ocenianą parametrem chropowatości Ra . Testy przeprowadzono na trzech zbrakowanych częściach produkcyjnych z zastosowaniem ostrza KCS10B, wybranego do wdrożenia. Ocenę zużycia dokonano poprzez pomiar wartości szerokości starcia powierzchni przyłożenia definiowanej wskaźnikiem VB_C . Na rysunku 6.84 przedstawiono zużycie ostrza, dla którego zarejestrowano największą wartość wskaźnika $VB_C = 0,188$ mm.

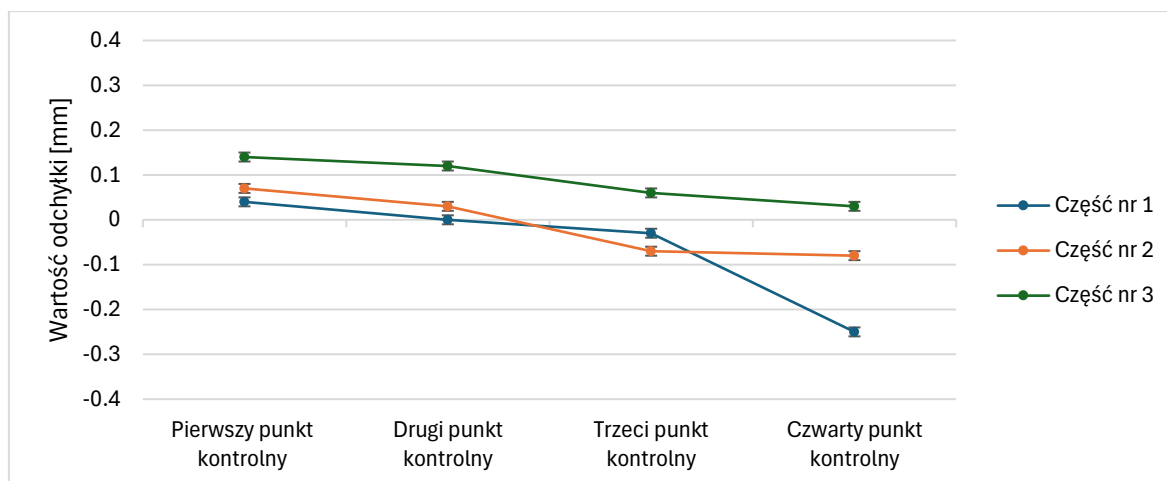


Rys. 6.84. Wartość wskaźnika VB_C dla ostrza KCS10B po toczeniu wykończeniowym otworu części produkcyjnej; $f = 0,1$ mm/obr, $v_c = 85$ m/min, $a_p = 0,2$ mm

Średnią wartość wskaźnika VB_C dla trzech zużytych ostrzy, którymi wykonano obróbkę z posuwem $f = 0,1$ mm/obr otrzymano na poziomie $VB_C = 0,16$ mm, co daje o 56% jego większą wartość w porównaniu do tych samych ostrzy skrawających z wartością posuwu równą $f = 0,14$ mm/obr. Powodem zwiększonych wartości wskaźnika VB_C jest wydłużony czas pracy narzędzia do 26 min w wyniku obniżonej wartości posuwu. Czas pracy narzędzia

jest dłuższy prawie o 50% w porównaniu do czasu skrawania przy większej testowanej wartości posuwu, co powoduje, że przy obróbce stopu Inconel 718 narzędzie wykonane z węglików spiekanych o wartości promienia naroża 0,8 mm nie jest w stanie uzyskać wymaganej trwałości ostrza.

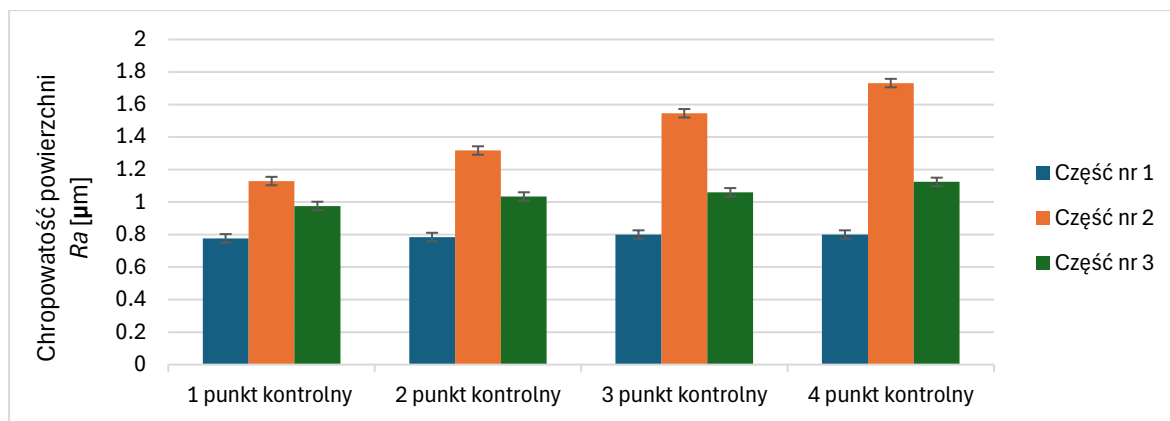
Na rysunku 6.85 przedstawiono zmierzone odchyłki od wymiaru nominalnego dla otworów trzech obrobionych części.



Rys. 6.85. Wartości zmierzonych odchyłek od wymiaru zadanego dla powierzchni otworu uzyskanego w wyniku obróbki ostrzem płytki KCS10B, dla 3 badanych części; $f = 0,1$ mm/obr, $v_c = 85$ m/min, $a_p = 0,2$ mm

Wartość zmierzonych odchyłek od wymiaru zadanego jest na zbliżonym poziomie, jak w przypadku zastosowanego posuwu $f = 0,14$ mm/obr. Jednak dla jednej części różnica wymiaru średnicy pomiędzy początkiem a końcem otworu miała większą wartość niż dla otworów wykonanych przy większej wartości posuwu i wyniosła 0,29 mm. Jest to wynikiem wzrostu zużycia ostrza, ocenianego wskaźnikiem VB_C , do którego przyczynił się dłuższy czas obróbki.

Na rysunku 6.86 pokazano zmierzone wartości chropowatości powierzchni definiowanej parametrem Ra dla otworów obrobionych części, mierzonej w czterech punktach kontrolnych.



Rys. 6.86. Wartości parametru chropowatości Ra dla powierzchni otworu uzyskanej w wyniku obróbki ostrzem płytki KCS10B, dla 3 badanych części; $f = 0,1$ mm/obr, $v_c = 85$ m/min, $a_p = 0,2$ mm

Wartości średnie otrzymanych parametrów Ra chropowatości powierzchni charakteryzowały się także dużym rozrzutem zarejestrowanych wyników, jak w przypadku testów ze zwiększoną wartością posuwu. Należy zaznaczyć, że dla jednej z części na powierzchni otworu w końcowym etapie obróbki wartość parametru chropowatości wyniosła $Ra = 1,732$ μm , co oznacza, że została przekroczona wartość dopuszczalna $Ra = 1,6$ μm . Jest to także rezultatem zbyt dużego zużycia ostrza, ocenianego wskaźnikiem VB_C , połączonego z anomalią zachodzącymi w strukturze chropowatości powierzchni stopu 718 [66].

6.2.12 Wnioski z badań zasadniczych

Na podstawie badań przeprowadzonych na próbkach materiału można sformułować następujące wnioski:

1. Wyśięg oprawki narzędziowej ma wpływ na dokładność uzyskiwanych wymiarów, jak również jakość powierzchni obrobionej, oraz zużycie ostrza.
2. Biorąc pod uwagę wyniki uzyskanych wymiarów rzeczywistych w stosunku do nominalnych toczonych średnic, należy zauważyć, że dla wszystkich ostrzy pracujących w oprawce o wyśięgu 700 mm uzyskano większe odchyłki w porównaniu do tych samych płytek pracujących w oprawce o wyśięgu 120 mm. Odnosząc się do końcowego etapu obróbki dla oprawki o wyśięgu 700 mm najmniejszą odchyłkę od wymiaru nominalnego zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką S205. Natomiast w przypadku oprawki o wyśięgu 120 mm najmniejszą wartość odchyłki zarejestrowano dla powierzchni obrobionej płytką MP9005. W przypadku obu oprawek największe wartości odchyłek od

wymiaru nominalnego zarejestrowano dla powierzchni obrobionych ostrzami płytki IC804. Zatem stosując oprawkę o wysięgu $10 \times D$ niezbędne jest rozważenie konieczności zastosowania korekcji ścieżki narzędzia. Jest to spowodowane ugięciem narzędzia, którego wartość wzrasta w miarę ewolucji zużycia ostrza.

3. Przeprowadzone badania porównawcze na próbkach materiału pokazują, że dla większości ostrzy dłuższy wysięg narzędzia miał negatywny wpływ biorąc pod uwagę otrzymane wartości chropowatości i topografii powierzchni. Jest to spowodowane mniejszą stabilnością procesu skrawania. W przypadku oprawki o wysięgu 120 mm, najmniejsze wartości parametrów chropowatości Ra i topografii Sa w końcowym etapie obróbki zarejestrowano dla powierzchni obrobionej ostrzem MP9005. Biorąc pod uwagę oprawkę o wysięgu 700 mm, najmniejsze wartości parametrów chropowatości i topografii w końcowym etapie obróbki zarejestrowano dla powierzchni obrobionej ostrzem KCS10B.
4. Biorąc pod uwagę końcowy etap obróbki, niezależnie od zastosowanej oprawki narzędziowej, odnotowano wyższą niż przewidywaną chropowatość i topografię dla wszystkich obrobionych powierzchni. Jest to niewątpliwie spowodowane zużyciem krawędzi skrawającej wynikającym ze stosunkowo długiego czasu pracy narzędzi.
5. Zarówno dla oprawki o wysięgu 120 mm, jak i dla oprawki o wysięgu 700 mm, największe wartości parametrów chropowatości i topografii zarejestrowano dla powierzchni obrobionych ostrzami płytki IC804. Powodem uzyskania takich wyników było największe zużycie owych ostrzy oceniane wskaźnikiem VB_C oraz największa wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n . Taki wynik potwierdza zgodność badań z wynikami uzyskanymi przez Fang [76] i Niesłonego [80].
6. Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują, że niektóre ostrza zużywają się mniej pracując w oprawkach narzędziowych o mniejszej sztywności, ale wyposażonych w tłumik drgań. Jest to niewątpliwie interesujący obszar do dalszych badań. Dla powierzchni obrobionych ostrzami WSM01 i KCS10B, pracującymi w oprawce o wysięgu 700 mm zarejestrowano mniejsze wartości chropowatości i topografii powierzchni w porównaniu do ostrzy pracujących w krótszej oprawce. Takie rezultaty były spowodowane ostrą geometrią płytki, która w połączeniu z dużą wytrzymałością krawędzi skrawającej i ugięciem długiej oprawki doprowadziły do mniejszego obciążenia ostrza. Spowodowało to w konsekwencji mniejsze zużycie powierzchni przyłożenia omawianych ostrzy, jak również zmieniło charakter samego ich zużycia, co miało wpływ na uzyskaną chropowatość i topografię powierzchni.

7. Należy zauważyć, że dla płytek skrawających, których powłoki naniesiono metodą PVD najmniejsze zużycie uzyskano dla ostrzy, na których zastosowano powłokę AlTiN z wyjątkiem ostrza IC804. Powłoka ta charakteryzuje się większą odpornością na ścieranie oraz dobrymi właściwościami przeciwciernymi w porównaniu z tradycyjną powłoką TiAlN [91, 97]. W przypadku ostrza IC804 należy zaznaczyć, że biorąc pod uwagę informacje od producenta powłoka ta jest przeznaczona dla zastosowań z użyciem mniejszych i średnich prędkości skrawania. Oznacza to, że przyjęta w badaniach wartość prędkości skrawania mogła być dla tego ostrza zbyt wysoka.
8. Najmniejsze wartości zużycia ostrza ocenianego wskaźnikiem VB_C , dla płytek skrawających umieszczonych w oprawce o wysięgu 120 mm, zarejestrowano dla ostrza WSM01. Natomiast dla płytek skrawających pracujących w oprawce o wysięgu 700 mm najmniejszą wartość wskaźnika VB_C zanotowano dla ostrza KCS10B.
9. W odniesieniu do uzyskanej mikrostruktury warstwy wierzchniej szczególnie w końcowym etapie skrawania kiedy narzędzie uległo największemu zużyciu, podczas obróbki ostrzami pracującymi w oprawce o wysięgu 120 mm, najlepsze rezultaty otrzymano dla powierzchni obrobionych ostrzami MP9005 i KCS10B. W mikrostrukturze warstwy wierzchniej tych powierzchni nie zarejestrowano żadnych deformacji ziaren ani defektów powierzchniowych. Natomiast w sytuacji obróbki ostrzami umieszczonymi w oprawce o wysięgu 700 mm tylko mikrostruktura warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej ostrzem KCS10B, była wolna od deformacji ziaren i wad powierzchniowych.
10. Najbardziej interesujące rezultaty w mikrostrukturze warstwy wierzchniej uzyskano dla powierzchni obrobionej ostrzem IC804. W strukturze tej wystąpiły silne deformacje ziaren spowodowane znacznym zużyciem ostrza, choć ich głębokość zmniejszyła się w miarę upływu czasu obróbki. Taki stan rzeczy spowodowany był najprawdopodobniej sytuacją, w której zwiększające się zużycie powodowało cofanie się krawędzi skrawającej, co w konsekwencji doprowadziło do wzrostu składowej odporowej siły skrawania. Intensyfikacja tej składowej siły skrawania była przyczyną ugięcia oprawki narzędziowej. Wspomniane ugięcie oprawki antywibracyjnej doprowadziło do zmniejszenia wywieranego nacisku przez ostrze na powierzchnie obrobioną, pogorszył się proces skrawania, a zaczął postępować poślizg ostrza po powierzchni.
11. Wzrost ciśnienia cieczy chłodziwo-smarującej powyżej 50 bar podczas toczenia wykończeniowego stopu Inconel 718, ma niekorzystny wpływ na mikrostrukturę warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej.

W oparciu o badania przeprowadzone na zbrakowanych częściach produkcyjnych można sformułować wnioski jak poniżej:

12. Wszystkie powierzchnie otrzymane w wyniku obróbki ostrzami MP9005, KCS10B i S205 spełniły wymogi pod względem uzyskanej chropowatości powierzchni, której wartość nie mogła przekroczyć $Ra = 1,6 \mu\text{m}$. Natomiast powierzchnie obrobione ostrzem S205 charakteryzowały się mniejszą średnią wartością i rozrzutem otrzymanych wyników parametru Ra w porównaniu do powierzchni uzyskanych w wyniku obróbki ostrzami MP9005 i KCS10B.
13. Odnosząc się do otrzymanej dokładności wymiarowej w postaci zmierzonych odchylek od wymiaru zadanego, największe różnice wymiarów, szczególnie pomiędzy początkiem a końcem otworu zanotowano dla powierzchni obrobionych ostrzem MP9005. Natomiast najmniejsze różnice wymiarów pomiędzy początkiem a końcem obrobionego otworu zarejestrowano dla powierzchni obrobionych ostrzem KCS10B.

7. PREZENTACJA WDROŻENIA OPRACOWANEGO ROZWIĄZANIA

7.1. Zasady dotyczące wdrażania zmian w procesie technologicznym części produkowanej według wymagań ESA

7.2. Przebieg wdrożenia

7.3. Analiza powtarzalności uzyskiwanych wymiarów oraz chropowatości powierzchni obrobionej

8. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania i ich analiza z uwzględnieniem literatury pozwalają na wyciągnięcie wniosków o charakterze poznawczym, użytkowym, a także wniosków do dalszych badań.

8.1. Wnioski odnoszące się do tez pracy

1. Podczas toczenia wykończeniowego materiału Inconel 718 i zastosowaniu parametrów skrawania nie wywołujących drgań w czasie procesu obróbki, dla wymaganej trwałości narzędzia 19 min, wysięg zastosowanej oprawki narzędziowej nie ma wpływu na zmianę mikrogeometrii ostrza. Zmiana mikrogeometrii ostrza skrawającego definiowana wartością promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n w tak długim czasie obróbki jest uzależniona od wielkości i charakteru zużycia ostrza.
2. Wzrost ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej powyżej 50 bar podczas toczenia wykończeniowego stopu Inconel 718, ma niekorzystny wpływ na mikrostrukturę warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej. Przeprowadzone badania potwierdziły, że mikrostruktura warstwy wierzchniej powierzchni otrzymanej w wyniku obróbki z zastosowanym ciśnieniem CCS 80 bar, charakteryzowała się silniejszą deformacją ziaren, a także większą głębokością ich zalegania.

8.2. Wnioski poznawcze

1. Wartość chropowatości powierzchni nie zawsze odzwierciedla deformację ziaren w mikrostrukturze warstwy wierzchniej. Powierzchnia obrobiona, dla której zarejestrowano największe wartości parametrów chropowatości nie odznaczała się największą deformacją ziaren.
2. Mikrotwardość naniesionych powłok przeciwwzużyciowych na ostrza skrawające nie jest jedynym czynnikiem determinującym odporność na ścieranie podczas skrawania materiału Inconel 718.
3. Biorąc pod uwagę końcowy etap obróbki, niezależnie od zastosowanej oprawki narzędziowej, odnotowano większą niż przewidywaną chropowatość i topografię dla wszystkich obrobionych powierzchni. Jest to niewątpliwie spowodowane zużyciem krawędzi skrawającej wynikającym ze stosunkowo długiego czasu pracy narzędzi.

4. Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują, że przy zastosowanych parametrach skrawania, które nie wywołują drgań podczas procesu obróbki, niektóre ostrza zużywają się mniej pracując w oprawkach narzędziowych o mniejszej sztywności, ale wyposażonych w tłumik drgań. Mniejsze zużycie ostrza przełożyło się na jakość uzyskanej powierzchni. Przykładem jest powierzchnia obrobiona ostrzem KCS10B, umieszczonym w oprawce o wysięgu 700 mm, dla której zarejestrowano mniejsze wartości chropowatości i topografii powierzchni w porównaniu do ostrza pracującego w oprawce o wysięgu 120 mm. Takie rezultaty były spowodowane ostrą geometrią płytki, która w połączeniu z dużą wytrzymałością krawędzi skrawającej i ugięciem długiej oprawki doprowadziły do zmniejszenia bezpośredniego obciążenia ostrza, tłumiąc jednocześnie drgania. Spowodowało to w konsekwencji mniejsze zużycie powierzchni przyłożenia omawianego ostrza, jak również zmieniło charakter samego zużycia, co miało wpływ na uzyskaną chropowatość i topografię powierzchni. Dla powierzchni obrobionej ostrzem KCS10B otrzymano także mikrostrukturę warstwy wierzchniej, która była wolna od deformacji ziaren i wad powierzchniowych.
5. Zarówno dla oprawki o wysięgu 120 mm, jak i dla oprawki o wysięgu 700 mm, największe wartości parametrów chropowatości i topografii zarejestrowano dla powierzchni obrobionych ostrzami płytki IC804. Powodem uzyskania takich wyników było największe zużycie owych ostrzy oceniane wskaźnikiem VB_C oraz największa wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n . Taki wynik potwierdza zgodność badań z wynikami uzyskanymi przez Fang [76] i Niesłonego [80].
6. Na podstawie uzyskanych wyników przyspieszeń drgań można stwierdzić, że pozycja podtrzymki w przestrzeni roboczej obrabiarki, która wynika z długości obrabianej części jest miejscem, które charakteryzuje się stosunkowo dużą podatnością na powstawanie wibracji. Świadczy to również o dodatkowych trudnościach jakie towarzyszą podczas obróbki częściom o dużej smukłości w porównaniu do krótkich części zamocowanych tylko w uchwycie obrabiarki.
7. Ze względu na wymaganą trwałość narzędzia równą 19 min, odnosząc się do wytrzymałości ostrza, najkorzystniejsza wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n wydaje się być w zakresie $20 \div 30 \mu\text{m}$. Mniejsza wartość r_n od $20 \mu\text{m}$ przy tak długim czasie obróbki powoduje narażenie ostrza

skrawającego na powstawanie mikro wyszczerbień przyspieszających jego zużycie. Z kolei większa wartość r_n od 30 μm także przyspiesza jego zużycie, a także doprowadza do wzrostu otrzymywanej chropowatości powierzchni.

8. Wzrost współczynnika tarcia μ powłok przeciwzużyciowych może być przyczyną przyspieszonego zużycia ostrza skrawającego.

8.3. Wnioski z przeprowadzonego wdrożenia

1. Na podstawie uzyskanych wymiarów średnic otworów można zauważyć, że wszystkie wyprodukowane części zostały wykonane zgodnie. W żadnym z punktów kontrolnych tolerancja wykonania otworu nie została przekroczona. Należy jednak zwrócić uwagę, że największy rozrzut zmierzonych wymiarów średnic uzyskano dla czwartego punktu kontrolnego, czyli w końcowym etapie obróbki. Jest to spowodowane ewolucją zużycia ostrza, które wywołując wzrost oporów skrawania, obniża stabilność procesu obróbki w układzie OUPN, zwiększając jednocześnie losowość otrzymywanych wymiarów.
2. Uzyskana wartość chropowatości powierzchni w czwartym punkcie kontrolnym obrobionego otworu charakteryzuje się największym rozrzutem otrzymanych wyników. Obszar ten odznacza się także największą wartością średnią parametru R_a . Jest to definitywnie spowodowane intensyfikacją zużycia ostrza narzędzia.

8.4. Wnioski uylitarne

1. Wysięg oprawki narzędziowej ma wpływ na dokładność uzyskiwanych wymiarów, jak również jakość powierzchni obrobionej, oraz zużycie ostrza. Biorąc pod uwagę wyniki uzyskanych wymiarów rzeczywistych w stosunku do nominalnych toczonych średnic, należy zauważyć, że dla wszystkich ostrzy pracujących w oprawce o wysięgu 700 mm uzyskano większe odchyłki w porównaniu do tych samych płytek pracujących w oprawce o wysięgu 120 mm.
2. Stosując oprawkę o wysięgu $10 \times D$ niezbędne jest rozważenie konieczności zastosowania korekcji ścieżki narzędzia. Jest to spowodowane ugięciem narzędzia, którego wartość wzrasta w miarę ewolucji zużycia ostrza.
3. Biorąc pod uwagę końcowy etap obróbki, niezależnie od zastosowanej oprawki narzędziowej, odnotowano wyższą niż przewidywaną wartość chropowatości i topografii dla wszystkich obrobionych powierzchni. Jest to niewątpliwie

spowodowane zużyciem krawędzi skrawającej wynikającym ze stosunkowo długiego czasu pracy narzędzi.

4. Dla płytek skrawających, których powłoki naniesiono metodą PVD najmniejsze zużycie uzyskano dla ostrzy, na których zastosowano powłokę AlTiN z wyjątkiem ostrza IC804. Powłoka ta charakteryzuje się większą odpornością na ścieranie oraz dobrymi właściwościami przeciwciernymi w porównaniu z tradycyjną powłoką TiAlN [91, 97].

8.5. Wnioski do dalszych badań

1. W mikrostrukturze warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej ostrzem IC804 wystąpiły silne deformacje ziaren spowodowane znacznym zużyciem ostrza, choć ich głębokość zmniejszyła się w miarę upływu czasu obróbki. Taki stan rzeczy spowodowany był najprawdopodobniej sytuacją, w której zwiększające się zużycie powodowało cofanie się krawędzi skrawającej, co w konsekwencji doprowadziło do wzrostu składowej odporowej siły skrawania. Zwiększenie tej składowej siły skrawania była przyczyną ugięcia oprawki narzędziowej. Wspomniane ugięcie oprawki antywibracyjnej doprowadziło do zmniejszenia wywieranego nacisku przez ostrze na powierzchnię obrobioną, pogorszył się proces skrawania, a zaczął postępować poślizg ostrza po powierzchni. Takie rezultaty wymagają dalszych badań, które potwierdzą, czy ugięcie narzędzia o długim wysięgu w wyniku zużycia ostrza, nie będzie zwiększało deformacji ziaren w mikrostrukturze warstwy wierzchniej.

Literatura

1. Paulonis D. F., Schirra J.J., Alloy 718 at Pratt & Whitney historical perspective and future challenges. Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives, (ed.) E.A. Loria, The Minerals, Metals & Materials So-ciety, 2001, s. 13–23.
2. Schafrik R.E., Ward D.D., Groh J.R., Application of Alloy 718 in GE Aircraft Engines: Past, Present and Next Five Years. Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives, (ed.) E.A. Loria, The Minerals, Metals & Materials So-ciety, 2001, s. 1–11.
3. Chwalczuk T., Warstwa wierzchnia stopu Inconel 718 po toczeniu ze wspomaganiami laserowym. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska 2017, promotor: D. Przestacki.
4. Krawczyk B., Szablewski P., Legutko S., Smak K., Gapiński B., Anomalies in the Geometric Surface Structure of Shaped Elements Composed of Inconel 718 Alloy. Materials 2021, 14, 7524.
5. A Mehta, Hemakumar S., Patil A., Khandke S.P., Kuppan P., Oyyaravelu R., Balan A.S.S., Influence of sustainable cutting environments on cutting forces, surface roughness and tool wear in turning of Inconel 718, Materials Today: Proceedings 5 (2018) 6746–6754.
6. Thomas A., El-Wahabi M., Cabrera J.M., Prado J.M., High temperature deformation of Inconel 718. Journal of Materials Processing, Technology, 177, 2006, s. 469–472.
7. Pollock T.M., Tin S., Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties. Journal of Propulsion and Power, 22, 2, 2006, s. 361–374.
8. Choudhury I.A., El-Baradie M.A., Machinability of nickel-base super alloys: a general review. Journal of Material Processing Technology, 77, 1998, s. 278–284.
9. Long H., Mao S., Liu Y., Zhang Z., Han X., Microstructural and compositional design of Ni-based single crystalline superalloys – A review. Journal of Alloys and Compounds, 743, 2018, 203–220.
10. Pirowski Z., Uhl W., Wodnicki J., Gwiżdż A., Jaśkowiec K., Wpływ obróbki cieplnej na strukturę stopu typu inconel 740. Prace Instytutu Odlewnictwa, Tom LI, 2, 2011, s. 5–22.

11. PN-ISO 9722:2000 Nikiel i stopy niklu. Skład chemiczny i postacie wyrobów przerobionych plastycznie.
12. Nowotnik A., Kubiak K., Sieniawski J., Rokicki P., Pędrak P., Mrówka-Nawrotnik G., Development of nickel based superalloys for advanced turbine engines. *Materials Science Forum*, 783-786, 2014, s. 2491–2496.
13. Lalvani H.M., Brooks J.W., Hot Forging of IN718 with Solution-Treated and Delta-Containing Initial Microstructures. *Metallography, Microstructure and Analysis*, 5, 5, 2016 s. 392–401.
14. Chandler H. (red.), *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Nonferrous Alloys*. ASM International, 1996, ISBN: 978-0-87170-565-5.
15. Sames W.J., Unocic K.A., Dehoff R.R., Lolla T., Babu S.S., Thermal effects on microstructural heterogeneity of Inconel 718 materials fabricated by electron beam melting. *Journal of Materials Research*, 29.17, 2014, s. 1920–1930.
16. Rezaei M. A., Moosavy H. N., The effect of pre-cold treatment on microstructure, weldability and mechanical properties in laser welding of superalloys, *Journal of Manufacturing Processes* 34, 10.1016/j.jmapro.2018.06.018.
17. *Special Metals, Inconel 718*. Dostęp: 10.12.2019.
18. Firoz R., Basantia S.K., Khutia N., Bar H.N., Sivaprasad S., Murthy G.V.S., Effect of microstructural constituents on mechanical properties and fracture toughness of Inconel 718 with anomalous deformation behavior at 650 °C, *Journal of Alloys and Compounds* 845, (2020), 156276/j.jallcom.2020.156276.
19. Smak K., Szablewski P., Legutko S., Petru J., Kratochvil J., Wencel S., Evaluation of the Influence of the Tool Set Overhang on the Tool Wear and Surface Quality in the Process of Finish Turning of the Inconel 718 Alloy, *Materials* 2024, 10.3390/ma17184465.
20. Sharath Chandra C., Nagachary K., Jayahari L., Hussaini S.M., Characterization of Inconel 718 at sub-zero temperatures, *Mater. Today Proc.* (2020) 2-5/ j.matpr.2020.02.639.
21. A. Lingenfelter, Welding of Inconel alloy 718: A historical overview. In E.A. Loria, editor, *Superalloy 718 - Metallurgy and Applications*, volume 718, pages 673–683. The Minerals, Metals & Materials Society, 1989.
22. H. L. Eiselstein, Personal Communication, Huntington Alloys, 15 December 1987.

23. W. Balicki, Potrzeby i sposoby diagnozowania lotniczych silników turbinowych, Prace Instytutu Lotnictwa 2009/4 (199).
24. M. Bijak-Żochowski, M. Dietrich, T. Kacperski, J. Stupnicki, J. Szala, J. Witkowski, Podstawy Konstrukcji Maszyn, Pod redakcją Marka Dietricha, Tom 2, WNT Warszawa 1995, 1999, ISBN 83-204-2345-7.
25. G.A. Kuzmin, Aircraft Engine Design, 09 June 1967, AD0663929.
26. M. Bischoff, W. A. Wall, K.-U. Bletzinger and E. Ramm, Models and Finite Elements for Thin-Walled Structures, Encyclopedia of Computational Mechanics, Edited by Erwin Stein, Rene de Borst and Thomas J.R. Hughes. Volume 2: Solids and Structures, 2004, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-84699-2.
27. Patyk R., Kułakowska A., Topologiczna Optymalizacja Konstrukcji na Przykładzie Widłaka Wału Przegubowego, Autobusy Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 5/2012, ISSN 1509-5878.
28. https://help.solidworks.com/2019/polish/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm
29. Zieliński D., Optymalizacja topologiczna części lotniczych (2018), str. 1-6, <https://staleo.pl/z-kraju-i-ze-swiata/technologie/3353/optymalizacja-topologiczna-czesci-lotniczych>.
30. Ostwald M., Podstawy wytrzymałości materiałów, Poznań 2003, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, ISBN 83-7143-479-0.
31. Dżygadło Z., Łyżwiński M., Otyś J., Szczeciński S., Wiatrek R., Napędy Lotnicze – Zespoły wirnikowe silników turbinowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.
32. Golinval J.C., Mechanical Design of Turbomachinery, AERO0015-1, University of Liege (Belgium).
33. Kumar S., Rao R., Rajeevalochanam B.A., Current Practices in Structural Analysis and Testing of Aero-Engine Main Shafts, Procedia Engineering 55 (2013) 499 – 509.
34. Designing a Variety of Jet Engine Shafts with Deep Expertise in the Manufacturing Line, IHI Engineering Review Vol. 47 No. 1 2014.
35. Cichosz P., Narzędzia Skrawające, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006, ISBN 83-204-3181-6.

36. Brodowicz W., Skrawanie i Narzędzia, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1995, ISBN 83-02-05862-9.
37. www.sandvik.coromant.com
38. www.iscar.com
39. www.aaa-metals.com
40. Smak K., Szablewski P., Legutko S., Krawczyk B., Miko E., Investigation of the influence of anti-wear coatings on the surface quality and dimensional accuracy during finish turning of the Inconel 718 alloy, *Materials* 2023, 16, 715.
41. Dudzinski D., Devillez A., Moufki A., Larrouquiere D., Verrouki V., Vigneau J., A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 2004, s. 439–456.
42. Avdovic P., Xu L., Andersson M., Stål J-E., Evaluating the Machinability of Inconel 718 Using Polar Diagrams. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133, 7, 2011, s. 072101(1)– 072101(7).
43. Zhou J., Bushlya V., Avdovic P., Stahl J.E., Study of surface quality in high speed turning of Inconel 718 with uncoated and coated CBN tools ,*Int J Adv Manuf Technol* (2012) 58: 141-151, DOI 10.1007/s00170-011-3374-7.
44. Xavior M.A., Manohar M., Patil M.M., Jeyapandiarajan P., Investigation of surface integrity during turning Inconel 718. *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.* 2017, 41, 387–394.
45. Kumar S., Singh D., Kalsi N.S., Experimental investigations of surface roughness of Inconel 718 under different machining conditions. *Mater. Today: Proc.* 2017, 4, 1179–1185.
46. Yazid M.Z.A., Cheharon C.H., Ghani J.A., Ibrahim G.A., Said A.Y.M., Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL. *Procedia Eng.* 2011, 19, 396–401.
47. Sharman A.R.C., Hughes J.I., Ridgway K., Surface Integrity and Tool Life When Turning Inconel 718 Using Ultra-High Pressure and Flood Coolant Systems; IMechE: Charlotte, NC, USA, 2008. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM936>.
48. Arrazola P.-J., Garay A., Fernandez E., Ostolaza K., Correlation between tool flank wear, force signals and surface integrity when turning bars of Inconel 718 in finishing conditions. *Int. J. Mach. Mach. Mater.* 2014, 15, 84, <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2014.059193>.

49. Toubhans B., Fromentin G., Viprey F., Karaouni H., Dorlin T., Machinability of Inconel 718 during turning: Cutting force model considering tool wear, influence on surface integrity. *J. Mater. Process. Technol.* 2020, 285, 116809.
50. Schirra J.J., Metallurgical factors influencing the machinability of Inconel 718. *Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives*, (ed.) E.A. Loria, The Minerals, Metals & Materials Society, 1994, s. 827–838.
51. Grzesik W., *Podstawy skrawania materiałów metalowych*, WNT, Warszawa 1998.
52. Jemielniak K., *Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
53. Taylor F.W., On the art of Cutting Metals, *Amer. Mach.*, vol. 28, 1907.
54. Israelsson J., Carbide technology improves insert performance, *American Mechanist*, 1996, Nr 1.
55. Gawlik J., Prognozowanie stanu zużycia ostrzy narzędzi w procesie skrawania, *Monografia Nr 66*, Politechnika Krakowska, 1988.
56. Jemielniak K., Szafarczyk M., Szewczyk W., Zawistowski J., Zużycie noży tokarskich przy obróbce ze zmiennymi parametrami skrawania, *Mechanik*, 1983, Nr 1.
57. Kuzinovski M., Cichosz P., Żebrowski H., Wpływ parametrów toczenia na zużycie geometryczne ostrzy ceramicznych, VII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Tendencje Rozwojowe w Technologii Maszyn”, Komisja TBN PAN Oddział w Poznaniu, WSI w Zielonej Górze, Zielona Góra, 18-19 września 1992.
58. Szablewski P., Odkształcenie wióra w warstwie wierzchniej w procesie toczenia Inconelu 718. [w:] *Obróbka skrawaniem 1, Wysoka produktywność*, red. P. Cichosz, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2007, s. 280–287.
59. D’Addona D.M., Raykar Sunil J., Narke M.M., High speed machining of Inconel 718: Tool wear and surface roughness analysis. *Procedia CIRP* 2017, 62, 269–274.
60. Ezugwu E.O., Tang S.H., Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools. *J. Mater. Process. Technol.* 1995, 55, 63–69.

61. Coelho R.T., Silva L.R., Braghini A., Bezerra A.A., Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when turning Inconel 718 at high cutting speeds. *J. Mater. Process. Technol.* 2004, 148, 147–153.
62. Zeilmann R. P., Fontanive F., Soares R. M., Wear mechanisms during dry and wet turning of Inconel 718 with ceramic tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 2017, s. 2705–2714.
63. Cantero J.L., Diaz-Alvarez J., Infante-Garcia D., Rodriguez M., Criado V., High Speed Finish Turning of Inconel 718 Using PCBN Tools under Dry Conditions. *Metals* 2018, 8, 192; doi:10.3390/met8030192.
64. Costes J.P., Guillet Y., Poulachon G., Dessoly M., Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2007, 47, 1081–1087. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.031>.
65. www.ntkcuttingtools.com
66. Szablewski P., Skrawalność stopu Inconel 718 w procesie toczenia. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska 2009, promotor: M. Kawalec.
67. Devillez A., Schneider F., Dominiak S., Dudzinski D., Larrouquere D., Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. *Wear* 2007, 262, 931–942. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.10.009>.
68. Zębala W., Słodki B., Struzikiewicz G., Productivity and reliability improvement in turning Inconel 718 alloy – case study. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 15, 4, 2013, s. 421–426.
69. Degen F., Klocke F., Bergs T., Presentation of a novel “Simultaneous Three Axis Turning” process for time and cost efficient machining of rotational symmetric turbomachinery components. *Procedia CIRP* 24 (2014) 32 – 37.
70. www.mastercam.com
71. Szablewski P., Evaluation of the topography and load capacity of cylindrical surfaces shaped in the process of finish turning of the Inconel 718 alloy. *Measurement* 2023, 223, 113749.
72. Khan S.A., Soo S.L., Aspinwall D.K., Sage C., Harden P., Fleming M., White A., M'Saoubi R., Tool wear/life evaluation when finish turning Inconel 718 using PCBN tooling. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, *Procedia CIRP*, 2012, s. 283–288.

73. Soo S.L., Khan S.A., Aspinwall D.K., Harden P., Mantle A. L., Kappmeyer G., Pearson D., M'Saoubi R., High speed turning of Inconel 718 using PVD-coated PCBN tools. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65, 2016, s. 89–92.
74. Jakubiec W., Malinowski J., *Metrologia wielkości geometrycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, ISBN: 978-83-204-3326-5, 2004.
75. Yao C., Zhou Z., Zhang J., Wu D., Tan L., Experimental study on cutting force of face-turning Inconel 718 with ceramic tools and carbide tools, *Advances in Mechanical Engineering* (2017) Vol. 9 (7) 1–9.
76. Fang N., Srinivasa Pai P., Mosquea S., Effect of tool edge wear on the cutting forces and vibrations in high-speed finish machining of Inconel 718: an experimental study and wavelet transform analysis, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2011) 52:65-77.
77. Shailesh Rao A., Effect of nose radius on the chip morphology, cutting force and tool wear during dry turning of Inconel 718, *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces* (2023) 17:1, 62-71.
78. Zhuang K., Fu C. Weng J. Hu C., Cutting edge microgeometries in metal cutting: a review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2021) 116:2045–2092.
79. Zhuang K., Huang Y., Hu C., Wang J., Zou L., An improved approach to tool life promotion concerning cutting edge microgeometry, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2023) 126:1717–1731.
80. Niesłony P., Krolczyk G.M., Wojciechowski S., Chudy R., Zak K., Maruda R.W., Surface quality and topographic inspection of variable compliance part after precise turning. *Applied Surface Science*, 434, 91-101 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.158>.
81. Pawade R.S., Joshi Suhas S., Brahmanekar P.K., Rahman M., An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 (2007) 139-146.
82. Thakur D. G., Ramamoorthy B., Vijayaraghavan L., Some Investigations on High Speed Dry Machining of Aerospace Material Inconel 718 Using Multicoated Carbide Inserts, *Materials and Manufacturing Processes*, 27: 1066–1072, 2012.

83. Ramanujam R., Venkatesan K., Saxena Vimal, Joseph Philip, Modeling and Optimization of Cutting Parameters in Dry Turning of Inconel 718 using Coated Carbide Inserts, *Procedia Materials Science* 5 (2014) 2550-2559.
84. Ezugwu E.O., Bonney J., Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools, *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 (2004) 1045–1050.
85. Lotfi M., Jahanbakhsh M., Akhawan Farid A., Wear estimation of ceramic and coated carbide tools in turning of Inconel 625: 3D FE analysis ,*Tribology International* 99 (2016) 107-116.
86. Sivalingam V., Zhao Y., Thulasiram R., Sun J., Kai G., Nagamalai T., Machining Behaviour, surface integrity and tool wear analysis in environment friendly turning of Inconel 718 alloy, *Measurement* 174 (2021) 109028.
87. Chaabani S., Arrazola P.J., Ayed Y., Madariaga A., Tidu A., Germain G., Comparison between cryogenic coolants effect on tool wear and surface integrity in finish turning of Inconel 718 ,*Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, 2020, 285, pp.116780.
88. Peng Z., Zhang X., Zhang D., Performance evaluation of high-speed ultrasonic vibration cutting for improving machinability of Inconel 718 with coated carbide tools, *Tribology International* 155 (2021) 106766.
89. Rubaiee S., Danish M., Gupta M.K., Ahmed A., Yahya S.M., Yildirim M.B., Sarikaya M., Korkmaz M.E., Key initiatives to improve the machining characteristics of Inconel – 718 alloy; Experimental analysis and optimization, *Journal of Materials Research and Technology* 2022; 21: 2704 – 2720.
90. Yıldırım Ç. V., Sarıkaya M., Kıvak T., Şirin Ş., The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625, *Tribology International* 134 (2019) 443–456.
91. Grzesik W., Niesłony P., Habrat W., Sieniawski J., Laskowski P., Investigation of tool wear in the turning of Inconel 718 superalloy in terms of process performance and productivity enhancement, *Tribology International* 118 (2018) 337-346.
92. Khanna N., Agrawal C., Dogra M., Pruncu C.I., Evaluation of tool wear, energy consumption and surface roughness during turning of Inconel 718 using sustainable machining technique, *J Mater Res Technol.* 2020;9(3):5794-5804.

93. Khanna N., Airao J., Nirala C. K., Krolczyk G. M., Novel sustainable cryo-lubrication strategies for reducing tool wear during ultrasonic-assisted turning of Inconel 718, *Tribology International* 174 (2022) 107728.
94. Jeyapandiarai P., Xavier A.M., Influence of cutting condition on machinability aspects of Inconel 718: Review paper, *Journal of Engg. Research* Vol. 7 No. (2) June 2019 pp. 315-332.
95. Bhatt A., Attia H., Vargas R., Thomson V., Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718, *Tribology International* (2010) 1113 – 1121.
96. Zhao J., Liu Z., Wang B., Song Q., Ren X., Wan Y., Effects of Al content in TiAlN coatings on tool wear and cutting temperature during dry machining IN718, *Tribology International* 171 (2022) 107540.
97. Zhang B., Njora M. J., Sato Y., High-speed turning of Inconel 718 by using TiAlN- and (Al, Ti) N-coated carbide tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018) 96:2141–2147.
98. Hao Z. P., Fan Y., Lin J., Yu Z., Wear characteristics and wear control method of PVD-coated carbide tool in turning Inconel 718, *Int J Adv Manuf Technol* (2015) 78:1329–1336.
99. Khochtali H., Ayed Y., Zemzemi F., Bensalem W., Tool wear characteristics in rough turning of Inconel 718 with coated carbide tool under conventional and high-pressure coolant supplies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2021) 114:2371–2386.
100. Ezugwu E. O., Bonney J., Finish Machining of Nickel-Base Inconel 718 Alloy with Coated Carbide Tool under Conventional and High-Pressure Coolant Supplies, *Tribology Transactions*, 48:1, 76-81, 2005.
101. Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M., Functional Importance of Surface Texture Parameters, *Materials* 2021, 14, 5326.
102. Hua Y., Liu Z., Effects of cutting parameters and tool nose radius on surface roughness and work hardening during dry turning Inconel 718, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018) 96:2421–2430, DOI: 10.1007/s00170-018-1721-7.
103. Jafarian F., Umbrello D., Golpayegani S. and Darake Z., (2016) Experimental Investigation to Optimize Tool Life and Surface Roughness in Inconel 718

- Machining, Materials and Manufacturing Processes, 31:13, 1683-1691, DOI: 10.1080/10426914.2015.1090592.
104. Peng Z., Zhang X., Zhang D., Integration of finishing and surface treatment of Inconel 718 alloy using high-speed ultrasonic vibration cutting, *Surface & Coatings Technology* 413 (2021) 127088.
 105. Szablewski P., Dobrowolski T., Kieruj P., Study of effect of the cutting depth on surface roughness of Inconel 718 alloy during finish turning, *RUTMech*, t. XXXIV, z. 89 (4/17), październik-grudzień 2017, s. 547-554.
 106. Deshpande Y., Andhare A., Kumar Sahu N., Estimation of surface roughness using cutting parameters, force, sound and vibration in turning of Inconel 718 , *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* (2017) 39:5087-5096.
 107. Cakiroglu R., Machinability Analysis of Inconel 718 Superalloy with AlTiN-Coated Carbide Tool Under Different Cutting Environments, *Arabian Journal for Science and Engineering* (2021), [https:// doi.org/10.1007/s13369-021-05626-3](https://doi.org/10.1007/s13369-021-05626-3).
 108. Starzyński G., Warstwa wierzchnia i jej modelowanie, (2002) IPPT PAN, 265154585.
 109. PN-EN ISO 25178:2018 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS).
 110. Bushlya V., Zhou J.M., Lenrick F., Avdovic P., Stahl J-E., Characterization of White Layer generated when turning aged Inconel 718, *Procedia Engineering* 19 (2011) 60-66.
 111. Grzesik W., Kowalczyk D., Zak K., A new mechanistic friction model for oblique cutting with tool wear effect. *Tribol Int* 2013;66:49–53.
 112. Zahoor S., Abdul-Kader W., Ishfaq K., Sustainability assessment of cutting fluids for flooded approach through a comparative surface integrity evaluation of Inconel 718, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2020) 111:383-395.
 113. Marques A., Guimarães C., Batista da Silva R., Cindra Fonseca M. d P., Falco Sales W., Rocha Machado Á., Surface Integrity Analysis of Inconel 718 after Turning with Different Solid Lubricants Dispersed in Neat Oil Delivered by MQL, *Procedia Manufacturing*, Vol. 5, 2016, Pages 609-620.
 114. Grzesik W., Podstawy Skrawania Materiałów Konstrukcyjnych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2017, ISBN 978-83-01-19919-7.

115. Zhao J., Liu Z., Influences of coating thickness on cutting temperature for dry hard turning Inconel 718 with PVD TiAlN coated carbide tools in initial tool wear stage, *Journal of Manufacturing Processes* 56 (2020) 1155-1165, 10.1016/j.jmapro.2020.06.010.
116. Yilmaz B., Karabulut S., Gullu A., Performance analysis of new external chip breaker for efficient machining of Inconel 718 and optimization of the cutting parameters, *Journal of Manufacturing Processes* 32 (2018) 553-563.
117. Yin Q., Liu Z., Wang B., Machinability improvement of Inconel 718 through mechanochemical and heat transfer effects of coated surface-active thermal conductive mediums, *Journal of Alloys and Compounds* 876 (2021) 160186.
118. Diaz-Alvarez J., Tapetado A., Vazquez C., Miguelez H., Temperature Measurement and Numerical Prediction in Machining Inconel 718, *Sensors* 2017, 17, 1531; doi:10.3390/s17071531.
119. Dai X., Zhuang K., Ding H., A systemic investigation of tool edge geometries and cutting parameters on cutting forces in turning of Inconel 718, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2019) 105:531–543.
120. Rybicki M., Szablewski P., Investigation of chips morphology after turning of materials applied in aerospace industry, *MATEC Web of Conferences* 121, 03020 (2017).
121. Konecki W., *Statystyka dla inżynierów*, PWN, Warszawa 1999.
122. PN-ISO 3685 (PN-83/M-58350) Badanie trwałości noży tokarskich punktowych.
123. Pawlus P., Reizer R., Zelasko W., Prediction of parameters of equivalent sum rough surfaces, *Materials* 2020, 13, 4898.
124. Jemielniak K., Mechanizm zużycia ostrza z PcBN podczas obróbki stopu Inconel 718, *Mechanik* nr 05/06/2022 – Z działalności CIRP.
125. Maruda R.W., Krolczyk G.M., Niesłony P., Krolczyk J.B., Legutko S., Chip formation zone analysis during the turning of austenitic stainless steel 316L under MQCL cooling condition, *Procedia Engineering* 149 (2016) 297-304.
126. www.walter-tools.com
127. Tomaszewski Ł., Urbanowicz A., Suszko T., Gulbiński W., TiAlN wear resistant coatings modified by vanadium addition, *Inżynieria Materiałowa* 5 (207) (2015) 310÷313. DOI 10.15199/28.2015.5.23

128. Szablewski P., Legutko S., Mróz A., Garbiec D., Czajka R., Smak K., Krawczyk B., Surface Topography Description after Turning Inconel 718 with a Conventional, Wiper and Special Insert Made by the SPS Technique. *Materials* 2023, 16, 949. <https://doi.org/10.3390/ma16030949>