



**POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY**

**KATEDRA TECHNOLOGII
MASZYN
I AUTOMATYZACJI
PRODUKCJI**

mgr inż. Piotr KISZKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

**BADANIE MECHANICZNYCH I TERMICZNYCH
ODDZIAŁYWAŃ W SKRAWANIU ŹELIWA
SFEROIDALNEGO OSTRZAMI Z CERAMIKI
AZOTKOWEJ I CBN**

Promotorzy:
prof. dr hab. inż. **Wit GRZESIK**
prof. D.Sc. **Jöel RECH**

Słowa kluczowe: obróbka wiórowa, żeliwo sferoidalne, zaawansowane materiały narzędziowe

OPOLE 2013

SPIS TREŚCI

1.	WSTĘP	6
2.	ANALIZA ZAGADNIENIA	8
2.1.	<i>PRZEGLĄD LITERATURY</i>	8
2.2.	<i>MECHANICZNE I TERMICZNE ODDZIAŁYWANIA W PROCESIE SKRAWANIA</i>	15
2.2.1.	Siły w procesie skrawania.....	15
2.2.2.	Opór właściwy skrawania.....	17
2.2.3.	Ciepło w procesie skrawania	17
2.2.4.	Temperatura w procesie skrawania.....	19
2.3.	<i>ŻELIWO NIESTOPOWE</i>	20
2.3.1.	Klasyfikacja żeliw niestopowych	20
2.3.2.	Żeliwo sferoidalne	21
2.3.3.	Skrawalność żeliw	24
2.3.4.	Zastosowanie żeliw	27
2.4.	<i>MATERIAŁY NARZĘDZIOWE</i>	30
2.4.1.	Dobór materiału narzędziowego	31
2.4.2.	Ceramika narzędziowa.....	32
2.4.3.	CBN (PCBN) jako materiał supertwardy	35
2.5.	<i>PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 2</i>	37
3.	CEL I ZAKRES PRACY	38
3.1.	<i>ELEMENT NOWOŚCI W PRACY</i>	38
3.2.	<i>TEZA NAUKOWA PRACY</i>	38
3.3.	<i>CEL PRACY</i>	38
3.4.	<i>ZAKRES PRACY</i>	39
4.	METODYKA BADAŃ PROCESU SKRAWANIA	40
4.1.	<i>STANOWISKA BADAWCZE I URZĄDZENIA POMIAROWE</i>	40
4.1.1.	Stanowisko do prób toczenia	40
4.1.2.	Pomiar składowych sił skrawania.....	41
4.1.3.	Pomiar rozkładu temperatury w strefie skrawania	42
4.1.4.	Stanowisko do prób toczenia ortogonalnego.....	45

4.1.5.	Stanowisko do pomiaru długości styku i pola kontaktu	46
4.1.6.	Pomiar chropowatości 2D i 3D.....	47
4.1.7.	Stanowisko do pomiaru twardości.....	48
4.2.	<i>CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁU OBRABIANEGO</i>	50
4.3.	<i>CHARAKTERYSTYKA NARZĘDZI UŻYTYCH W EKSPERYMENCIE</i>	51
4.4.	<i>WARUNKI BADAŃ</i>	54
4.5.	<i>ALGORYTM OBLICZEŃ</i>	55
5.	OPRACOWANIE I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ	57
5.1.	<i>MECHANICZNE ODDZIAŁYWANIA W PROCESIE SKRAWANIA</i>	57
5.1.1.	Składowa F_c całkowitej siły skrawania.....	57
5.1.2.	Składowa F_f całkowitej siły skrawania.....	59
5.1.3.	Opór właściwy skrawania – energia właściwa skrawania	61
5.1.4.	Długość styku wiór - ostrze	64
5.1.5.	Mechaniczne obciążenie styku	65
5.1.6.	Wióry w procesie skrawania.....	67
5.2.	<i>TERMICZNE ODDZIAŁYWANIA W PROCESIE SKRAWANIA</i>	69
5.2.1.	Średnia temperatura kontaktowa	69
5.2.2.	Maksymalna temperatura kontaktowa	70
5.2.3.	Liczba Pecleta	72
5.2.4.	Rozkład temperatury w strefie skrawania.....	74
5.3.	<i>TRIBOLOGICZNE ODDZIAŁYWANIA W PROCESIE SKRAWANIA</i>	77
5.3.1.	Siła tarcia	77
5.3.2.	Współczynnik tarcia	79
5.3.3.	Naprężenia kontaktowe w strefie wiór - ostrze	80
5.4.	<i>PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ DOTYCZĄCYCH PROCESU SKRAWANIA</i>	84
5.5.	<i>STAN GEOMETRYCZNY POWIERZCHNI OBROBIONEJ</i>	86
5.5.1.	Wpływ prędkości skrawania i posuwu na parametr chropowatości R_a	86
5.5.2.	Wpływ prędkości skrawania i posuwu na parametr chropowatości R_z	88
5.5.3.	Wpływ prędkości skrawania i posuwu na odstęp nierówności R_{Sm}	89
5.5.4.	Wpływ prędkości skrawania i posuwu na pochylenie profilu $R_{\Delta q}$	91
5.5.5.	Wpływ prędkości skrawania i posuwu na współczynnik skośności profilu R_{sk}	92
5.5.6.	Wpływ prędkości skrawania i posuwu na nachylenie profilu R_{ku}	94

5.5.7. Krzywa nośności oraz opis wysokości za pomocą linearyzacji krzywej udziału materiałowego	95
5.5.8. Obraz topografii powierzchni	100
5.5.9. Obraz rzeczywistej powierzchni	102
5.6. <i>PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 5.5</i>	103
6. WNIOSKI KOŃCOWE	104
7. LITERATURA	106
8. ZAŁĄCZNIKI	111
8.1. <i>ZAŁĄCZNIK A – MAPY ROZKŁADU TEMPERATURY</i>	111
8.2. <i>ZAŁĄCZNIK B – TABELĘ WYNIKÓW</i>	122

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A_k	– pole strefy styku wiór – ostrze
a_p	– głębokość skrawania
e_c	– energia właściwa skrawania
F_c	– siła skrawania
F_f	– siła posuwowa
F_γ	– siła równoległa (tarcia) do powierzchni natarcia
$F_{\gamma N}$	– siła normalna do powierzchni natarcia
f	– posuw
k_c	– opór właściwy skrawania
k_F	– mechaniczne obciążenie styku
l_{nc}	– długość styku wiór-powierzchnia natarcia
P_e	– liczba Pecleta
r_n	– promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej
R_a	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości
R_{ku}	– współczynnik nachylenia profilu
R_{sk}	– współczynnik asymetrii profilu
R_{Sm}	– średnia szerokość rowków elementów profilu
R_z	– największa wysokość profilu
$R_{\Delta q}$	– średni kwadratowy wznios profilu
v_c	– prędkość skrawania
γ_o	– kąt natarcia główny (ortogonalny)
κ_r	– kąt przystawienia
λ_s	– kąt pochylenia krawędzi skrawającej
Θ	– kąt tarcia
μ	– współczynnik tarcia
σ_k	– naprężenie normalne w strefie styku wiór – ostrze
τ_k	– naprężenie styczne w strefie styku wiór – ostrze

1. WSTĘP

Obróbka skrawaniem jest znaczącą częścią procesu wytwarzania elementów maszyn, gdzie obrabiany przedmiot osiąga wymagany kształt, jakość powierzchni, wymiary oraz określone właściwości warstwy wierzchniej. Przeważająca rola tej metody w przemyśle maszynowym sprawia, że intensyfikacja tego procesu przy zachowaniu dobrej jakości produktów umożliwia uzyskanie znaczących korzyści ekonomicznych. Według prognoz rola obróbki skrawaniem nie ulega marginalizacji, ale zdaje się wzmacniać i rozwijać [6, 14].

Wskutek zapotrzebowania rynku powstało wiele firm zajmujących się produkcją oraz wdrażaniem nowych materiałów narzędziowych. Duża konkurencja sprawiła, iż światowi liderzy w produkcji narzędzi skrawających wykonują liczne badania doświadczalne w celu poprawy jakości swoich produktów. Postęp techniki doprowadził do rozwoju zaawansowanych materiałów narzędziowych, które pozwalają obniżyć koszty produkcji i zredukować czas pracy. Dodatkowo w produkcji narzędzi skrawających stosuje się techniki pokrywania ostrzy powłokami ochronnymi, które mają na celu poprawę właściwości mechanicznych, termofizycznych i tribologicznych materiału narzędzia.

W ostatnich latach zauważalna jest bardzo duża popularność żeliwa w różnych gałęziach przemysłu. Szerokie zastosowanie zawdzięcza korzystnym właściwościom odlewniczym i technologicznym. Do dalszych cennych właściwości żeliwa należy dobra wytrzymałość, niska ścieralność oraz zdolność tłumienia drgań. Kolejnym bardzo ważnym atutem są niskie koszty jego wytwarzania w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi.

Z punktu widzenia technologicznego bardzo istotnym aspektem w obróbce żeliwa jest optymalizacja procesu skrawania w celu zmniejszenia kosztów wynikających z obróbki mechanicznej. Dlatego celowe jest przeprowadzenie badań skrawalności różnych gatunków żeliwa.

W niniejszej pracy autor podjął próbę analizy badań własnych procesu skrawania żeliwa sferoidalnego ostrzami z ceramiki azotkowej i CBN dla zmiennych warunków skrawania. Istotą badań doświadczalnych było określenie wpływu parametrów skrawania i rodzaju materiału ostrza narzędzia skrawającego na przebieg procesu skrawania żeliwa sferoidalnego.

Zakres pracy rozszerzono również o pomiary i analizę wyników badań chropowatości powierzchni uzyskanych po obróbce dokładnej żeliwa sferoidalnego.

Podstawowe badania eksperymentalne przeprowadzono w Laboratorium Trybologii i Dynamiki Systemów (LTDS) należącym do Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne (ENISE) w roku 2011.



Prace badawcze pomiaru chropowatości powierzchni 2D i 3D zrealizowano w Katedrze Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Opolskiej w latach 2012/2013 w ramach projektu *Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadrę naukową województwa opolskiego* współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

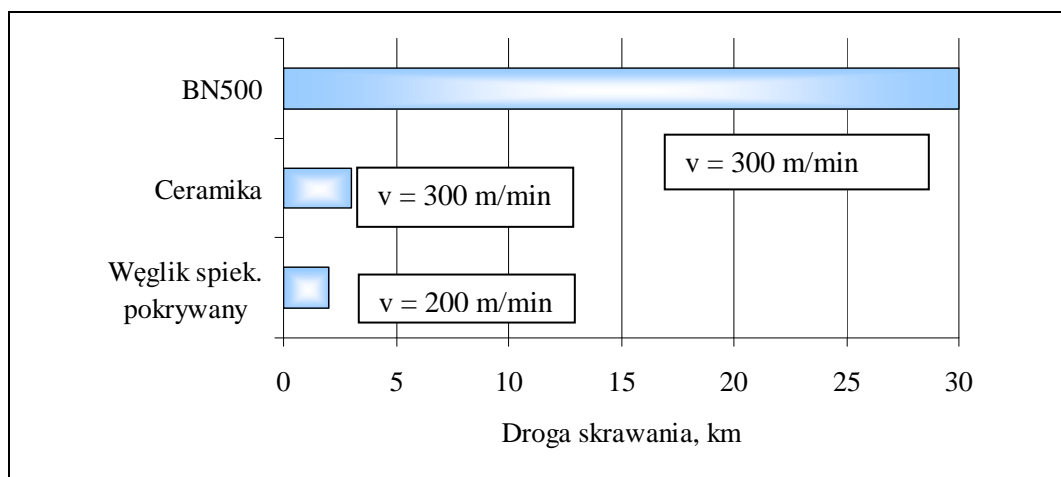


2. ANALIZA ZAGADNIENIA

2.1. PRZEGLĄD LITERATURY

Wydajność i koszty produkcji są bardzo ważnym aspektem na arenie międzynarodowej konkurencji. Wiele zakładów zajmujących się obróbką żeliwa zleca badania nad tym materiałem lub same prowadzą badania laboratoryjne [52]. Z tego powodu w fachowej literaturze technicznej znajduje się wiele informacji opisujących problemy wynikające z obróbki żeliwa, jak i sposoby ich rozwiązywania.

W pracy [57] przedstawiono wyniki badań trwałości ostrza uzyskane po obróbce żeliwa sferoidalnego (EN-GJS-450-10) przy zastosowaniu różnych materiałów narzędziowych. Na podstawie przeprowadzonych testów stwierdzono, że ostrze z CBN uzyskało najdłuższą drogę skrawania (ok. 30 km). W porównaniu z ostrzem z ceramiki jest to ok. 10-krotnie lepszy wynik. W przypadku użycia powlekanego węgliku spiekanego otrzymano najkrótszą drogę skrawania (ok. 2 km), ale należy dodać, że skrawano z prędkością o 100 m/min mniejszą w porównaniu z ostrzami z CBN i ceramiki. Autorzy pracy wskazują, że najbardziej wydajny i ekonomiczny w obróbce żeliwa EN-GJS (rys. 2.1) jest materiał narzędziowy wykonany z CBN [57].

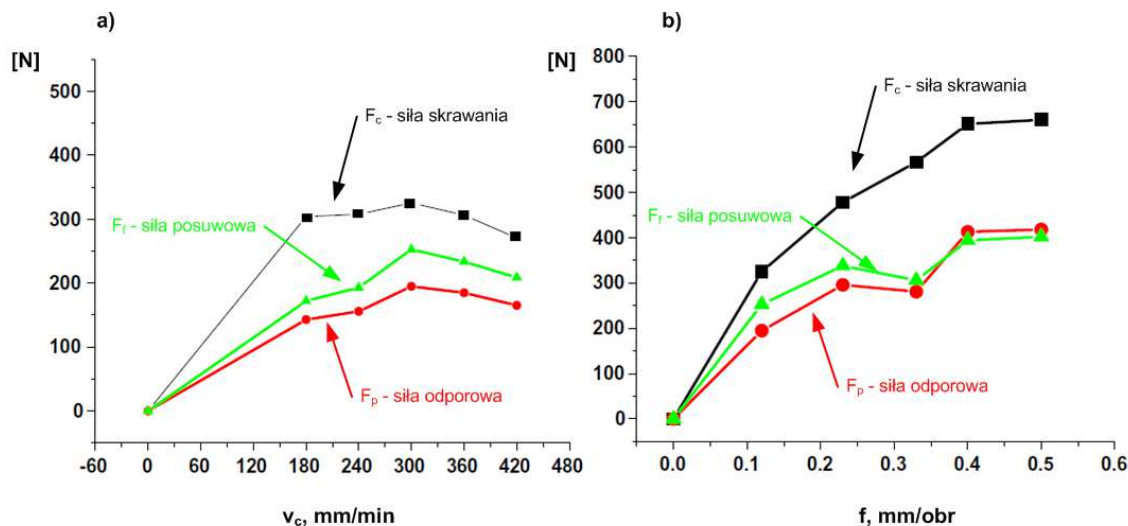


Rys. 2.1. Porównanie trwałości ostrzy [57]

W publikacji [55] autorzy przedstawili wyniki badań procesu skrawania żeliwa sferoidalnego ostrzem ceramicznym Si_3N_4 . W badaniach przyjęto następujące parametry skrawania:

- posuw $f=0,12; 0,23; 0,33; 0,40; 0,50$ mm/obr,
- głębokość toczenia $a_p=1$ mm,
- prędkość skrawania $v_c= 180, 240, 300, 360, 420$ m/min.

Na podstawie rys. 2.2a można stwierdzić, że wartość siły skrawania F_c zmienia się od ok. 300 N do ok. 270 N w badanym zakresie prędkości. W przypadku siły posuwowej F_f następuje wzrost wartości tej siły aż do ok. 250 N ($v_c=300$ m/min), a następnie spadek do ok. 200 N, gdy skrawano z prędkością $v_c=420$ m/min.

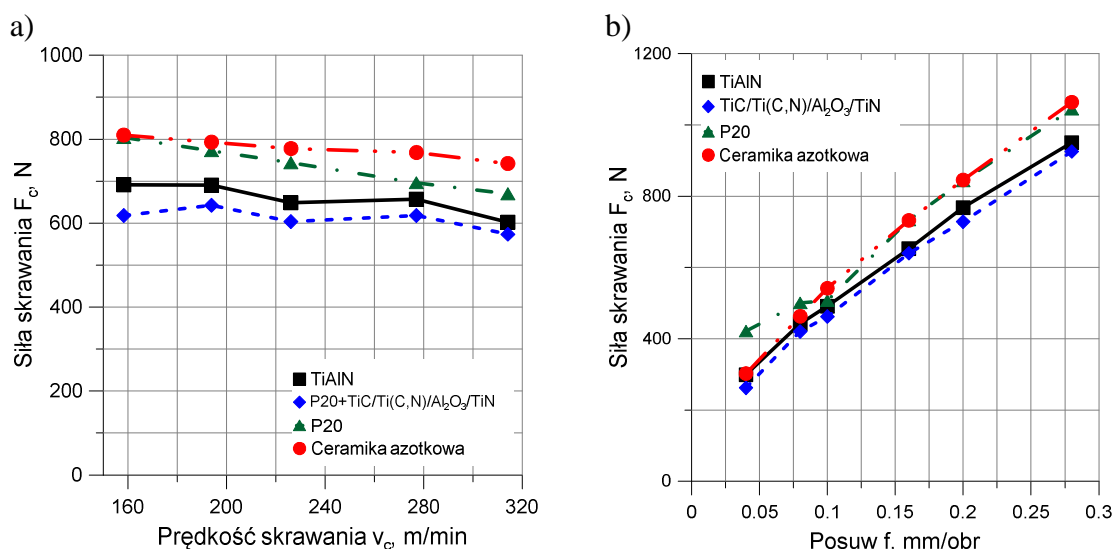


Rys. 2.2. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na średnią wartość sił [55]

Największe różnice między wartościami siły F_c i F_f uzyskano w zakresie prędkości $v_c=180\div 240$ m/min. Różnica ta wynosiła ok. 150 N. Wpływ posuwu (rys. 2.2b) na przebieg wartości składowych sił skrawania badano ze stałą prędkością skrawania $v_c=300$ m/min. Wraz ze wzrostem posuwu nastąpił wyraźny wzrost wartości składowych sił skrawania (F_c , F_f , F_p). Cechą charakterystyczną, w badanym zakresie posuwu, są zbliżone wartości siły odporowej i posuwowej. Podsumowując, można stwierdzić, że parametry skrawania wyraźnie wpływają na przebieg składowych sił skrawania.

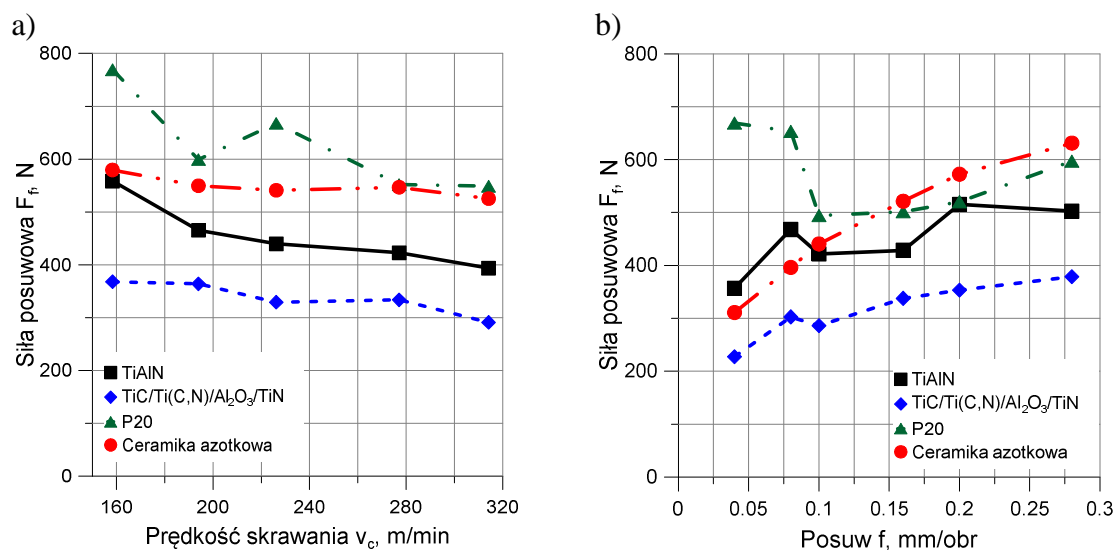
W fachowej literaturze [15, 12] autorzy przeprowadzili badania, które były skoncentrowane na problemach mechanicznych i termicznych w odniesieniu do skrawania żeliwa sferoidalnego (EN-GJS) ostrzami z węglików spiekanych pokrywanymi jednowarstwowo TiAlN i wielowarstwowo TiC/Ti(C,N)/Al₂O₃/TiN oraz ceramiki azotkowej Si₃N₄. Przebieg procesu oceniono na podstawie klasycznych charakterystyk takich jak: składowe siły skrawania oraz średnia temperatura kontaktowa. W ramach badań doświadczalnych przeprowadzono dwie serie prób toczenia, jedną ze zmienną prędkością skrawania $v_c=160\div 320$ m/min i drugą ze zmiennym posuwem $f=0,04\div 0,28$ mm/obr. Na rys. 2.3 przedstawiono wpływ prędkości skrawania (rys. 2.3a) i posuwu (rys. 2.3b) na zmiany wartości siły skrawania F_c .

Jak wynika z rys. 2.3a większe wartości siły skrawania zarejestrowano dla ostrza z ceramiki azotkowej, dla którego siła F_c zmniejsza się nieznacznie od ok. 810 N do 740 N przy skrawaniu z prędkością od 160 do 320 m/min. Stwierdzono, że najniższe wartości siły skrawania F_c uzyskano skrawając ostrzem węglkowym z pokryciem wielowarstwowym [15]. Różnice w wartościach siły skrawania (F_c) zmierzone dla ceramiki azotkowej i ostrza pokrytego wielowarstwowo wyniosły ok. 20%.



Rys. 2.3. Wpływ prędkości skrawania (a) i posuwu (b) na średnią wartość siły F_c [15]

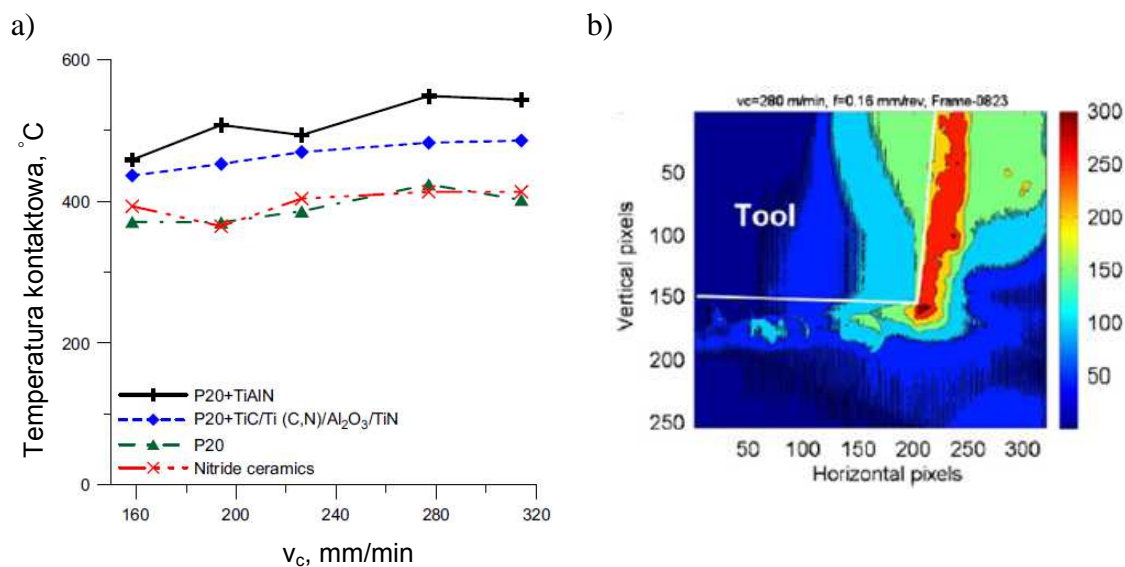
Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem posuwu wyraźnie rosną wartości siły F_c (rys. 2.3b) dla wszystkich badanych ostrzy narzędzi skrawających. W przypadku zastosowania ostrza z ceramiki azotkowej wartość siły F_c zwiększa się od 300 N ($f=0,04$ mm/obr) do 1060 N dla największego posuwu $f=0,28$ mm/obr. Wpływ prędkości skrawania na przebieg zmian siły posuwowej przedstawiono na rys. 2.4a, przy czym trend ten jest podobny do przebiegu przedstawionego na rys. 2.3a.



Rys. 2.4. Wpływ prędkości skrawania (a) i posuwu (b) na średnią wartość siły F_f [15]

Stwierdzono również, że dla ostrza z ceramiki azotkowej wartości siły F_f są mniejsze o ok. 200 N w porównaniu z wartościami siły F_c . Wraz ze wzrostem posuwu rośnie również siła F_f (rys. 2.4b) od 310 N do 630 N dla ostrza z Si_3N_4 . Uzyskane wyniki badań ewidentnie wskazują, że materiał ostrza narzędzia skrawającego wpływa na wartości zmierzonych składowych sił skrawania (F_c , F_f).

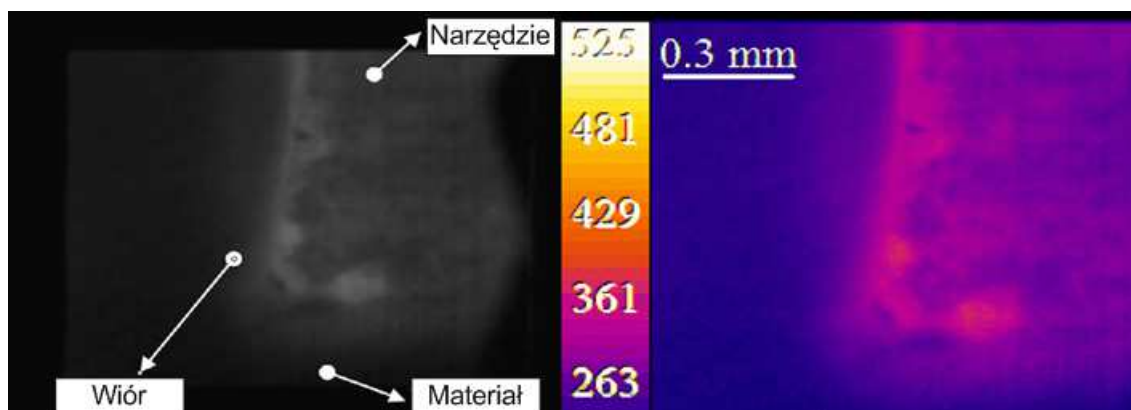
Na rys. 2.5a przedstawiono wpływ prędkości skrawania na średnią temperaturę kontaktową. Autorzy zaobserwowali, że średnia temperatura kontaktowa waha się w przedziale od ok. 370°C do ok. 550°C w badanym zakresie prędkości [12]. Najwyższe wartości temperatury zarejestrowano dla węgla P20 z powłoką TiAlN. W przypadku, gdy skrawano ostrzem z ceramiki azotkowej, nastąpił wzrost wartości średniej temperatury od ok. 370°C do 400°C . Pomiar temperatury kontaktowej wykonano za pomocą kamery termowizyjnej IR. Gotową mapę rozkładu temperatury przedstawiono na rys. 2.5b. Na otrzymanym obrazie z kamery IR naniesiono zarys narzędzia z ceramiki azotkowej.



Rys. 2.5. Wpływ prędkości na średnią temperaturę kontaktową (a) oraz mapa rozkładu temperatury (b) [12]

Technika wykorzystująca zjawisko promieniowania podczerwonego jest prawdopodobnie drugą najczęściej używaną metodą pomiaru temperatury w procesie skrawania. W technice tej temperatura powierzchni obiektu badanego mierzona jest za pomocą rejestracji emitowanej energii cieplnej badanego obiektu. W pracy [7] wykorzystano system kamer na podczerwień oraz termopar do pomiaru rozkładu temperatury (rys. 2.6) podczas obróbki stali hartowanej. Na podstawie

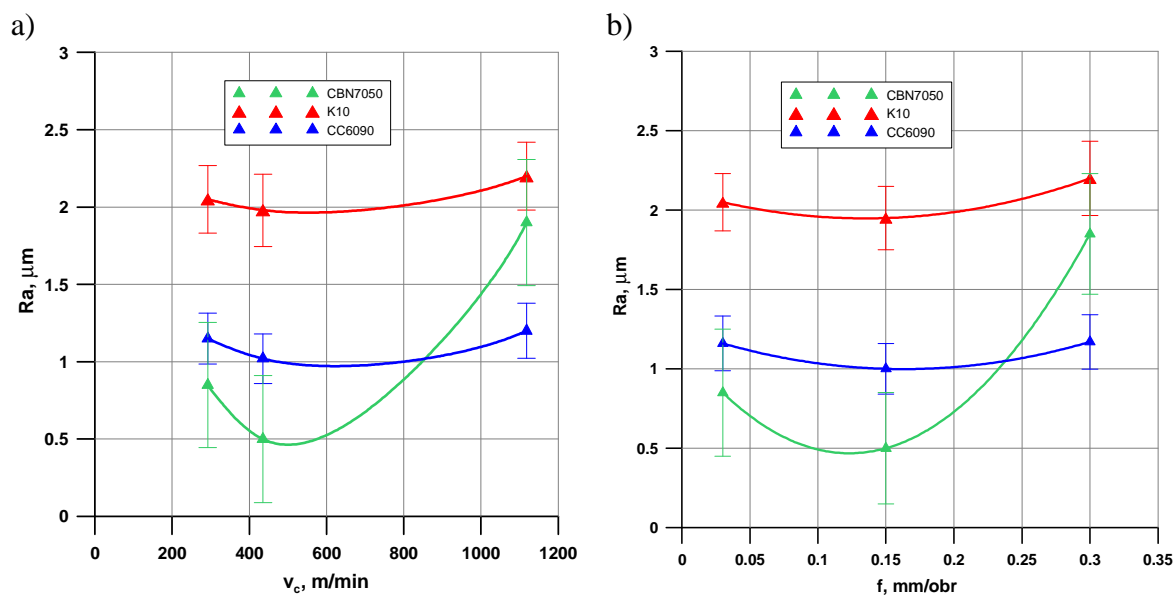
przeprowadzonych badań stwierdzono, że pomiary techniką IR dają niższe wartości temperatury w porównaniu z wynikami otrzymanymi za pomocą termopar [7].



Rys. 2.6. Obraz zarejestrowany za pomocą kamery IR podczas skrawania ortogonalnego Al 7075 [7]

Ciągle jeszcze aspekt pomiarów temperatury w strefie skrawania oraz ich opracowanie i interpretacja wyników badań sprawiają naukowcom wiele trudności. Postęp technik pomiarowych oraz możliwości ich implementacji do procesu obróbki pozwalają mieć nadzieję na rozwiązanie tych problemów w najbliższej przyszłości [41].

Oprócz analizy charakterystyk mechanicznych i termicznych procesu skrawania żeliwa bardzo istotne są również informacje na temat właściwości warstwy wierzchniej elementów wykonanych z tego materiału. W pracy [11] autorzy przedstawili wyniki chropowatości powierzchni (na podstawie analizy parametru Ra) uzyskane po toczeniu żeliwa EN-GJL-2300 ostrzami z regularnego azotku boru CBN7050, ceramiki azotkowej CC6090 oraz węgliku spiekanego K10. Na rys. 2.7a i 2.7b przedstawiono zmiany parametru chropowatości Ra w zależności od zastosowanej prędkości skrawania i posuwu. Na podstawie analizy wyników badań powierzchni obrobionej stwierdzono, że najmniejszą wartość parametru chropowatości powierzchni Ra uzyskano, gdy skrawano ostrzem z CBN przy prędkościach mniejszych niż $v_c=800$ m/min. Natomiast w przypadku używania ostrza z węgliku spiekanego uzyskano największe wartości parametru Ra w porównaniu z CBN, gdyż otrzymano 4 razy większe wartości Ra. Oprócz pomiarów chropowatości powierzchni autorzy pracy zbadali również mikrotwardość warstwy wierzchniej. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że utwardzenie WW sięga do głębokości 200 μm , jednak mikrotwardość jest dość zróżnicowana i nie stwierdzono jednoznacznie przewagi któregośkolwiek materiału narzędziowego [11]. Jak wynika z przeprowadzonych badań wartość parametru Ra zależy głównie od zastosowanego materiału ostrza.



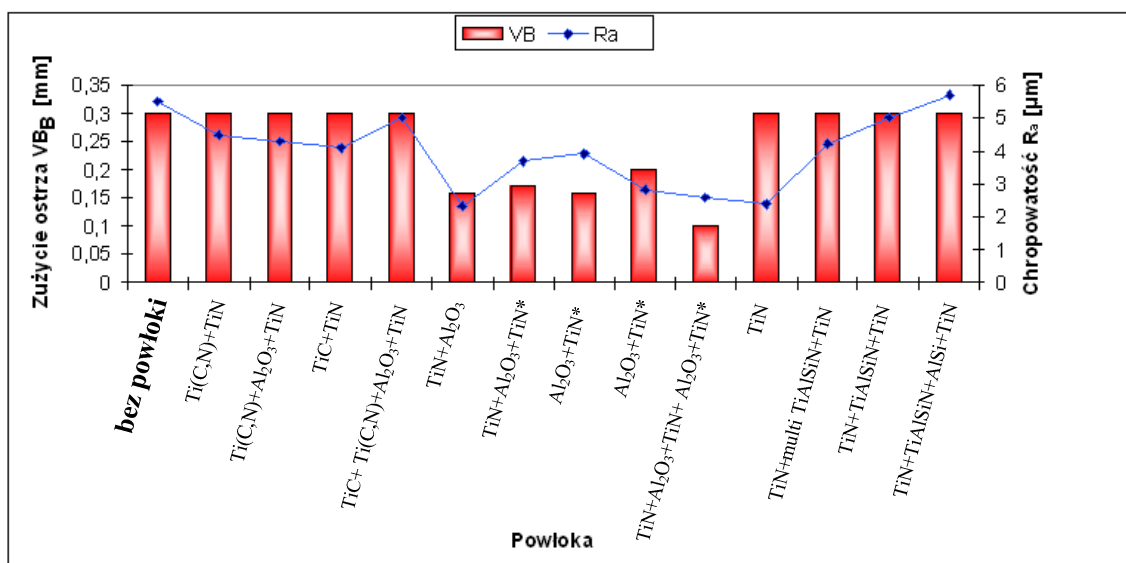
Rys 2.7. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na wartość parametru chropowatości R_a [11]

W literaturze [9] przedstawiono wyniki badań: struktury, właściwości wieloskładnikowych oraz wielowarstwowych powłok CVD i PVD wytworzonych na podłożu ceramiki azotkowej Si_3N_4 . W celu sprawdzenia korelacji między przyczepnością, twardością badanych materiałów, odpornością na ścieranie, a własnościami skrawnymi płytek wieloostrowych w testach skrawania wykonano próby toczenia żeliwa szarego EN-GJL-250 [9].

W badaniach przyjęto następujące parametry skrawania:

- posuw $f=0,2$ mm/obr,
- głębokość toczenia $a_p=2$ mm,
- prędkość skrawania $v_c=400$ m/min.

Nanoszenie powłok dwu- i wielowarstwowych $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ oraz $\text{TiN}+\text{Al}_2\text{O}_3$ wpływa korzystnie na wydłużenie okresu trwałości płytek skrawających (rys. 2.8). Bardzo dobra skrawność płytek z tymi powłokami w porównaniu z ceramiką azotkową niepokrywaną związana jest ściśle z wyraźnym wzrostem twardości, dobrą odpornością na ścieranie i przyczepnością [9].



Rys. 2.8. Zestawienie zużycia ostrza VB_B po 8 min skrawania oraz wartości parametru chropowatości R_a obrabianej powierzchni żeliwa szarego dla ceramiki azotkowej pokrytej i niepokrytej [9]

Najlepiej spośród badanych ostrzy skrawa płytka z ceramiki azotkowej pokryta powłoką $TiN+Al_2O_3+TiN+Al_2O_3+TiN$, w przypadku której szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia po 8 min skrawania wynosiła $VB_B=0,1$ mm, podczas gdy po tym samym czasie skrawania ceramika azotkowa bez powłoki zużywa się, osiągając wartość $VB_B=0,3$ mm. Niestety powłoki PVD, które rzadko stosuje się do pokrywania Si_3N_4 , ze względu na trudności osadzenia ich na dobranym materiale podłoża, nie sprawdzają się podczas próby skrawania żeliwa szarego. W wyniku badań chropowatości stwierdzono, że najmniejszą wartość parametru R_a uzyskano dla powłoki $TiN+Al_2O_3$. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy stwierdzili, że nanoszenie przeciwzużyciowych powłok na ceramikę narzędziową na bazie Si_3N_4 powoduje zwiększenie ich odporności na zużycie ścierne, co w konsekwencji wpływa bezpośrednio na wydłużenie okresu trwałości ostrza skrawającego [9].

2.2. MECHANICZNE I TERMICZNE ODDZIAŁYWANIA W PROCESIE SKRAWANIA

2.2.1. Siły w procesie skrawania

Aby rozpocząć proces skrawania, konieczne jest przyłożenie odpowiednio dużej i odpowiednio usytuowanej w przestrzeni siły, która może pokonać: opór materiału przeciwko odkształceniom plastycznym i sprężystym, opór przeciw niszczeniu spójności i tworzeniu nowej powierzchni materiału oraz opór tarcia [23]. Siła całkowita skrawania F jest to siła, która oddziałuje na przedmiot obrabiany, a następnie powoduje oddzielenie materiału i przekształcenie go w wiór [6]. Na wartość sił elementarnych ma wpływ wiele czynników takich jak: współczynnik tarcia, zmiana stanu ostrza podczas skrawania, zmiana właściwości mechanicznych materiału obrabianego wraz ze wzrostem temperatury i stopniem odkształcenia plastycznego [43].

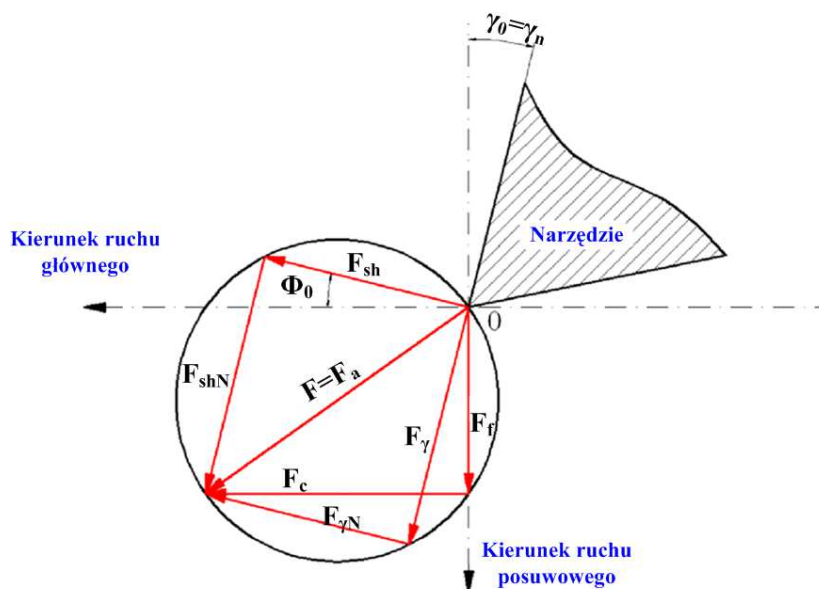
W ortogonalnym układzie współrzędnych c-f-p dokonuje się podstawowego rozkładu geometrycznego wg przedstawionej niżej zależności [14]:

$$\bar{F} = \bar{F}_c + \bar{F}_f + \bar{F}_p \quad (2.1)$$

gdzie: F_c – siła skrawania, F_f – składowa posuwowa, F_p – składowa odporowa.

W przypadku skrawania ortogonalnego ($\lambda_s=0^\circ$, $\kappa_r=90^\circ$) (rys 2.9) składowa odporowa $F_p \rightarrow 0$, a w konsekwencji [14]:

$$\bar{F} = \bar{F}_f + \bar{F}_c \quad (2.2)$$



Rys. 2.9. Rozkład sił w przypadku skrawania ortogonalnego (koło Merchanta) [14]

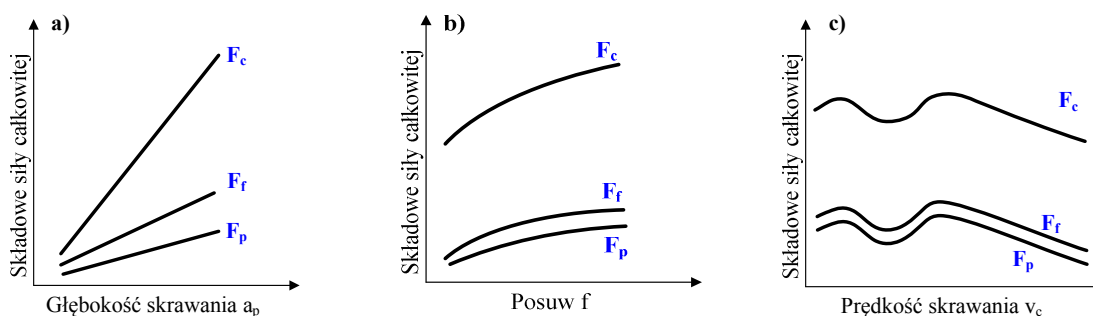
Trudności związane z teoretycznym fizykalnie, uzasadnionym wyprowadzeniem zależności pomiędzy siłami a warunkami skrawania, sprawia konieczność doświadczalnego określenia tych związków, które wynikają z przeprowadzonych pomiarów oporów skrawania [8]. Do grupy warunków skrawania, które wpływają na wartość składowych sił, należą [14]:

- rodzaj materiału i geometria ostrza narzędzia,
- właściwości materiału obrabianego,
- ciecz chłodząco – smarująca,
- parametry skrawania.

Właściwości materiałów obrabianych, które wpływają w znaczny sposób na składowe siły skrawania, zależą one głównie od [8]:

- struktury,
- składu chemicznego,
- mechanicznych i fizycznych właściwości materiału.

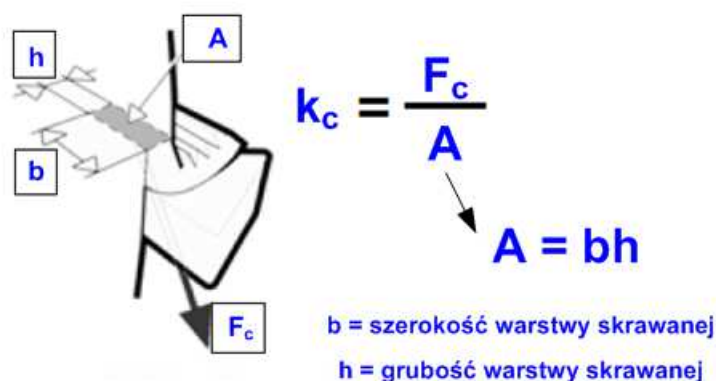
Wpływ parametrów skrawania (a_p , f , v_c) na siły skrawania jest różny. Z tego powodu na podstawie przeprowadzonych badań autor pracy [8] wnioskuje, że największy wpływ na wartość siły skrawania wywiera głębokość skrawania, następnie posuw, a w najmniejszym stopniu prędkość skrawania. W wyniku zwiększania głębokości skrawania siły skrawania rosną, ponieważ wzrasta pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej i udział krawędzi ostrza w procesie skrawania [8]. Przebieg zmian sił składowych w funkcji technologicznych parametrów skrawania przedstawiono na rys. 2.10.



Rys. 2.10. Zmiany składowych całkowitej siły skrawania w funkcji technologicznych parametrów skrawania [14]

2.2.2. Opór właściwy skrawania

Opór ścinania jest stałą materiałową, ale bardzo silny wpływ kąta ścinania na siły skrawania sprawia, że trudno jest go zastosować w praktyce produkcyjnej. Do tego celu służy opór właściwy skrawania, który definiuje się jako stosunek głównej składowej siły skrawania do pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej (rys. 2.11) [22]. Należy dodać również, że dla danego ostrza i w tej samej chwili otrzymuje się jednakowe wartości wielkości właściwych k_c i e_c [14].

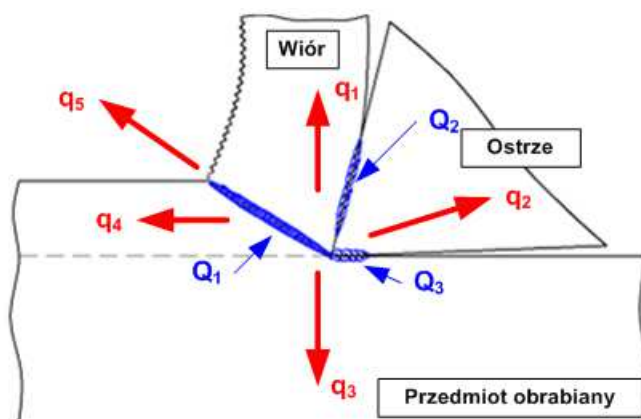


Rys. 2.11. Opór właściwy skrawania [22]

2.2.3. Ciepło w procesie skrawania

Praktycznie cała energia skrawania zamieniana jest na ciepło. Zaledwie, ok. 1% jej jest magazynowany w postaci naprężeń pozostających w materiale obrabianym i wiórach. Z tego powodu zjawiska cieplne w strefie skrawania, a przede wszystkim temperatura ostrza, wpływają zdecydowanie na trwałość, a co za tym idzie na koszty i wydajność procesu [22]. Podczas skrawania efektywna praca zamienia się w ciepło Q (rys. 2.12), które tworzy się w trzech strefach [43]:

- w strefie tworzenia się wióra – ciepło Q_1 powstaje w wyniku pracy odkształceń plastycznych i ścinania materiału,
- na styku wióra z powierzchnią natarcia – ciepło Q_2 powstaje wyniku pracy tarcia jak również pracy odkształcenia dolnej warstwy wióra,
- na stykach powierzchni przyłożenia z powierzchniami skrawania i obrobioną – ciepło Q_3 pochodzi nie tylko z pracy tarcia, powstaje także w wyniku pracy odkształceń warstwy wierzchniej.

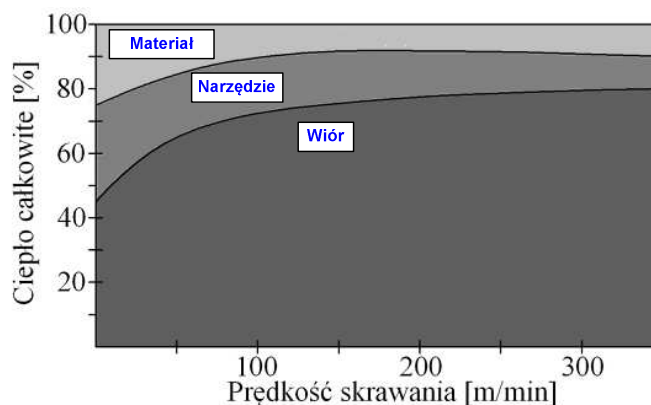


Rys. 2.12. Źródła powstawania i strumienie ciepłe w strefie skrawania [43]

Udział ciepła pochodzącego ze strefy tworzenia się wióra, jak również z tarcia zewnętrznego, zależy od wielu czynników takich jak [43]:

- właściwości mechaniczne materiału obrabianego, jego ciągliwość i wytrzymałość, im są większe tym większy udział ciepła Q_1 ,
- materiał ostrza, a ściślej – skojarzenie materiału ostrza z materiałem obrabianym, gdyż od tego w dużym stopniu zależy współczynnik tarcia, a w konsekwencji ciepło Q_1 oraz Q_2 ,
- geometria i stan zużycia ostrza, czynniki te wpływają na wartości składowych sił oraz na współczynnik spęczenia wióra,
- technologiczne parametry skrawania,
- skrawanie z udziałem cieczy obróbkowych lub bez ich udziału (na sucho).

Na rys. 2.13 przedstawiono procentowy udział strumieni ciepłych w zależności od prędkości skrawania w skrawaniu stali niestopowej (węglowej). W przypadku, gdy prędkość skrawania wynosi $v_c=150$ m/min to 75÷80% ciepła przechodzi do wióra, 10÷15% przejmuje ostrze, a około 5÷10% przedmiot obrabiany [14].

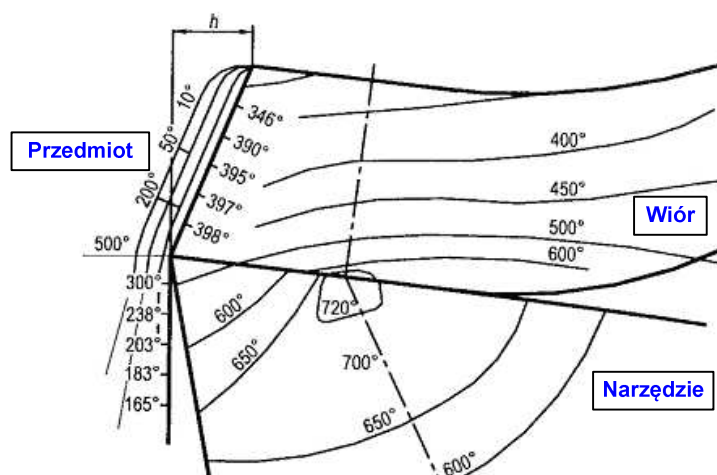


Rys. 2.13. Zmiana procentowego rozkładu strumieni ciepłych [14]

Wraz ze wzrostem prędkości skrawania przepływ ciepła do przedmiotu jest coraz bardziej utrudniony i dominującą rolę w jego odbiorze przejmuje wiór [22]. W tym samym czasie maleje również długość kontaktu wiór – powierzchnia natarcia, przez którą ciepło wnika do ostrza [14].

2.2.4. Temperatura w procesie skrawania

W zależności od mocy źródeł ciepła i intensywności cząstkowych strumieni ciepłych w strefie skrawania powstaje złożone pole temperatury, które obejmuje charakterystyczne obszary odkształceń plastycznych i intensywnego tarcia [14]. Charakterystyczne jest to, że najwyższa temperatura występuje na powierzchni natarcia (rys. 2.14) w pewnej odległości od krawędzi skrawającej, gdzie najsilniej naciska i trze wiór. Odległość ta głównie zależy od grubości warstwy skrawanej i od plastyczności materiału obrabianego, rośnie wraz ze wzrostem posuwu, a wydatnie maleje przy obróbce materiałów kruchych dających wiór odpryskowy [43].



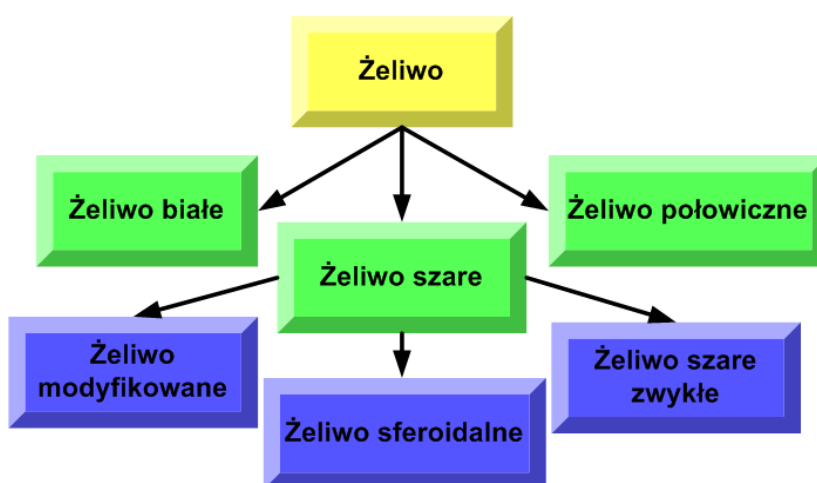
Rys. 2.14. Temperatury przy toczeniu stali ostrzem z węgla spiekane [43]

Największy wpływ na temperaturę ostrza ma prędkość skrawania. Jest on jednak znacznie słabszy niż wpływ na ilość wytwarzanego ciepła, ponieważ wraz ze wzrostem prędkości skrawania rośnie również szybkość odprowadzania ciepła z wiórami i udział wiórów w tym odprowadzaniu. Posuw na wytwarzanie ciepła wpływa w znacznie mniejszym stopniu niż prędkość skrawania, a ponadto jego powiększanie wydłuża strefę ścinania i przekroju wióra. Konsekwencją tego jest zwiększanie udziału wiórów w odprowadzaniu ciepła i sprawia, że wpływ posuwu na temperaturę ostrza jest wyraźnie mniejszy niż prędkość skrawania. Głębokość skrawania wpływa na odprowadzanie ciepła w takim samym stopniu, jak na jego wytwarzanie [22].

2.3. ŻELIWO NIESTOPOWE

2.3.1. Klasyfikacja żeliw niestopowych

Jednym z najczęściej stosowanych materiałów odlewniczych w budowie maszyn jest żeliwo. Decydują o tym między innymi: dobre właściwości wytrzymałościowe, stosunkowo niski koszt produktów oraz niska temperatura topnienia. Żeliwo niestopowe można ogólnie sklasyfikować w zależności od postaci w jakiej występuje węgiel, dlatego rozróżnia się następujące żeliwa: białe, połowiczne (pstre) i szare. Żeliwo szare można jeszcze podzielić na trzy grupy (rys. 2.15) [10].



Rys. 2.15. Podział żeliwa szarego [10]

W różnych gałęziach przemysłu maszynowego dużą popularność zdobyły żeliwa szare, dzięki takim walorom jak [49]:

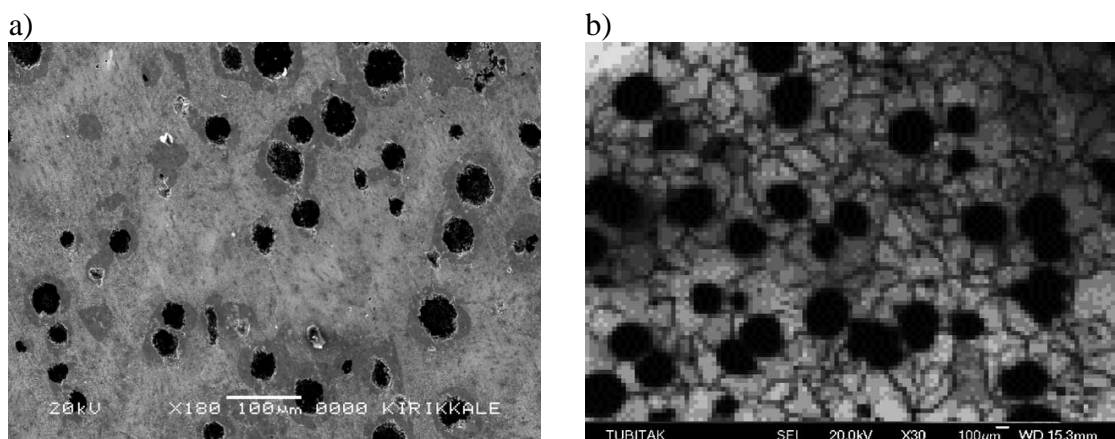
- łatwość odlewania nawet skomplikowanych kształtów w formach piaskowych lub metalowych,
- mała rozszerzalność cieplna,
- możliwość ograniczenia obróbki skrawaniem do minimum oraz dobra skrawalność,
- duża zdolność tłumienia drgań,
- dobra odporność na ścieranie.

Do podstawowych wad żeliwa szarego można zaliczyć [49]:

- małą ciągliwość i udarność,
- małą wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu z wytrzymałością na ściskanie.

2.3.2. Żeliwo sferoidalne

Jak już wcześniej wspomniano, podstawową wadą żeliwa szarego jest mała ciągliwość i udarność. Spowodowane jest to płatkowymi wydzieleniami grafitu. Z tego powodu od dawna trwały badania, które miały na celu zmianę kształtu grafitu na kulisty. Opracowana metoda polegała na wprowadzeniu do ciekłego żeliwa substancji o właściwościach silnie redukujących, które reagując z żeliwem wytwarzają bardzo dużą ilość drobnych cząsteczek, stanowiących zarodki krystalizacji grafitu. Początkowo stosowano cer, obecnie stosowany jest stop magnezu z niklem, miedzią lub krzemem. W wyniku tego zabiegu technologicznego grafit występuje w żeliwie w postaci kulistej (rys. 2.16). Jako produkt wyjściowy do wytwarzania żeliwa sferoidalnego stosuje się żeliwo szare z tym, że musi być dobrze odsiarczone, aby zmniejszyć zużycie modyfikatora na reakcje z siarką [48]. Należy dodać, że wydzielenia grafitu sferoidalnego nie tworzą się w postaci pojedynczych kryształów, lecz składają się z licznych kryształów, rosnących promieniowo od punktu, który znajduje się prawie w środku sferoidu [34]. Właściwości wytrzymałościowe grafitu są bardzo małe, a jego wydzielenia w żeliwie można traktować jako nieciągłości osnowy metalowej [10].

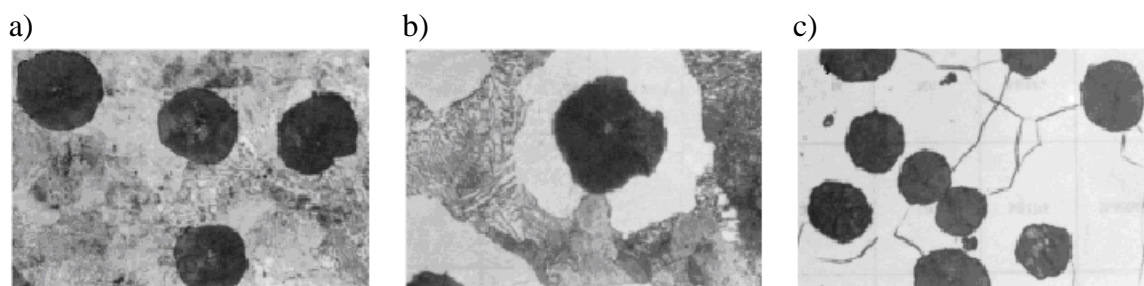


Rys. 2.16. Mikrostruktura żeliwa sferoidalnego. Powiększenie: a) x180, b) x30 [5, 62]

Wpływ grafitu na właściwości żeliwa jest tym większy, im jest go więcej, z tego powodu w praktyce stosuje się żeliwa o stosunkowo małej zawartości węgla (zazwyczaj 4% węgla całkowitego, z czego 3% stanowi grafit). Najlepsze właściwości posiada żeliwo o małej ilości grafitu, w postaci równomiernie rozłożonych, odosobnionych wtrąceń [51].

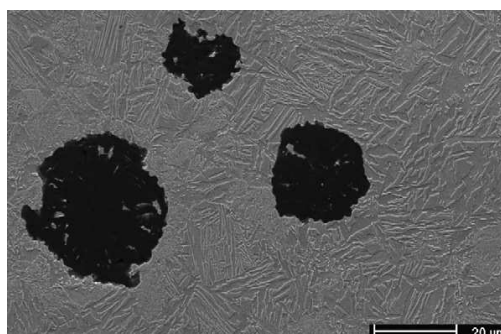
Z punktu widzenia konstruktorów maszyn, żeliwo sferoidalne wypełnia szeroki zakres właściwości mechanicznych ujętych według normy (PN – EN 1563): od żeliwa o dużej wytrzymałości i niewielkiej plastyczności charakteryzującego się osnową

bainityczną lub martenzytyczną poprzez żeliwo o osnowie perlitycznej (rys. 2.17a), perlityczno – ferrytycznej (rys. 2.17b) i ferrytycznej (rys. 2.17c) o dużej plastyczności i znacznej wytrzymałości [18].



Rys. 2.17. Żeliwo sferoidalne z osnową: a) perlityczną, b) perlityczno-ferrytyczną, c) ferrytyczną [69]

Do grupy żeliw o szczególnie wysokich właściwościach mechanicznych i podwyższonej odporności na ścieranie należą żeliwa niskostopowe, które poddano obróbce cieplnej. Są to żeliwa sferoidalne typu ADI (rys. 2.18) (ang. Austempered Ductile Iron) [3].



Rys. 2.18. Mikrostruktura żeliwa sferoidalnego typu ADI [26]

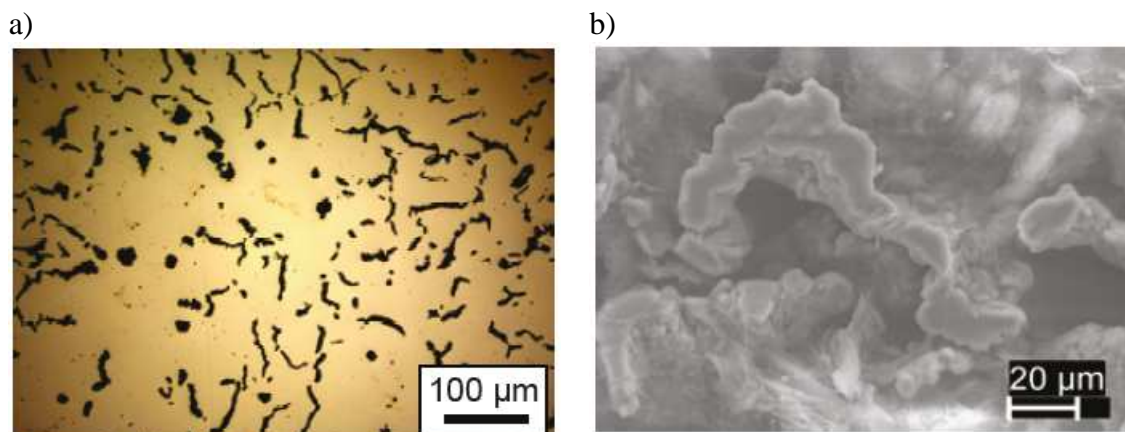
Żeliwo ADI otrzymuje się w wyniku hartowania izotermicznego żeliwa z grafitem kulkowym, często z niewielką ilością Ni, Mo lub Cu, które dodaje się w celu polepszenia hartowności. Hartowanie izotermiczne przeprowadza się w temperaturze z zakresu 230÷400°C, w konsekwencji czego otrzymuje się ausferrytyczną strukturę osnowy metalowej. Temperatura i czas hartowania izotermicznego zasadniczo wpływają na właściwości mechaniczne żeliwa ADI [31]. Do zalet żeliwa ADI należy to, że po odlaniu uzyskuje się części o bardzo złożonym kształcie, a krótsza obróbka cieplna zapewnia wytrzymałość i odporność na zużycie ścierne porównywalne z odkuwkami ze stali stopowych ulepszonych cieplnie, ale przy mniejszej o 10% masie właściwej [35]. W tabeli 4.1 przedstawiono właściwości mechaniczne żeliwa sferoidalnego i żeliwa ADI.

Tabela 2.1

Właściwości mechaniczne wybranych żeliw [24, 84]

Żeliwo	Znak żeliwa	Minimalne właściwości mechaniczne			A ₅ , %	Mikrostruktura osnowy metalowej
		R _m , MPa	R _{p0,2} , MPa	Twardość HB		
Sferoidalne	EN-GJS-350-22	350	220	≤160	22	ferrytyczna
	EN-GJS-400-18	400	250	130÷175	18	ferrytyczna
	EN-GJS-400-15	400	250	135÷180	15	ferrytyczna
	EN-GJS-450-10	450	310	160÷210	10	perlityczno-ferrytyczna
	EN-GJS-500-7	500	320	170÷230	7	perlityczno-ferrytyczna
	EN-GJS-600-3	600	370	190÷270	3	perlityczno-ferrytyczna
	EN-GJS-700-2	700	420	225÷305	2	ferrytyczno-perlityczna
	EN-GJS-800-2	800	480	245÷335	2	zależna od obróbki
	EN-GJS-900-2	900	600	270÷360	2	zależna od obróbki
Sferoidalne ADI	EN-GJS-800-8	800	500	260÷320	8	
	EN-GJS-1000-5	1000	700	300÷360	5	
	EN-GJS-1200-2	1200	850	340÷440	2	
	EN-GJS-1400-1	1400	1100	380÷480	1	

Oprócz żeliwa sferoidalnego i ADI w przemyśle stosuje się również żeliwo wermikularne z grafitem robaczkowym (rys. 2.19), które pod względem właściwości zajmuje pośrednie miejsce między żeliwem szarym a sferoidalnym.



Rys. 2.19. Przykład żeliwa z grafitem wermikularnym: a) zdjęcie metalograficzne, b) obraz SEM [39]

Należy dodać, że żeliwa wermikularne posiadają korzystne cechy takie jak: zdolność do tłumienia drgań, wysoką przewodność cieplną oraz dużą wytrzymałość i dobrą plastyczność (zbliżoną do żeliwa sferoidalnego) [24].

2.3.3. Skrawalność żeliw

W fachowej literaturze [8] skrawalność definiuje się jako względną umowną właściwość materiału obrabianego zależną od właściwości i stanu tego materiału, własności i stanu materiału narzędzia, sposobu i rodzaju skrawania, stanu i właściwości obrabiarki oraz warunków skrawania.

Określenie skrawalności materiału jest zadaniem bardzo złożonym, ponieważ należy uwzględnić wiele, niekiedy wzajemnie powiązanych czynników, do których należą [14]:

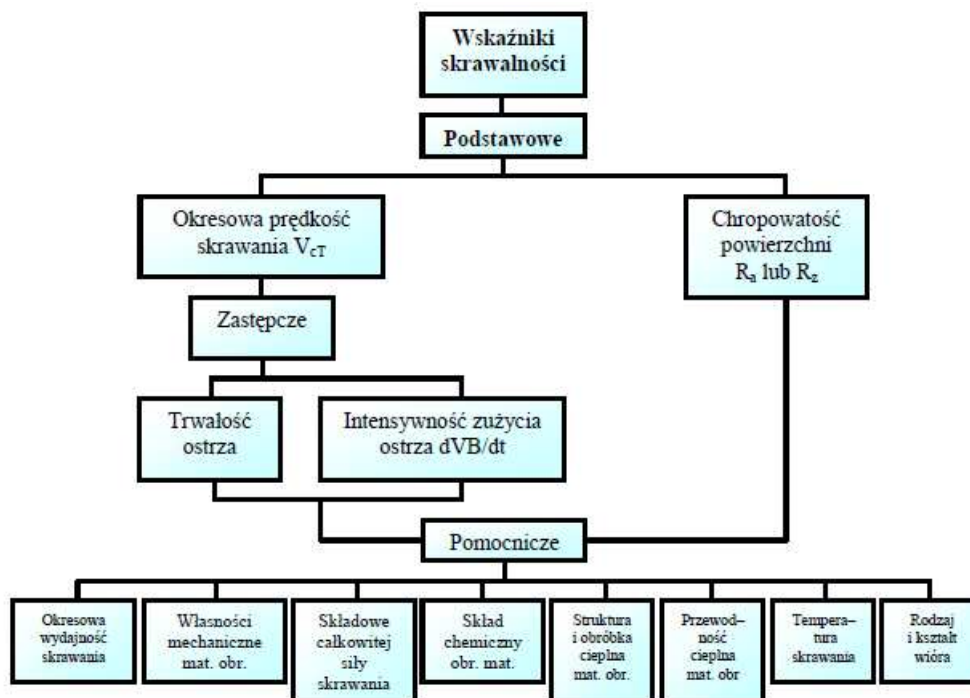
- wpływ cieczy obróbkowych,
- charakter procesu skrawania (ciągły, przerywany),
- właściwości materiału narzędziowego, stereometria ostrza, sposób przygotowania krawędzi skrawającej, kształt zwijacza wióra,
- parametry skrawania,
- sposób, rodzaj i odmiana realizowanego procesu,
- właściwości, skład chemiczny i struktura oraz ich rozkład (jednorodności) w całej objętości materiału obrabianego, z tego względu istotny wpływ ma proces metalurgiczny i przygotowanie półfabrykatu.

Wyżej przedstawione czynniki powinny być brane pod uwagę przy doborze optymalnych warunków skrawania, ponieważ decydują one o wydajności obróbki – podstawowym wskaźniku ekonomicznym produkcji. Czynniki te wpływają również na stan warstwy wierzchniej, jak i na jakość powierzchni obrobionej. Materiał charakteryzujący się dobrą skrawalnością może w dużym stopniu ułatwić, jak i uprościć proces obróbki wyrobów, przez co w konsekwencji zmniejszają się koszty produkcji [37].

Do podstawowych wskaźników skrawalności należą [14]:

- okresowa prędkość skrawania lub jej pochodne (okresowa trwałość ostrza, intensywność zużycia ostrza),
- chropowatość powierzchni obrobionej oceniana za pomocą parametrów Ra lub Rz.

W zależności od potrzeb i możliwości stosuje się różne wskaźniki, których umowny podział przedstawiono na rys. 2.20.



Rys. 2.20. Orientacyjny podział wskaźników skrawalności [8]

Poszczególne gatunki żeliwa, jako materiału mniej jednorodnego niż stal, wykazują się znacznie większymi różnicami w skrawalności. Generalnie bez względu na strukturę, żeliwa o większym ziarnie są wprawdzie łatwiej skrawalne z uwagi na mniejsze siły skrawania i kruchy wiór, ale uzyskuje się znacznie gorszą jakość powierzchni [37]. Wpływ składu chemicznego i składników strukturalnych jest zbliżony jak dla stali. W zależności od struktury wszystkich gatunków żeliw można je uporządkować wg pogarszającej się skrawalności tj. [23]:

- żeliwa ferrytyczne, zawierające dużą ilość grafitu,
- żeliwa perlityczno – ferrytyczne, mające duży procent grafitu, ferrytu oraz perlitu,
- żeliwa perlityczne, zawierające grafit i perlit,
- żeliwa pstre, zawierające perlit, grafit oraz skupienia cementytu,
- żeliwa białe, zawierające perlit i cementyt.

W żeliwie sferoidalnym grafit występuje w postaci drobnych kuleczek, które w strefie ścinania powodują osłabienie materiału i inicjują poślizg, ale w tym przypadku bardziej skuteczne są płatki. Wióry są nieco dłuższe i w dalszym ciągu kruche, ale bardziej podobne do uzyskiwanych przy obróbce żeliwa szarego niż stali. Żeliwo sferoidalne jest o ok. 30% gorzej skrawalne niż szare, ma za to lepsze własności

mechaniczne i obecnie jest coraz bardziej popularne [22]. Należy dodać, że skrawalność żeliwa sferoidalnego pogarsza się na ogół w miarę zwiększenia się twardości i wytrzymałości na rozciąganie oraz w miarę zmniejszenia się własności plastycznych materiału [44]. W tabeli 2.2 przedstawiono wpływ mikrostruktury żeliwa o zawartości 2,5% grafitu na porównawczy wskaźnik okresu trwałości [14].

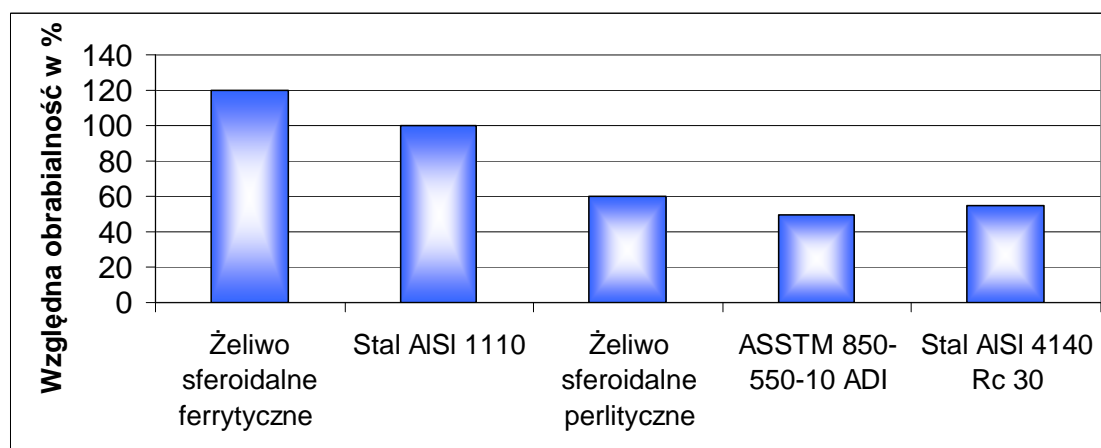
Tabela 2.2

Wpływ mikrostruktury żeliwa na skrawalność [14]

Mikrostruktura osnowy	Twardość HB	Wskaźnik okresu trwałości
Feryt	120	20
50% feryt, 50% perlit	150	10
Gruby perlit	195	2
Średni perlit	215	1,5
Drobny perlit	218	1
Drobny perlit i ponad 5% cementytu	240	0,3

Na podstawie tabeli 2.2 można stwierdzić, że wzrost twardości osnowy występujący przy zmniejszeniu wielkości ziarna, zwiększeniu zawartości perlitu i wprowadzeniu twardego cementytu powoduje wzrost intensywności zużycia ostrza [14].

Na rys. 2.21 przedstawiono porównanie obrabialności różnych materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych w procesie obróbki skrawaniem.



Rys. 2.21. Względna obrabialność niektórych materiałów na osnowie żelaza [4]

Obrabialność żeliwa sferoidalnego perlitycznego jest prawie taka sama jak wysoko jakościowego żeliwa szarego lub staliwa. Szczególnie dobra jest obrabialność żeliwa sferoidalnego o osnowie ferrytycznej.

Niektóre dodatki stopowe (nikiel, tytan oraz wiele innych metali) oddziałują na skrawalność żeliwa głównie przez ich wpływ na wielkość i rozmieszczenie wtrąceń wolnego grafitu [30]. Szczególny wpływ na właściwości wytrzymałościowe (twardość i plastyczność) żeliwa, wywierają węgiel i krzem.

Węgiel wpływa na skrawalność żeliw w taki sposób, że zwiększenie ilości wolnych wydzielen grafitu, przy równoczesnym zmniejszeniu się ilości węgla związanego, znacznie poprawia skrawalność żeliwa [37].

Krzem wpływa na stosunek procentowy wolnego grafitu do całkowitej zawartości węgla. W przypadku żeliwa wysokochromowego, krzem rozpuszcza się głównie w osnowie, bardzo podobnie jak w żeliwie szarym i zwiększa mikrotwardość. Powoduje to wzrost twardości żeliwa wysokochromowego o osnowie ferrytycznej, co w konsekwencji prowadzi do pogorszenia jego skrawalności [37].

2.3.4. Zastosowanie żeliw

Żeliwo sferoidalne dzięki swoim właściwościom wytrzymałościowym i mechanicznym znajduje szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Żeliwo to z powodzeniem może zastępować staliwo jak również odkuwki stalowe. Stosuje się je w przemyśle budowy maszyn na korpusy obrabiarek, wały korbowe, cylindry silników, pierścienie tłokowe, elementy maszyn rolniczych oraz armaturę [54]. Firma Ruville – producent części motoryzacyjnych wykonuje z żeliwa sferoidalnego wałki rozrzędu w celu zagwarantowania najwyższej jakości swoich wyrobów [77].




Wysokie właściwości wytrzymałościowe, jak i dobra plastyczność spowodowały, że żeliwo ADI znajduje coraz większe zastosowanie również w przemyśle motoryzacyjnym [66]. Wykonuje się z niego wały korbowe, wahacze itp. (rys. 2.22). Należy zwrócić uwagę, że odlewanie z żeliwa, umożliwia nadanie wałom korbowym najkorzystniejszych, ze względów dynamicznych kształtów, podczas gdy w produkcji wałów kutyh ze stali należy brać pod uwagę ograniczenia kształtu wynikające z technologii ich wykonania (kucia w matrycach) [34].

Żeliwo wermikularne stosuje się na odlewy, od których wymaga się wysokiej wytrzymałości, dobrej zdolności do tłumienia drgań oraz odporności na zmęczenie cieplne [24].

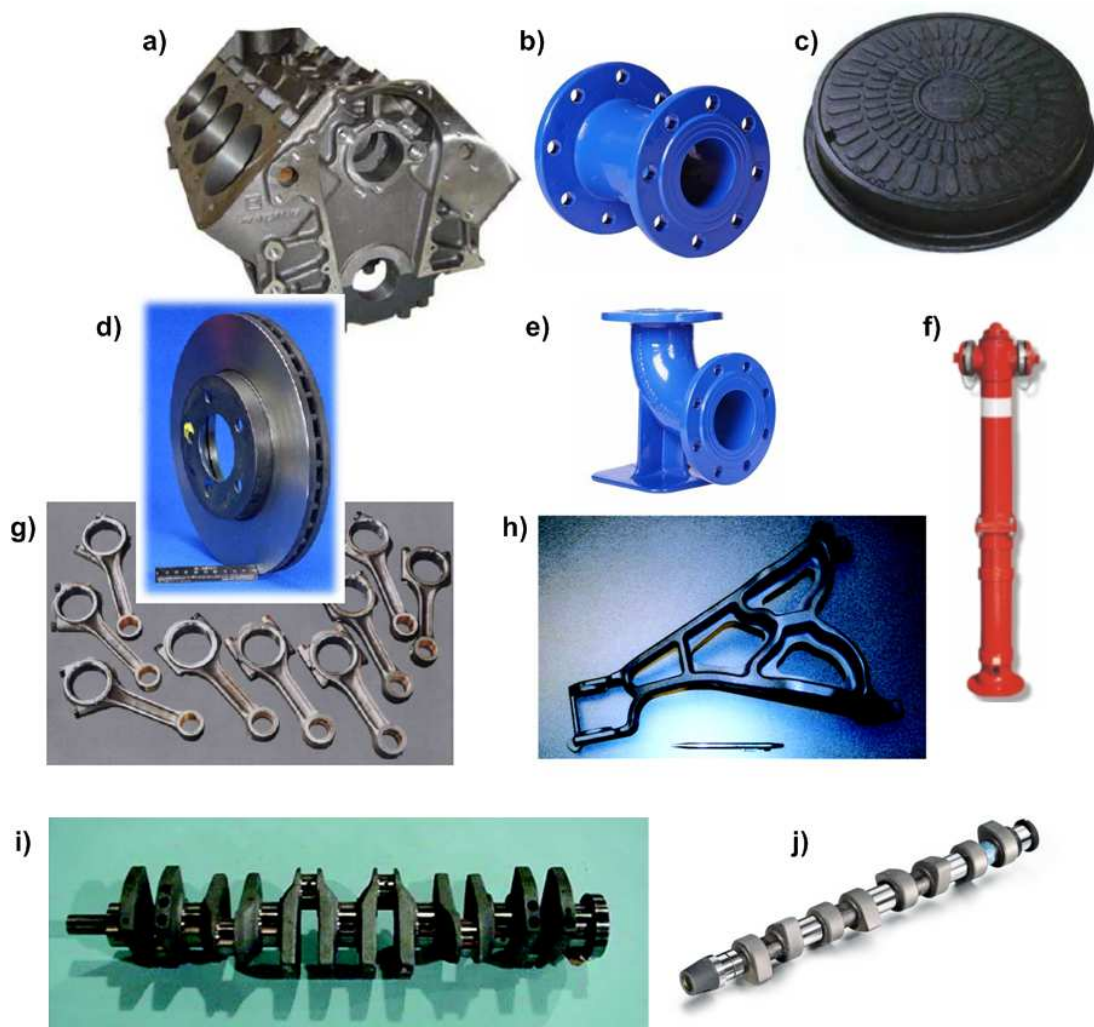
W tabeli 2.3 przedstawiono tendencję zastosowania żeliwa w przemyśle motoryzacyjnym oraz typowe narzędzia dedykowane do obróbki poszczególnych żeliw. Należy zwrócić uwagę na to że, ceramika narzędziowa znalazła szerokie zastosowanie w przemyśle samochodowym, ponieważ idealnie nadaje się do wykonania z żeliwa takich elementów jak: tarcze hamulcowe, bębny hamulcowe oraz koła zamachowe [52].

Tabela 2.3

Zastosowanie żeliwa w przemyśle motoryzacyjnym [64]

Gatunek żeliwa	Tendencja	Typowe części	Typowe materiały ostrza skrawającego
Szare (EN-GJL)		Bloki cylindrowe, głowice, kadłuby, tarcze hamulcowe	Węglik pokrywane Al ₂ O ₃ , ceramika azotkowa, Si ₃ N ₄ , CBN
Wermikularne (EN-GJV)		Bloki cylindrowe silników Diesla, elementy złączne i mocujące	Zgodnie z wymaganiami procesu skrawania
Sferoidalne (EN-GJS)		Wały korbowe, wały rozrządu, koła zębate, korpusy, obudowy	Węglik pokrywane wielowarstwowo metodą MT-CVD i PVD (TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN), (TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN/TiCN), cermety, ceramika mieszana, CBN

Firma Kennametal proponuje do obróbki wyżej wymienionych elementów specjalny gatunek ceramiki KY1310 [28]. Więcej informacji na temat zaawansowanych materiałów narzędziowych przedstawiono w rozdziale 2.4.



Rys. 2.22. Przykładowe zastosowania żeliwa: a) blok silnika DIESLA, b) króciec (EN-GJS-500-7), c) wąż żeliwny (EN-GJS-400-15), d) tarcze hamulcowe, e) kolanko kołnierza (EN-GJS-500-7), f) hydrant, g) korbowody, h) wahacz zawieszenia – „Ford Mustang Cobra” (żeliwo sferoidalne hartowane izotermicznie), i) wał korbowy samochodu sportowego – „TVR Tuscan Speed 6” (żeliwo sferoidalne hartowane izotermicznie), j) wałek rozrządu z żeliwa sferoidalnego, wg [75,76,77]

2.4. MATERIAŁY NARZĘDZIOWE

Materiały narzędziowe wykorzystywane w obróbce skrawaniem muszą spełniać bardzo wygórowane zadania, ponieważ warunki, w jakich pracują wykonane z nich ostrza są bardzo ciężkie. Należą do nich duże naciski jednostkowe i wysoka temperatura, przy czym naciski i temperatura występują na powierzchniach roboczych ostrza, charakteryzują się bardzo dużymi gradientami. W przypadku ostrzy ceramicznych gradienty temperatury mogą osiągać nawet wartość, np. 2000 K/mm [6]. Ponadto, w tych ekstremalnych warunkach występuje przemieszczanie materiału obrabianego względem powierzchni roboczych ostrza. Odbywa się to z dużą prędkością. Towarzyszą temu zjawiska sprzyjające zużyciu się ostrza, takie jak: dyfuzja, adhezja, utlenienie, zmęczenie materiału itp. Dlatego wymagania, które stawia się materiałom narzędziowym, muszą być bardzo wysokie. Należą do nich [6]:

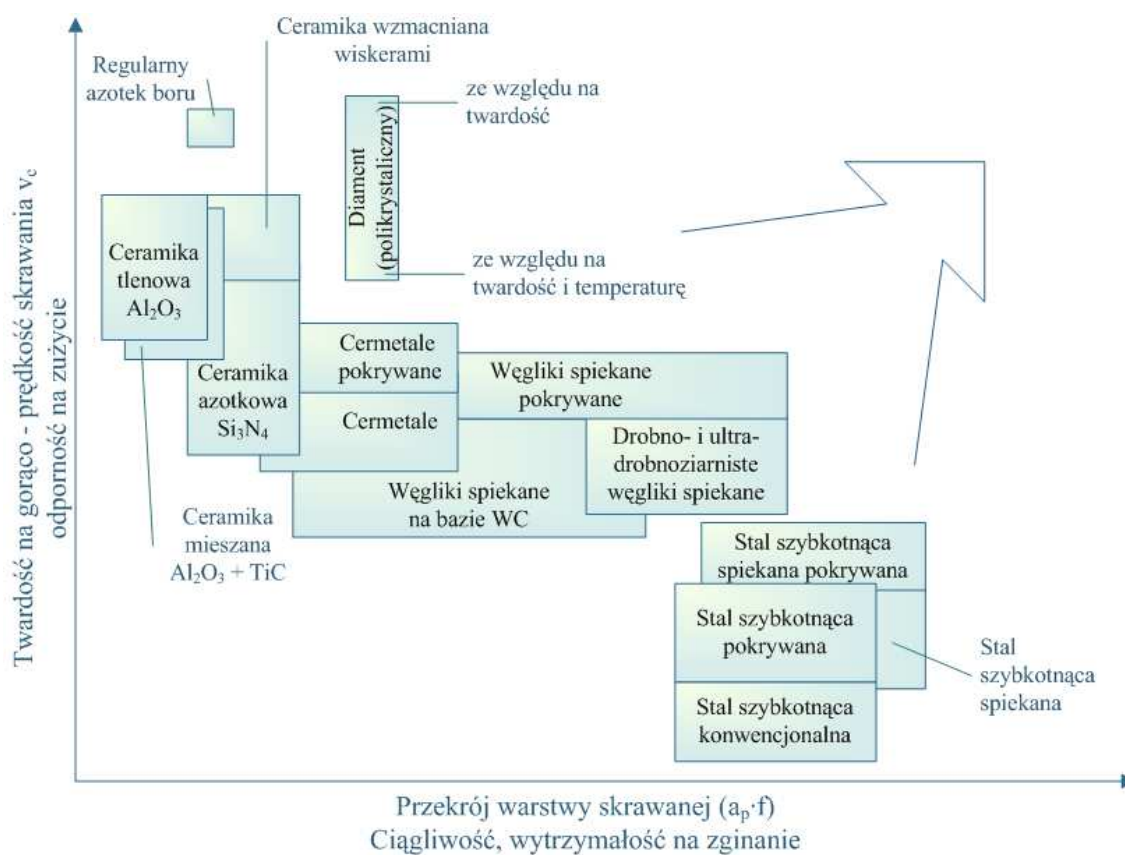
- duża twardość, zasadniczo większa od twardości materiału obrabianego,
- mała rozszerzalność cieplna,
- odporność na zużycie: ścierny, dyfuzyjny, adhezyjny i chemiczny,
- stabilność krawędzi skrawającej,
- jednorodność właściwości materiału zarówno w obrębie jednego ostrza, jak i całej serii ostrzy,
- duża udarność,
- odporność zmęczeniowa,
- duża wytrzymałość na zginanie, ściskanie, skręcanie i rozciąganie,
- dobra przewodność cieplna,
- odporność na szoki termiczne i mechaniczne,
- względnie niska cena w porównaniu do jego możliwości skrawnych.

Żaden z dostępnych materiałów na ostrza skrawające nie spełnia jednocześnie wszystkich żądanych właściwości, tym bardziej, że niektóre z nich się wzajemnie wykluczają. Idealny materiał narzędziowy powinien charakteryzować się następującymi cechami [33]:

- dużą ciągliwością, gwarantującą ochronę przed pękaniem,
- dobrą odpornością na szoki termiczne oraz dostateczną twardością,
- stabilnością chemiczną, która zabezpieczałaby przed utlenianiem i dyfuzją,
- neutralnością chemiczną w stosunku do materiału obrabianego.

2.4.1. Dobór materiału narzędziowego

Na rynku dostępnych jest wiele różnych gatunków materiałów narzędziowych o bardzo zróżnicowanych właściwościach. Nie ma jednak uniwersalnej zasady doboru tych materiałów do obróbki określonego rodzaju materiału. Z wyjątkiem podstawowych wskazówek, które są pomocnicze przy takim doborze, nie bez znaczenia jest też wpływ warunków obróbki, w jakich będzie realizowany proces skrawania, jak i doświadczenie użytkownika [60]. Na rys. 2.23 przedstawiono uszeregowanie ważniejszych materiałów narzędziowych w zależności od ich twardości i ciągliwości.



Rys. 2.23. Zestawienie właściwości i zakresu zastosowań materiałów narzędziowych [6]

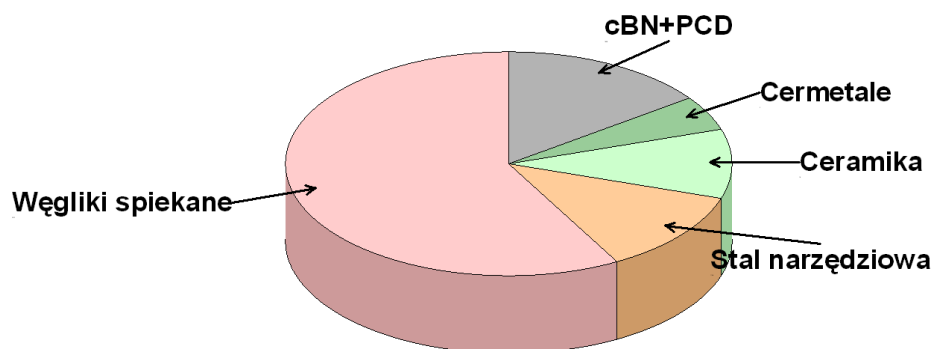
Podstawowym kryterium doboru materiału narzędziowego jest jego twardość, która powinna być wyższa od twardości materiału obrabianego, co najmniej o 30 HRC.

Dzięki zdolnościom niektórych materiałów narzędziowych (np. ceramicznych) w procesie skrawania (toczeniu i frezowaniu) jest możliwe wyeliminowanie operacji szlifowania. Jest to istotne w przypadku pracy na centrach obróbkowych, ponieważ można przeprowadzić obróbkę przy jednym zamocowaniu. W przypadku narzędzi supertwardych i ceramicznych, gdy stosowane są duże prędkości skrawania, można uzyskać lepsze wykorzystanie obrabiarek oraz dużą wydajność produkcji. Często

użytkownik narzędzia zmuszony jest do doboru parametrów skrawania metodą prób i błędów, dochodząc do optymalnych wartości tych parametrów po kilku wymianach narzędzi [60].

2.4.2. Ceramika narzędziowa

Zastosowanie ceramicznych materiałów narzędziowych stale rośnie (rys. 2.24), choć jest jeszcze niewielkie w porównaniu z zastosowaniem węglików spiekanych. Szacuje się, że 2÷3% ostrzy narzędziowych wykonuje się z ceramicznych materiałów, przy czym z ich użyciem obrabia się 3,5÷5% objętości materiałów [32].



Rys. 2.24. Udział grup materiałów narzędziowych [27]

Surowcami do wytwarzania ceramicznych materiałów narzędziowych są [32]:

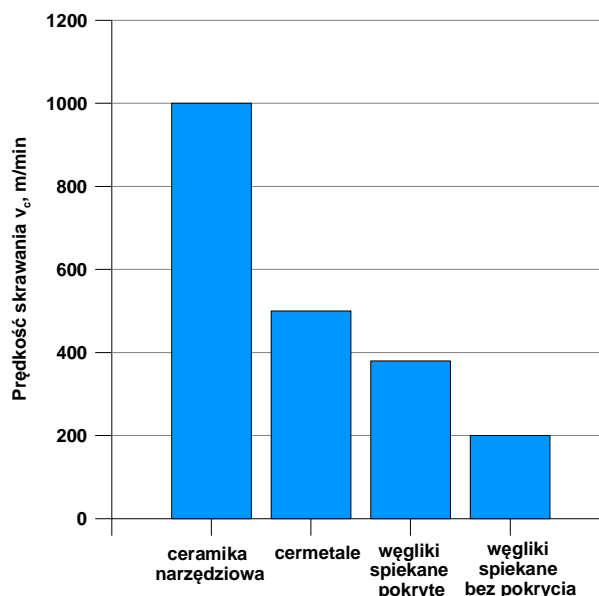
- jednofazowy tlenek glinu Al_2O_3 ,
- wielofazowe mieszaniny Al_2O_3 i Si_3N_4 z twardymi węglkami, azotkami i tlenkami metali przejściowych grupy III i VI,
- azotek krzemu Si_3N_4 .

Należy dodać, że w procesie wytwarzania ceramiki narzędziowej surowce wyjściowe na ogół uzyskuje się syntetycznie [32].

Spiekami ceramicznymi nazywa się takie materiały spiekane, w których składzie nie ma metalowej fazy wiążącej. Dodaje się czasami w niewielkich ilościach katalizator ułatwiający proces spiekania. Materiały ceramiczne takie jak: Al_2O_3 , Si_3N_4 wykazują szereg właściwości, które predestynują je do wykorzystania na ostrze skrawające [6]. Do tych właściwości można zaliczyć:

- zachowanie dużej twardości i odporności na ścieranie w wysokiej temperaturze,
- brak powinowactwa do większości obrabianych materiałów,
- odporność na odkształcenia plastyczne w wysokiej temperaturze,
- stosunkowo niską cenę surowca do ich produkcji.

Właściwości te sprawiają, że materiały ceramiczne odznaczają się dużą odpornością na zużycie ścierne, chemiczne, adhezyjne oraz dyfuzyjne i to w warunkach, gdy występuje wysoka temperatura skrawania. Pozwala to na stosowanie znacznie większych prędkości skrawania w porównaniu do innych materiałów narzędziowych (np. cermetali, węglików spiekanych) rys. 2.25 [33].



Rys.2.25. Porównanie prędkości skrawania różnymi materiałami narzędziowymi [33]

W tabeli 2.4 przedstawiono właściwości i główne obszary zastosowania spieków ceramicznych.

Tabela 2.4

Właściwości i główne zakresy zastosowania spieków ceramicznych (większe ciemne pole oznacza lepsze właściwości) [22]

Rodzaj ceramiki	Właściwości				ZASTOSOWANIE
	wytężalność na zginanie	twardość	odporność na szok termiczny	stabilność chemiczna	
tlenkowa czysta Al ₂ O ₃					żeliwo szare bez wtrąceń i warstwy zewnętrznej
tlenkowa mieszana Al ₂ O ₃ +TiC/TiN					żeliwo szare, żaroodporne stopy niklu, utwardzona stal i żeliwo stopowe
tlenkowa zbrojona Al ₂ O ₃ +TiC/TiN					żaroodporne stopy niklu, utwardzona stal i żeliwo stopowe, obróbka przerywana
azotkowa Si-Al-O-N, HPSN					obróbka przerywana, żeliwo szare, żaroodporne stopy niklu

*) zła przy obróbce stali, bardzo dobra przy obróbce żeliwa

Wyróżnia się następujące spieki ceramiczne, które stosowane są na narzędzia skrawające [6]:

- ceramika tlenowa (CA),
- ceramika azotkowa (CN),
- ceramika mieszana (CM),
- SIALON,
- ceramika wzmocniana wiskerami z węgliku krzemu SiC,
- ceramika z naniesionymi powłokami ochronnymi (CC).

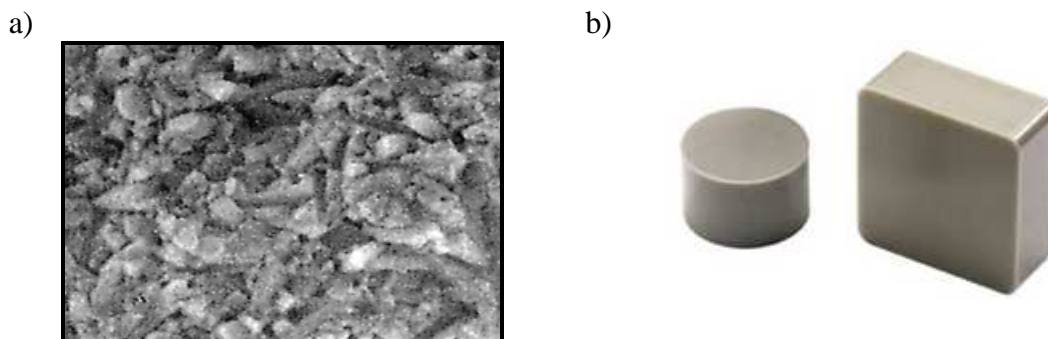
Azotek krzemu (Si_3N_4) ze względu na swoje unikalne właściwości fizyczne i mechaniczne zalicza się do nowoczesnych materiałów ceramicznych znajdujących coraz większe zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu (motoryzacyjnym, maszynowym oraz metalurgicznym). Silne wiązania kowalencyjne zapewniają azotkowi krzemu Si_3N_4 np. [60]:

- dużą twardość oraz odporność na utlenianie,
- dużą wytrzymałość,
- dobrą przewodność cieplną,
- odporność na szoki termiczne.

Doskonałe właściwości, które posiada Si_3N_4 również w wysokiej temperaturze ulegają znacznemu ograniczeniu wskutek dodatków niezbędnych w procesie spiekania tego materiału. W przeciwieństwie do ceramiki tlenkowej Al_2O_3 , w procesie wytwarzania ceramiki azotowej Si_3N_4 są dodawane domieszki, najczęściej MgO lub Y_2O_3 [60]. Azotek krzemu z dodatkiem Y_2O_3 ma twardość ok. 1380 HV w temperaturze 1270K oraz ok. 2150 HV w temperaturze pokojowej. Wytrzymałość na zginanie w zakresie od temperatury pokojowej do 1270K wynosi ok. 700 MPa [32].

Azotek krzemu może być stosowany z takim dodatkami jak: MgO, ZrO_2 , Al_2O_3 , TiC i wspomnianym Y_2O_3 . Dodatki te, szczególnie MgO i Y_2O_3 , w połączeniu z warstwą SiO_2 powodują powstanie tzw. fazy szklistej. Utworzenie jej ułatwia proces spiekania, gdyż umożliwia powstanie dobrze zagęszczonych spieków. Powstanie fazy szklistej pogorsza właściwości ceramiki azotowej w wysokiej temperaturze, szczególnie w procesie skrawania stali, które tworzą wióry wstęgowe. W temperaturze wyższej niż 1470K powstaje krzemek żelaza, który prowadzi do intensywnego zużycia chemicznego ostrza skrawającego [32].

Właściwości skrawne ceramiki azotkowej poprawiają się poprzez wprowadzenie dodatku ZrO_2 lub whiskerów SiC. Wymienione dodatki korzystnie oddziałują na wzrost twardości i odporności na zużycie ścierne Si_3N_4 [67]. Na rys. 2.26a przedstawiono mikrostrukturę ceramiki azotkowej.



Rys. 2.26. Mikrostruktura ceramiki Si_3N_4 a), płytki skrawające z Si_3N_4 b) [83, 78]

Ostrza skrawające ze spiekanej ceramiki azotkowej znajdują zastosowanie w toczeniu i frezowaniu takich materiałów jak: żeliwo szare, żeliwo sferoidalne, żeliwo stopowe oraz stopy na osnowie niklu [21, 32]. Ceramika azotkowa jest wyraźnie ukierunkowana na obróbkę żeliwa z dużą prędkością skrawania $v_c=400\div 1000$ m/min, a nawet wyższą [25]. Należy dodać, że ceramika azotkowa może być również używana w warunkach, gdzie występują silne obciążenia udarowe, a głębokość skrawania może wynosić nawet do $\frac{3}{4}$ długości krawędzi skrawającej [58]. Narzędzia z ceramiki azotkowej produkowane są w postaci płytek wielostrzowych prawie przez wszystkie firmy narzędziowe, m.in.: Sandvik Coromant (rys. 2.26b), Sumitomo, SECO, Walter, Kennametal [79, 80, 81, 82].

2.4.3. CBN (PCBN) jako materiał supertwardy

Do materiałów supertwardych stosowanych w obróbce skrawaniem zalicza się: regularny azotek boru i diament. Podobnie jak cermetale i węgliki spiekane należą one do grupy materiałów ceramicznych, jednak można wyodrębnić dodatkową grupę tzw. materiałów supertwardych. Jest to spowodowane ich znacznie większą twardością, zdecydowanie przewyższającą pozostałe ceramiczne materiały narzędziowe [6]. Regularny (sześcienny) azotek boru (CBN) (rys. 2.27) jest wytwarzany w technologii podobnej do wytwarzania diamentu syntetycznego, a więc wymagającej dużych ciśnień, wysokiej temperatury i obecności katalizatorów [6]. Jest drugim (po diamencie) najtwardszym materiałem narzędziowym.



Rys. 2.27. Płytki z regularnego azotku boru [78, 72, 71].

Posiada większą odporność chemiczną i przy ciśnieniu atmosferycznym jest odporny na utlenianie nawet do temperatury 2200°C. Warstwa azotku boru jest łączona dyfuzyjnie z podłożem z twardych spieków i najczęściej stosuje się dwustronne płytki o różnych kształtach [56]. Twardość CBN w skali Knoop wynosi około 4800 HK [47]. Zaletą tego materiału narzędziowego jest możliwość obróbki stali twardych (do 70 HRC) oraz żeliw po ich utwardzeniu [56]. Do obróbki odlewów żeliwnych wykorzystuje się ostrza z CBN głównie w obróbce wykończeniowej [20]. Nową technologią wytwarzania narzędzi do obróbki twardych materiałów jest pokrywanie ostrzy warstwą polikrystalicznego diamentu (PD) o grubości od kilku do kilkunastu mikrometrów. Stosowane jest m.in. pokrywanie metodą PVD i metodą wzrostu warstwy diamentowej [56]. Rozwój CBN otworzył możliwość stosowania tego materiału narzędziowego do toczenia i frezowania, poprawiając tym samym wydajność i redukując koszty produkcji [50].

2.5. PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 2

Od dziesiątków lat żeliwo należy do jednych z powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych w przemyśle metalowym. Żeliwo szare zyskało tak dużą popularność dzięki niskim kosztom produkcji, niskiej temperaturze topnienia, dobrym właściwościom wytrzymałościowym, dobrej zdolności do tłumienia drgań oraz dobrej skrawalności [17]. Ocena ostatniej wymienionej właściwości ma bardzo istotne znaczenie dla konstruktorów, jak i technologów. Dobra skrawalność materiału powoduje, że często upraszcza się proces technologiczny, dzięki czemu w konsekwencji zmniejszają się same koszty produkcji. Jednak najczęściej spotykanym problemem w obróbce żeliwa są duże różnice skrawalności poszczególnych partii materiału [53].

Stawianie wysokich wymagań przez konsumentów doprowadza do rozwoju materiałów żeliwnych. Stosowanie żeliwa szarego jest nadal bardzo popularne, lecz coraz częściej wykorzystuje się nowoczesne odmiany żeliwa takie jak: żeliwo sferoidalne, żeliwo ADI czy żeliwo wermikularne. Do obróbki wymienionych materiałów zaleca się stosować materiały narzędziowe o większej trwałości, takie jak: węgliki spiekane powlekane wielowarstwowo, ceramikę azotkową oraz materiały supertwarde z regularnego azotku boru CBN. Użycie azotku krzemu umożliwia skrawanie z dużymi prędkościami, nieosiągalnymi z zastosowaniem płytek skrawających z węglików spiekanych, co potwierdzają badania przedstawione w rozdziale 2.1. W przypadku obróbki żeliwa ostrzami z CBN otrzymano większą trwałość ostrza, jak i lepszą jakość powierzchni (Ra) w porównaniu z ostrzami na bazie węglików spiekanych. Bardzo istotny jest też wpływ powłok stosowanych na ostrza skrawające, które przyczyniają się do wydłużenia czasu pracy ostrza oraz poprawy jakości otrzymanej powierzchni.

Podczas optymalizacji procesu skrawania bardzo istotne jest uwzględnienie oddziaływań mechanicznych i termicznych. Z tego powodu bardzo duże znaczenie ma problem wysokiej temperatury w strefie kontaktu, która negatywnie wpływa na trwałość ostrza. Dlatego w ostatnich latach powstało wiele technik mających na celu jak najdokładniejsze określenie rozkładu temperatury w narzędziu, materiale obrabianym i wiórze. Pomimo tego, badania doświadczalne pomiaru temperatury w strefie skrawania przysparzają naukowcom, jak i inżynierom wiele problemów technicznych.

3. CEL I ZAKRES PRACY

Na podstawie analizy literaturowej dokonanej w rozdziale 2 stwierdzono, że żeliwo sferoidalne ze względu na korzystne właściwości użytkowe coraz częściej jest materiałem konkurencyjnym w stosunku do stali. Biorąc pod uwagę korzystne prognozy co do udziału żeliwa sferoidalnego w różnych gałęziach przemysłu, celowe jest przeprowadzenie kompleksowych badań z zastosowaniem zaawansowanych materiałów narzędziowych (niepokrywanej ceramiki azotkowej, pokrywanej ceramiki azotkowej i regularnego azotku boru). Badania procesu przeprowadzono stosując nowoczesne techniki pomiaru sił składowych oraz rejestracji rozkładu temperatury w strefie skrawania za pomocą kamery termowizyjnej. W ten sposób uzyskano wiele ważnych informacji na temat oddziaływań mechanicznych i termicznych w procesie skrawania żeliwa sferoidalnego.

3.1. ELEMENT NOWOŚCI W PRACY

W niniejszej pracy elementem nowości jest zastosowanie ostrzy skrawających z regularnego azotku boru o handlowym oznaczeniu CB7015 do toczenia żeliwa sferoidalnego EN-GJS-500-7.

3.2. TEZA NAUKOWA PRACY

Teza naukowa pracy została sformułowana następująco:

Zastosowanie zaawansowanych materiałów narzędziowych z grupy materiałów ceramicznych i regularnego azotku boru o zbliżonych właściwościach termofizycznych, powoduje polepszenie skrawalności żeliwa sferoidalnego.

3.3. CEL PRACY

Zgodnie z analizą literaturową wpływ parametrów technologicznych oraz rodzaju materiału ostrza może przyczynić się do poprawy skrawalności żeliwa sferoidalnego, a w konsekwencji do zwiększenia wydajności procesu skrawania.

Za cel pracy przyjęto określenie wpływu rodzaju materiału ostrza narzędzia skrawającego oraz parametrów skrawania na przebieg procesu skrawania żeliwa sferoidalnego. W rezultacie do badań doświadczalnych zastosowano ostrza skrawające z niepokrywanej ceramiki azotkowej, pokrywanej ceramiki azotkowej i CBN. Cel pracy osiągnięto na drodze realizacji badań doświadczalnych, podczas których mierzono takie charakterystyki procesu jak: składowe siły skrawania, długość kontaktu wiór – ostrze, rozkład temperatury w strefie skrawania oraz chropowatość powierzchni.

3.4. ZAKRES PRACY

Zakres pracy obejmował:

- Przeprowadzenie analizy literaturowej w zakresie:
 - stanu dotychczasowych badań doświadczalnych obróbki żeliw ciągliwych ostrzami z różnych materiałów narzędziowych,
 - identyfikacji podstawowych oddziaływań mechanicznych i termicznych w procesie skrawania,
 - podziału, właściwości, skrawalności i zastosowania żeliw,
 - charakterystyki i zastosowań zaawansowanych materiałów narzędziowych.
- Przeglądu zaleceń warunków obróbki według różnych producentów narzędzi skrawających.
- Przygotowanie stanowiska badawczego.
- Przeprowadzenie podstawowych badań doświadczalnych w celu identyfikacji standardowych charakterystyk procesu (składowych sił skrawania, energii właściwej skrawania, rozkładu temperatury w strefie skrawania).
- Zakres pracy rozszerzono o pomiary chropowatości powierzchni 2D i 3D uzyskanej po toczeniu dokładnym żeliwa sferoidalnego.
- Określenie wpływu parametrów skrawania (prędkości skrawania i posuwu) oraz materiału ostrza na przebieg procesu skrawania.
- Opracowanie statystyczne i graficzne otrzymanych wyników.
- Sformułowanie wniosków końcowych.

4. METODYKA BADAŃ PROCESU SKRAWANIA

4.1. STANOWISKA BADAWCZE I URZĄDZENIA POMIAROWE

4.1.1. Stanowisko do prób toczenia

Podstawowe badania procesu skrawania przeprowadzono na 3-osiowej tokarce numerycznej Transmab 450 TD firmy Somab (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Tokarka numeryczna firmy Somab (maksymalna moc napędu głównego 30 kW, maksymalna prędkość obrotowa – 3500 obr/min, zakres ruchów (x, z) – 500x1100 mm, magazyn narzędziowy na 12 narzędzi)

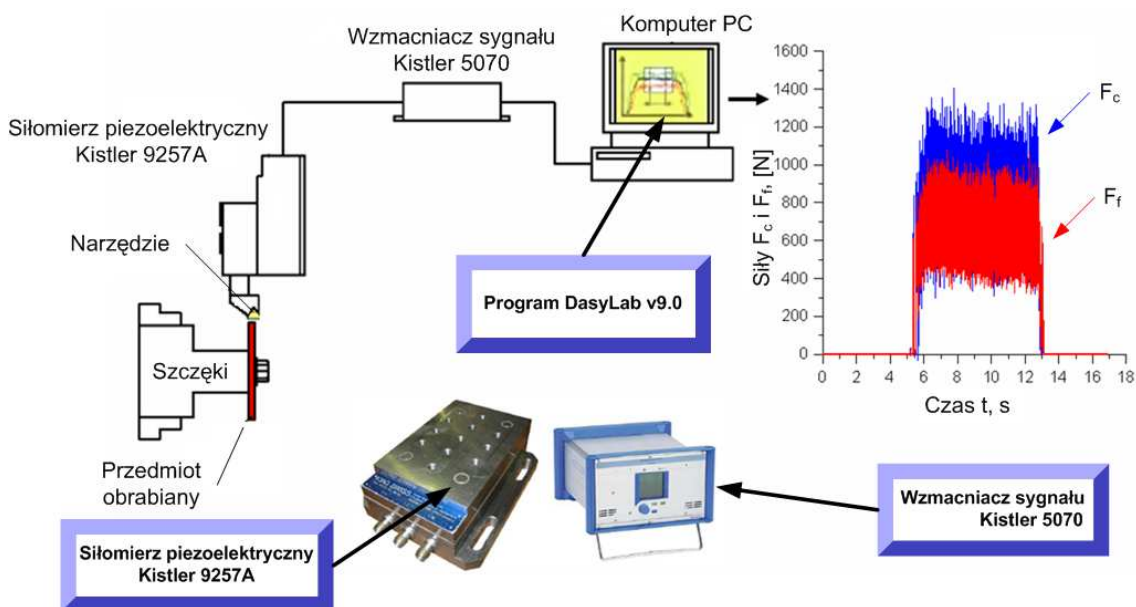
Powierzchnie do pomiarów chropowatości wykonano na obrabiarce wielozadaniowej CNC firmy Okuma Genos 200L (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Obrabiarka wielozadaniowa Okuma Genos 200L (maksymalna moc napędu głównego 7,5 kW, maksymalna prędkość obrotowa – 3000 obr/min, zakres ruchów (x, z) – 200x380 mm, magazyn narzędziowy na 12 narzędzi)

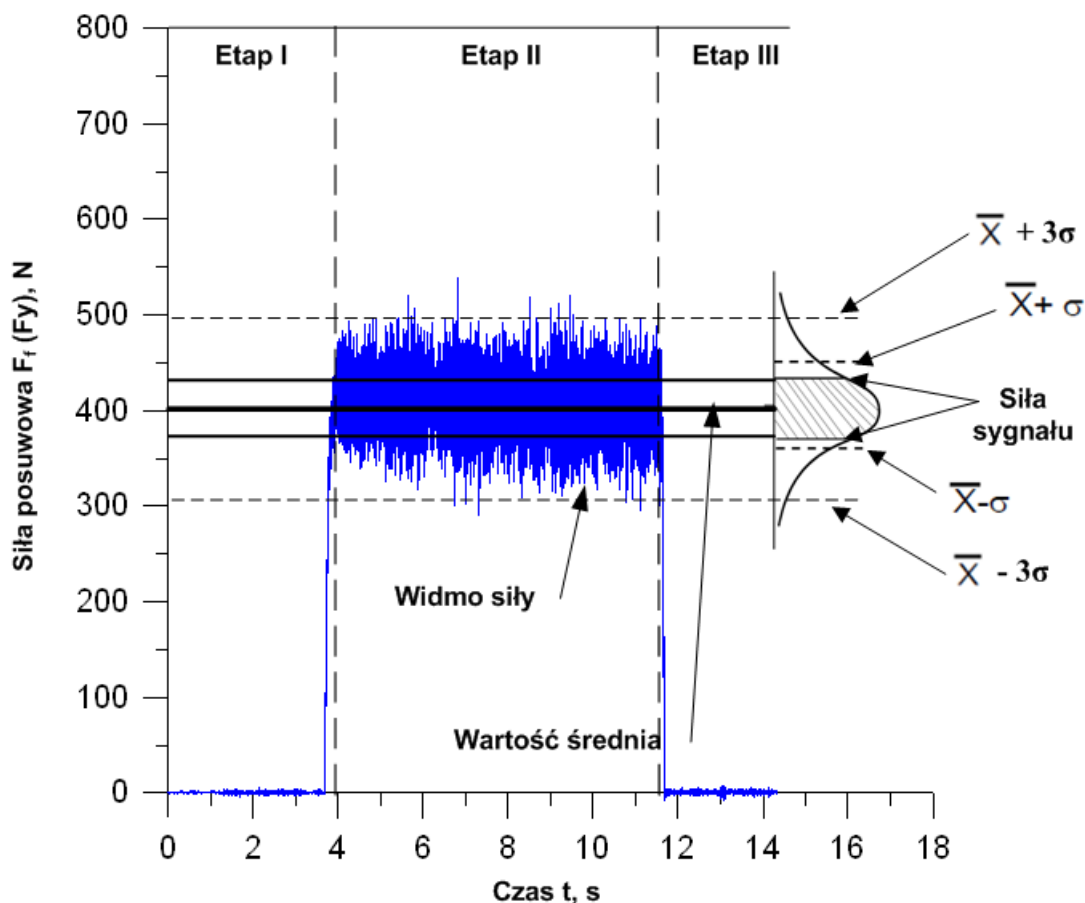
4.1.2. Pomiar składowych sił skrawania

Do pomiaru składowych sił skrawania F_c i F_f użyto siłomierza piezoelektrycznego firmy Kistler model 9257A (rys. 4.3). Jest to trójskładowy piezoelektryczny siłomierz, który znajduje zastosowanie do pomiaru sił w procesie skrawania (toczeniu, frezowaniu). Do zalet siłomierza należą: zwarta konstrukcja, duża sztywność, odporność na wpływ temperatury, zabezpieczenie przed wyptywami cieczy obróbkowych [73]. Sygnał z siłomierza przekazywano w trybie on-line przez wzmacniacz Kistler 5070 do komputera PC z zainstalowanym oprogramowaniem National Instruments LabView 6i. Wszystkie zarejestrowane dane zapisano do pliku źródłowego.



Rys. 4.3. Tor pomiarowy do pomiaru składowych sił skrawania

Z uzyskanego pliku za pomocą programu graficznego wygenerowano wykres widma sił. Dla przykładu przedstawiono w jaki sposób wyznaczono średnią wartość siły posuwowej F_f na rys. 4.4 dla pojedynczego pomiaru. Analizując rys. 4.4 można, wyróżnić trzy charakterystyczne etapy przebiegu składowej siły skrawania. W pierwszym etapie następuje wejście narzędzia w materiał obrabiany. W drugim mamy do czynienia ze stałą pracą narzędzia skrawającego. W ostatnim etapie następuje wyjście narzędzia skrawającego z materiału obrabianego. Najistotniejszym etapem w przykładowym przebiegu siły jest etap drugi, dlatego z niego wyznaczono średnią wartość siły F_f .

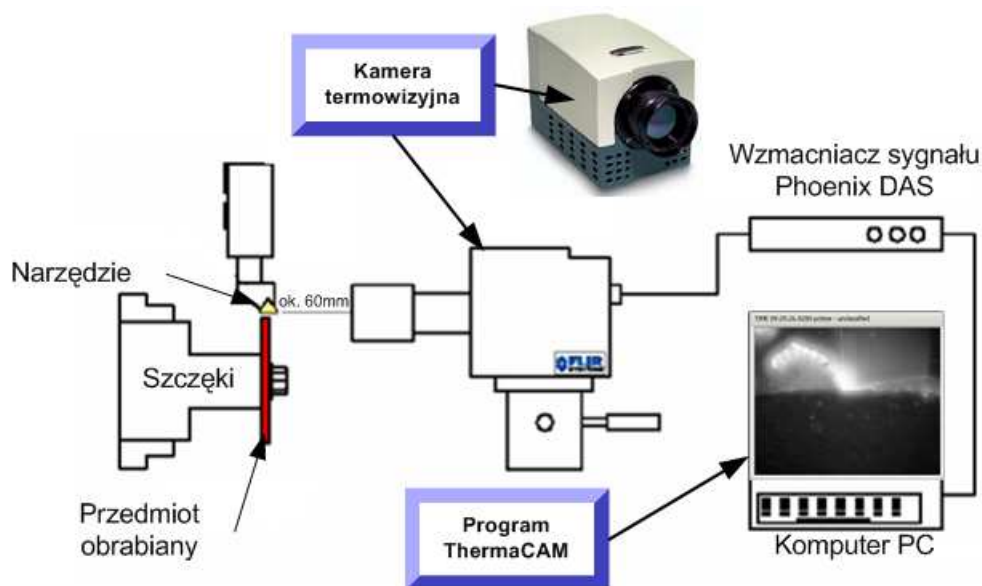


Rys. 4.4. Zarejestrowany przebieg widma siły

Ostatnią częścią analizy otrzymanych wyników było obliczenie odchylenia standardowego σ oraz wyznaczenie przedziałów ufności za pomocą rozkładu normalnego. Wyznaczone przedziały ufności dostarczają informacji na temat stabilności procesu skrawania. Duże przedziały ufności będą świadczyć o zaburzeniach wartości sił w procesie skrawania. Należy dodać, że w przebiegu widma siły występuje również składowa przypadkowa, która wynika z charakteru odkształceń w strefie poślizgu.

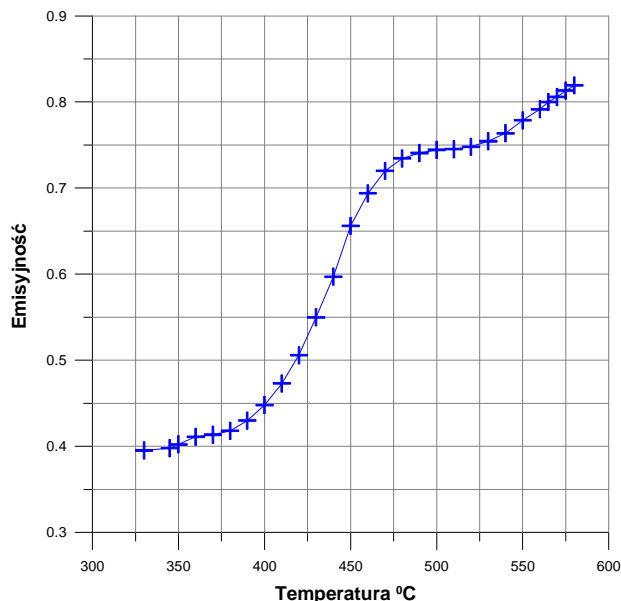
4.1.3. Pomiar rozkładu temperatury w strefie skrawania

Do rejestracji rozkładu temperatury w strefie skrawania podczas toczenia ortogonalnego użyto kamery termowizyjnej ThermaCAMTM Phoenix firmy Flir System (rys. 4.5). Nowoczesna kamera termowizyjna Phoenix znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle oraz w nauce, wszędzie tam, gdzie niezbędne są takie właściwości jak: najwyższa elastyczność i niezawodność. Użyta kamera IR charakteryzuje się dużą częstotliwością zapisu oraz doskonałą rozdzielczością otrzymanego obrazu. Ma przy tym stosunkowo niewielkie rozmiary [68].



Rys. 4.5. Pomiar rozkładu temperatury w strefie skrawania

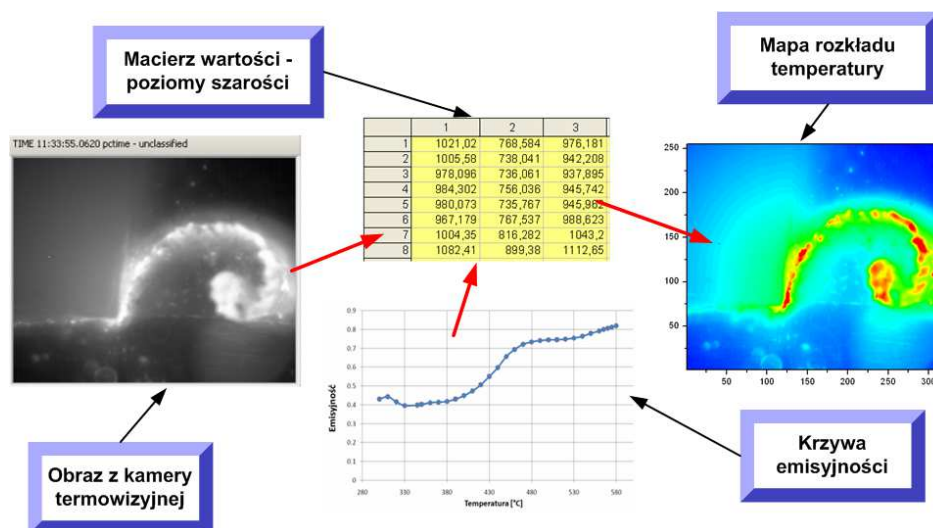
Kamera IR ma możliwość rejestracji obrazów o rozdzielczości 320×255 pikseli, co pozwala uzyskać czytelny obraz rozkładu temperatury. Do wyznaczenia temperatury kontaktowej wykorzystano zmianę emisyjności żeliwa sferoidalnego w funkcji temperatury wyznaczonej w pracy [12]. Najbardziej istotny zakres zmian emisyjności obejmował temperatury z przedziału $320 \div 580^\circ\text{C}$ (rys. 4.6) [12].



Rys. 4.6. Emisyjność żeliwa sferoidalnego EN-GJS-500-7 w funkcji temperatury [65]

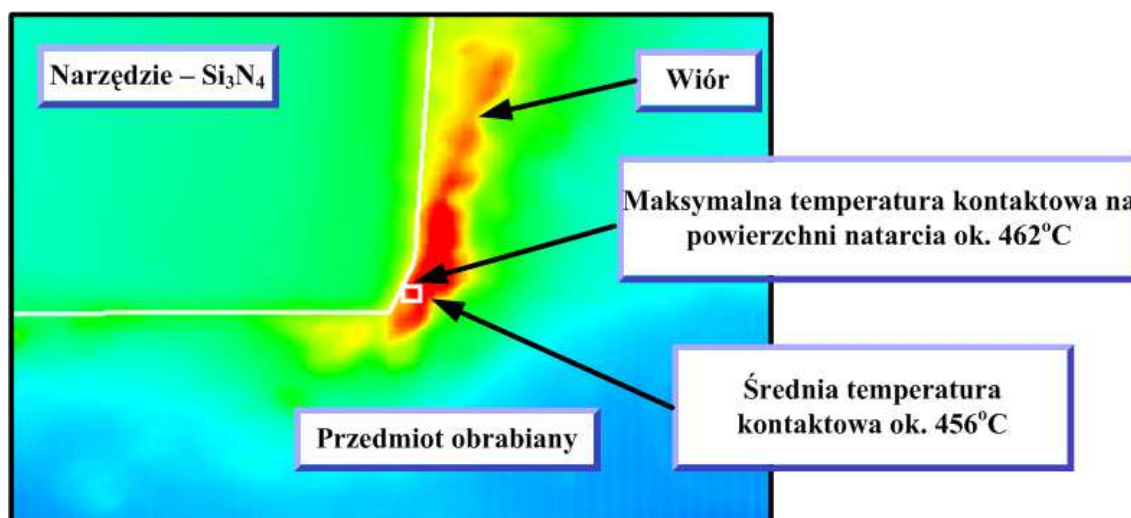
Programem odpowiedzialnym za rejestrację obrazu podczas skrawania był ThermoCAM RDAS przeznaczony do grupy kamer IR firmy Flir System. Sama analiza otrzymanego obrazu odbywała się za pomocą programu ThermoCAM RTools. Efektem finalnym było otrzymanie macierzy (320×255) ze stopniami szarości oraz

czarno-białego obrazu rozkładu stopni szarości (ang. grey levels). Proces wygenerowania kolorowej mapy rozkładu temperatury przedstawiono na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Etapy uzyskania kolorowej mapy rozkładu temperatury

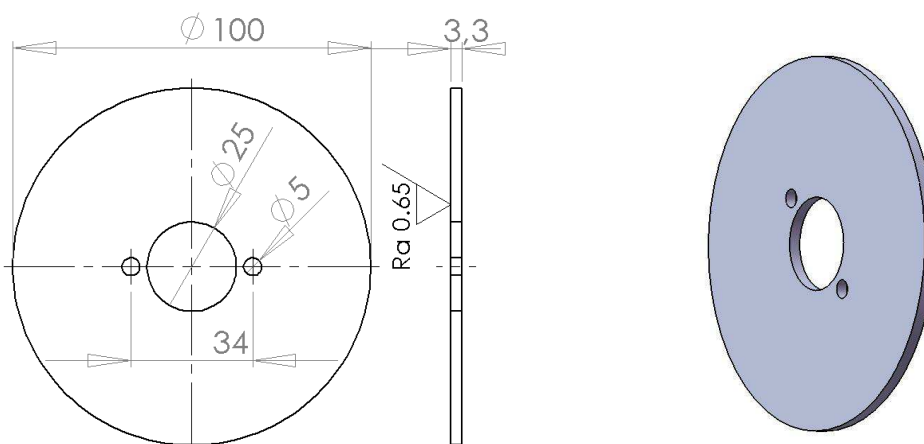
Wartość średniej temperatury kontaktowej wyznaczono za pomocą wydzielenia z mapy rozkładu temperatury obszaru 2x2 piksele (rys. 4.8). Następnie z danego obszaru zlokalizowanego w odległości 20÷30 μm od krawędzi skrawającej, wyliczono wartość średniej temperatury kontaktowej oraz określono maksymalną temperaturę kontaktową. Dla pojedynczego pomiaru (np. dla $v_c=400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm) wygenerowano 5 map rozkładu temperatury. Na ich podstawie wyznaczono wartości poszczególnych temperatur (t_{sr} , t_{max}) w strefie skrawania. Ostatnim etapem była analiza statystyczna. Obliczono średnie odchylenie kwadratowe, następnie korzystając z rozkładu t-Studenta wyznaczono przedział ufności (przyjęto poziom ufności $P=0,95$).



$v_c = 400\text{m/min}$, $f = 0.12$ mm/obr, $a_p = 3.3$ mm

Rys. 4.8. Obszar pomiaru temperatury uzyskany z kamery IR

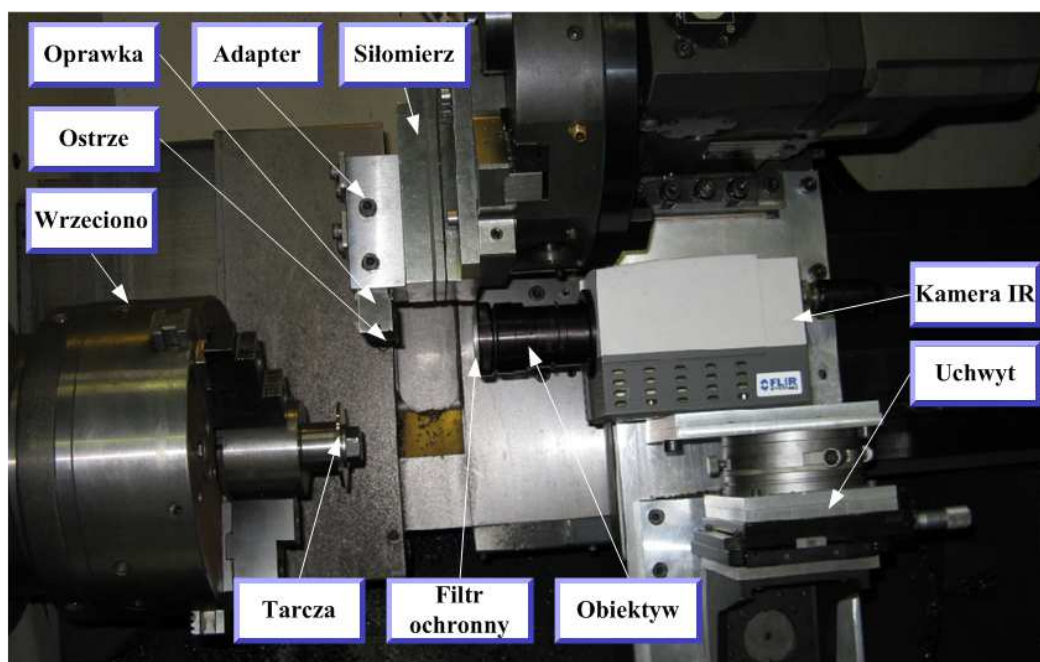
Do badań rozkładu temperatury przygotowano specjalne tarcze o wymiarach jak pokazano na rys. 4.9. Chropowatość rejestrowanej powierzchni wynosiła $Ra = 0,64 \mu\text{m}$ i była taka sama jak chropowatość próbki użytej podczas kalibracji kamery IR. Grubość tarczy wynika z faktu, że jest to optymalny wymiar, dla którego podczas prób toczenia tarcza nie ulegała deformacji. Zamontowaną w uchwycie tarczę przedstawiono na rys. 4.10.



Rys. 4.9. Tarcza – przedmiot obrabiany

4.1.4. Stanowisko do prób toczenia ortogonalnego

Stanowisko badawcze z zainstalowanym siłomierzem oraz kamerą termowizyjną przedstawiono na rys. 4.10. Kamera znajdowała się w odległości około 60 mm od ostrza skrawającego. Uchwyt gwarantował bardzo dużą sztywność układu IR kamera IR – głowica oraz możliwość dokładnego ustawienia kamery względem narzędzia.



Rys. 4.10. Widok stanowiska badawczego [29]

4.1.5. Stanowisko do pomiaru długości styku i pola kontaktu

Ważnym aspektem w procesie badania przebiegu skrawania jest zmierzenie długości styku i pola kontaktu. Wyznaczenie tych wartości pozwala ocenić zjawiska zachodzące w strefie kontaktu wiór-ostrze.

Do wizualizacji ostrza wykorzystano mikroskop optyczny firmy Leica MZ12.5 (rys. 4.11) ze zintegrowaną kamerą cyfrową, który jest podłączony do komputera PC. Leica MZ12.5 jest wysokiej klasy mikroskopem stereoskopowym, który znajduje zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, tam gdzie wymagane jest uzyskanie obrazów o wysokiej rozdzielczości [74].

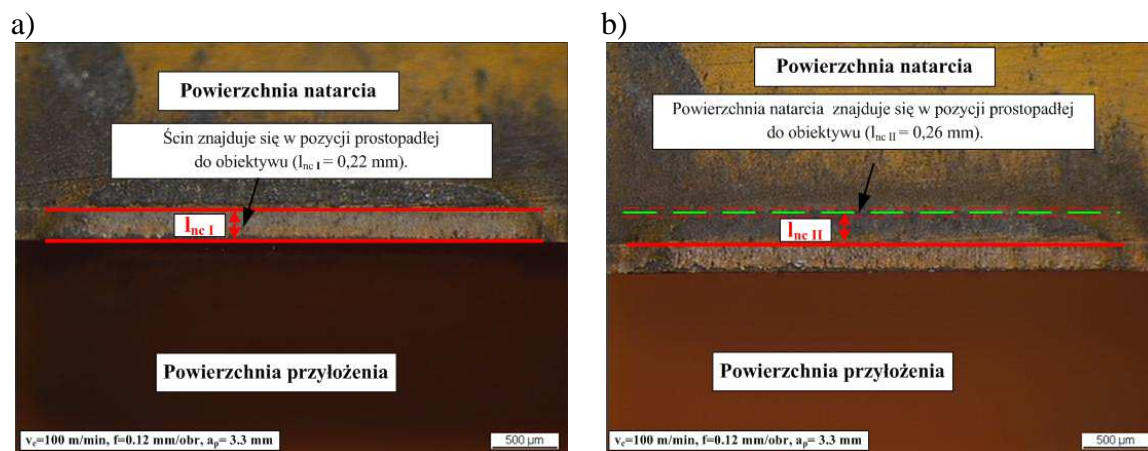
Obraz zarejestrowany przez kamerę jest przetwarzany (skalowanie, korekcja kontrastu, filtracja kolorów) w komputerze dzięki zainstalowanemu oprogramowaniu Leica Application Suite (version 1.4.0).



Rys. 4.11. Kolejne etapy wyznaczania długości styku i pola kontaktu

Wyznaczenie granic pola kontaktu i długości styku w strefie wiór-ostrze wykonano w dwóch etapach. W pierwszym etapie ostrze skrawające ustawiono w pozycji, w której fazka technologiczna znajdowała się prostopadle do obiektywu. Dla takiej pozycji zmierzono długość kontaktu i pole kontaktu (rys. 4.12a). W następnym etapie ostrze skrawające ustawiono tak, aby powierzchnia natarcia była prostopadła (rys. 4.12b) do obiektywu. Wykonano takie same pomiary jak w części pierwszej. Długość kontaktu oraz pole kontaktu jest sumą wartości liczbowych otrzymanych w etapie pierwszym i drugim. W przypadku ostrza z pokrywanej ceramiki azotkowej przedstawionego na rys 4.12 ($v_c=100$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm) zmierzone wartości wyniosły $I_{nc} = I_{nc I} + I_{nc II} = 0,22 + 0,26 = 0,48$ mm, co jest średnią wartością długości styku. Należy dodać, że ze względów ekonomicznych dla ostrzy z CBN nie zmierzono długości styku ani pola kontaktu. Każdy pomiar powtórzono pięciokrotnie.

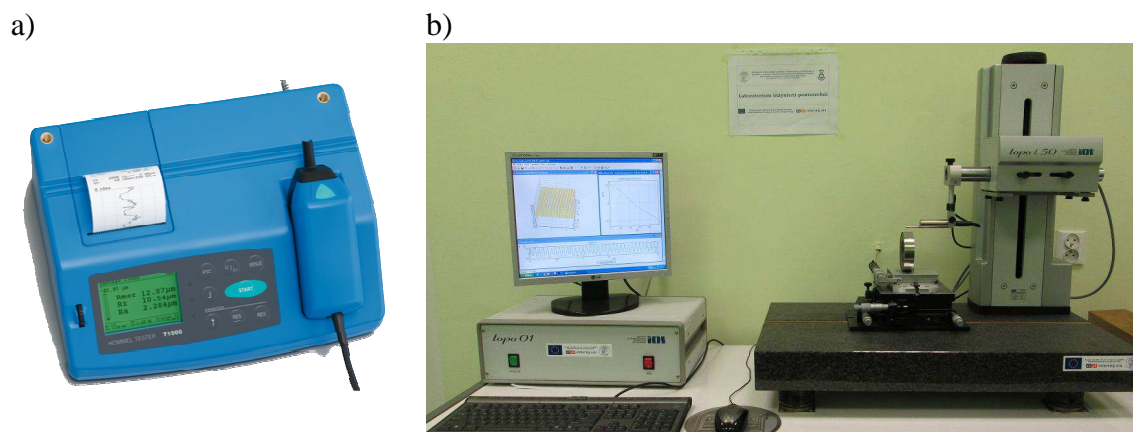
Po zmierzeniu danego ostrza obliczono średnie odchylenie kwadratowe, następnie korzystając z rozkładu t-Studenta wyznaczono przedział ufności (przyjęto poziom ufności $P=0,95$).



Rys. 4.12. Metodyka wyznaczenia długości styku l_{nc}

4.1.6. Pomiar chropowatości 2D i 3D

Badania chropowatości powierzchni polegały na odwzorowaniu powierzchni obrobionej za pomocą profilografometru Hommel Tester T – 1000 (rys. 4.13a), a w przypadku pomiarów 3D profilometru TOPO 01P (rys. 4.13b).



Rys. 4.13. Profilografometr Hommel Tester T – 1000 a), profilometr TOPO 01P b)

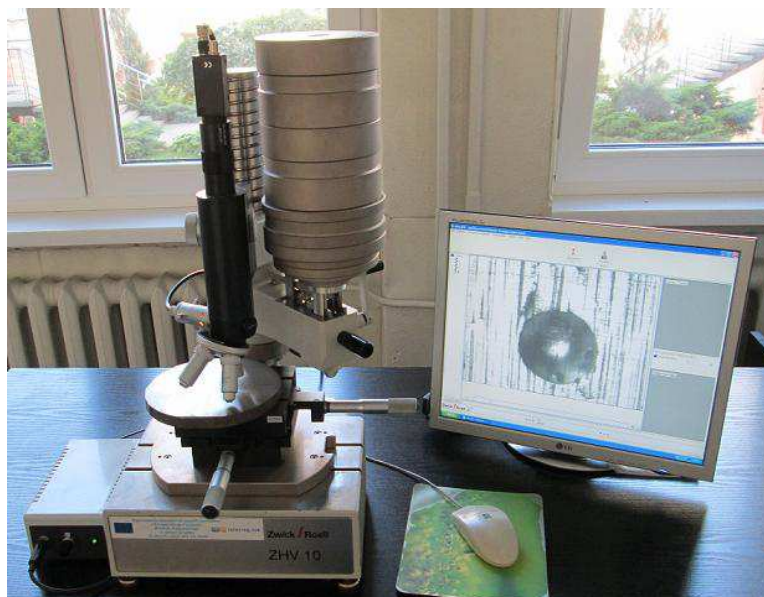
Profilografometr Hommel Tester T – 1000 jest przenośnym urządzeniem przeznaczonym do pomiaru chropowatości, który umożliwia również uzyskanie danych dotyczących falistości. Profilografometr Homel Tester T – 1000 umożliwia rejestrację w postaci profilografu sygnałów przemieszczania się igły po mierzonej powierzchni oraz jego wzmocnienie. Pomiar chropowatości przeprowadzono w pięciokrotnych próbach na obwodzie przedmiotu obrabianego. Po zrealizowaniu pomiarów obliczono

średnie odchylenie kwadratowe, następnie korzystając z rozkładu t-Studenta wyznaczono przedział ufności (przyjęto poziom ufności $P=0,95$).

Pomiar chropowatości 3D wykonano na profilometrze TOPO 01P z igłą diamentową o promieniu około $2\ \mu\text{m}$, który umożliwia pomiar parametrów 2D i 3D. Modułowy system TOPO 01P umożliwia kompletowanie stanowiska do pomiaru i analizy struktury geometrycznej powierzchni, w zależności od wymagań i potrzeb użytkowników. Z modułów systemu można stworzyć przyrządy przeznaczone do pomiarów chropowatości, falistości i profilu pierwotnego. Profilometr TOPO 01P jest urządzeniem przeznaczonym do laboratoryjnych pomiarów struktury geometrycznej powierzchni o bardzo dużych możliwościach pomiarowych oraz szerokim zakresie analizy wyników pomiarów [70]. Estymacji parametrów chropowatości dokonano na skanowanych obszarach $2,4\ \text{mm} \times 2,4\ \text{mm}$, a przemieszczenia podczas próbkowania były równe $\Delta x=0,5\ \mu\text{m}$ i $\Delta y=12,4\ \mu\text{m}$. Obliczenia i wizualizację danych pomiarowych, w tym topografii powierzchni, prowadzono w programie *Mountains Map v.6* firmy *Digital Surf*.

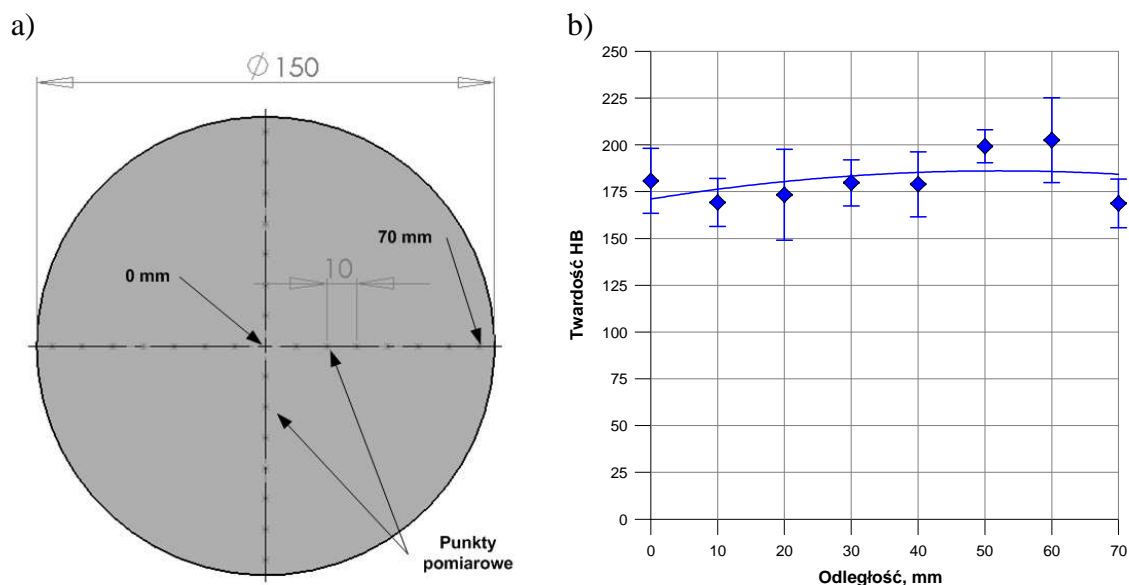
4.1.7. Stanowisko do pomiaru twardości

Twardość jest jedną z bardzo istotnych własności materiału z konstrukcyjnego i technologicznego punktu widzenia. Definiuje się ją w następujący sposób: twardość jest to odporność materiału na trwałe odkształcenie, które powstaje wskutek działania sił skupionych na małą powierzchnię materiału, wywołane przez wciskanie odpowiedniego wgłębnika [63]. Pomiar twardości sposobem Brinella polega na wciskaniu w określonym czasie w badaną próbkę (pod działaniem siły obciążającej, przyłożonej prostopadle do jej powierzchni) twardej kulki stalowej (lub z węglików spiekanych). Twardość określa się na podstawie średnicy odcisku kulki, zmierzonej po jej odciążeniu [85]. Badania twardości żeliwa sferoidalnego przeprowadzono na twardościomierzu ZHV 10 Zwick/Roell (rys. 4.14). Do pomiaru twardości przygotowano krążek o średnicy $\varnothing 150\ \text{mm}$ i grubości $20\ \text{mm}$, na którego powierzchni naniesiono dwie linie wzajemnie do siebie prostopadłe. Odległość pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi wynosiła $10\ \text{mm}$. Przed przystąpieniem do pomiaru twardości ustalono warunki pomiaru. Dobrano kulkę o średnicy $D=1\ \text{mm}$ oraz przyjęto wartość współczynnika K (stała obciążenia) $K=30$, co jest zgodne z normą [85].



Rys. 4.14. Twardościomierz ZHV 10 Zwick/Roell

Na rys 4.15a przedstawiono przygotowaną próbkę do pomiarów twardości wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi oraz wyniki badań z przeprowadzonych prób twardości żeliwa sferoidalnego (rys. 4.15b).



Rys. 4.15. Próbkę do pomiarów twardości a). Wynik z przeprowadzonych prób twardości metodą Brinella b)

Na podstawie wykonanych badań (rys. 4.15a) stwierdzono, że średnia twardość żeliwa sferoidalnego EN-GJS-500-7 wyniosła około 180 HB i jest zgodna z wartościami podanymi w odpowiednich normach [84].

4.2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁU OBRABIANEGO

Badania doświadczalne przeprowadzono na próbkach z żeliwa sferoidalnego perlityczno-ferrytycznego o symbolu EN-GJS-500-7 zawierającego około 50% perlitu, 40% ferrytu i 10% grafitu. Skład chemiczny obrabianego materiału przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1

Skład chemiczny żeliwa sferoidalnego [36]

Składnik stopowy	C	Si	Cu	Mg	Mn	P	S	Cr	Zn
[%] at.	3,78	2,46	0,01	0,05	0,32	0,038	0,065	0,031	0,004

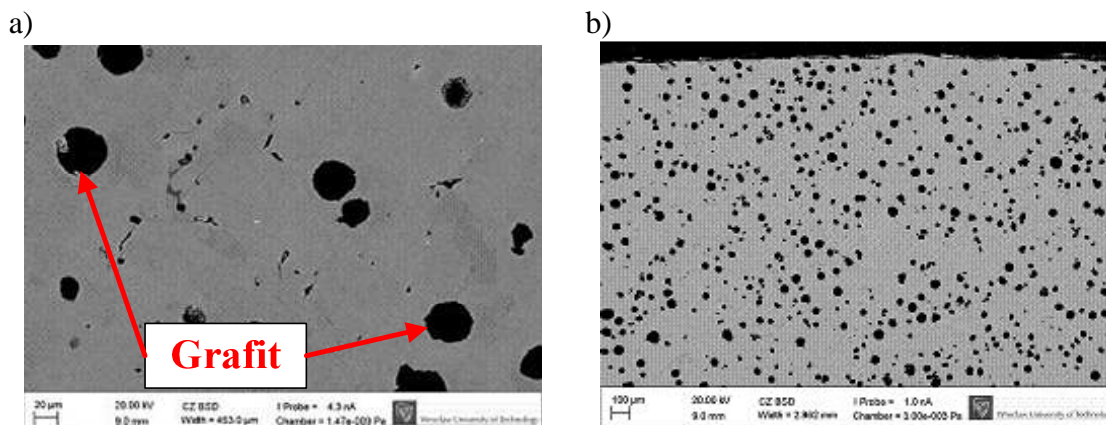
W tabeli 4.2 podano właściwości mechaniczne żeliwa sferoidalnego dostarczone przez producenta – odlewnię żeliwa w Hucie Małapanew w Ozimku. Wartości właściwości mechanicznych podanych w atencie są zbliżone do danych literaturowych, jedynie wartość wydłużenia A jest dwa razy większa w porównaniu z danymi wg [10].

Tabela 4.2

Właściwości mechaniczne badanego żeliwa

Symbol	R _m , MPa	R _e , MPa	Twardość, HB	Wydłużenie A ₅ , %
EN-GJS-500-7	507	356	180	16,3

Obraz mikrostruktury żeliwa sferoidalnego przedstawiono na rys. 4.16. Wykonano go za pomocą mikroskopu elektronowego ZEISS EVO MA25. Zdjęcie skaningowe żeliwa EN-GJS-500-7 potwierdza obecność kulistego grafitu. Rozmieszczenie grafitu w materiale jest nieregularne.



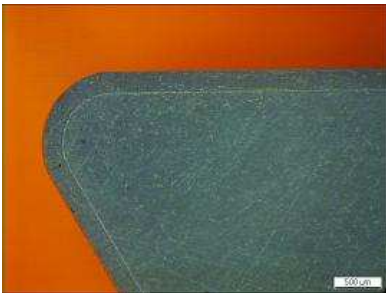
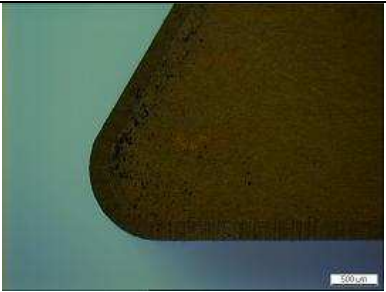
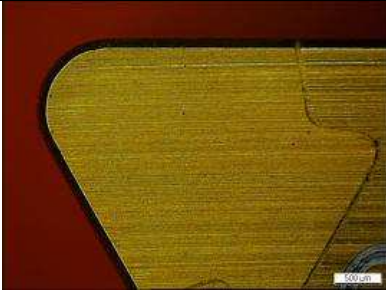
Rys. 4.16. Zdjęcia skaningowe mikrostruktury żeliwa sferoidalnego perlityczno-ferrytycznego powiększenie: a) x633, b) x100

4.3. CHARAKTERYSTYKA NARZĘDZI UŻYTYCH W EKSPERYMENCIE

Do badań doświadczalnych skompletowano narzędzia z niepokrywanej ceramiki azotkowej (CN), pokrywanej ceramiki azotkowej (CC) i CBN (BL). Producentem wszystkich testowanych narzędzi była firma Sandvik Coromant. W tabeli 4.3 przedstawiono gatunki użytego materiału narzędziowego.

Tabela 4.3

Materiały narzędziowe firmy Sandvik Coromant


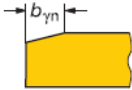
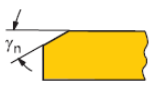
SANDVIK COROMANT	
	CC6090 (K10) – jest to gatunek spieku ceramicznego z czystego azotku krzemu, który zapewnia dobrą odporność na ścieranie w wysokich temperaturach. Znajduje zastosowanie od obróbki zgrubnej do wykończeniowej żeliwa szarego, z dużą prędkością skrawania [46].
	GC1690 (K10) – jest to gatunek azotku krzemu, na którym naniesiono powłokę Al_2O_3 -TiN o grubości 1 μm . Ze względu na swoje właściwości zalecany jest do obróbki: zgrubnej, kształtującej i wykończeniowej żeliwa [46].
	CB7015 – jest to gatunek o małej zawartości regularnego azotku boru, zapewniający dużą wydajność procesu [46]. Znajduje zastosowanie do obróbki wykończeniowej.

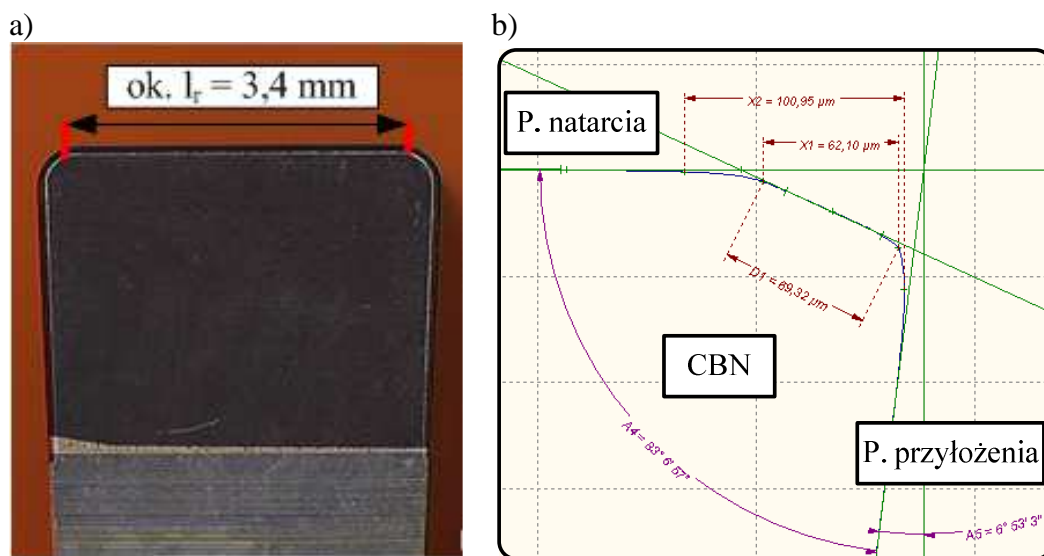
W próbach toczenia ortogonalnego użyto ostrza o dwóch różnych geometriach, czego konsekwencją było użycie odpowiednich oprawek nożowych. Dla ostrzy z ceramiki azotkowej (CC6090 i GC1690) wykorzystano płytki trójkątne o geometrii TNGA 160408 T02520. W przypadku narzędzia z regularnego azotku boru zastosowano ostrze o oznaczeniu N123H1 040004 S01025. W tym przypadku długość roboczej krawędzi skrawającej z CBN wynosiła około 3,4 mm (rys. 4.17a).

W próbach toczenia wzdłużnego użyto płytki trójkątne z CBN o geometrii TNGA 160408 S01030. W przypadku narzędzi ceramicznych zastosowano taką samą geometrię jak dla prób toczenia ortogonalnego. W tabeli 4.4 przedstawiono dodatkowe informacje na temat oznaczania użytych płytek ostrzowych.

Tabela 4.4

Charakterystyka ścinu technologicznego [78]

ISO	T S	Szerokość ścinu	Kąt ścinu
			
TNGA 160408 T02520	Ścin o ujemnym kącie natarcia.	$b_{\gamma_n} = 0,25 \text{ mm}$	$\gamma_n = 20^\circ$
N123H1 40004 S01025	Ścin o ujemnym kącie natarcia i zaokrąglonej krawędzi skrawającej ($r_n = 7 \div 10 \mu\text{m}$).	$b_{\gamma_n} = 0,10 \text{ mm}$	$\gamma_n = 25^\circ$
TNGA 160408 S01030	Ścin o ujemnym kącie natarcia i zaokrąglonej krawędzi skrawającej.	$b_{\gamma_n} = 0,10 \text{ mm}$	$\gamma_n = 30^\circ$



Rys. 4.17. Obraz ostrza N123H1 040004 S01025 a) powierzchnia natarcia, b) wyniki pomiaru zarysu ostrza

Podczas toczenia ortogonalnego zastosowano dwie oprawki nożowe. Do płytek ceramicznych (TNGA) użyto oprawki o oznaczeniu PTFNL 2020K16, a w przypadku narzędzia z CBN oprawkę typu LF 123H25–2020BM. Podczas toczenia wzdłużnego zastosowano oprawkę PTGNL 2020K16. W tabeli 4.5 przedstawiono charakterystyki użytych narzędzi tokarskich.

Tabela 4.5

Charakterystyki noży tokarskich użytych w badaniach

	Toczenie ortogonalne				Toczenie wzdłużne	
Typ płytki	TNGA 160408		N123H1 040004		TNGA 160408	
Typ oprawki	PTFNL 2020K16		LF123H25– 2020BM		PTGNL 2020K16	
Kąt natarcia	γ_n	-6°	γ_n	0°	γ_n	-6°
Kąt przyłożenia	α_n	6°	α_n	7° (rys. 4.17b)	α_n	6°
Kąt przystawienia główny	κ_r	$*91^\circ$	κ_r	90°	κ_r	91°
Kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej	λ_s	-6°	λ_s	0°	λ_s	-6°

*kąt został skorygowany na siłomierzu do 90°

4.4. WARUNKI BADAŃ

Doświadczenie przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie realizowano podstawowe badania toczenia ortogonalnego żeliwa sferoidalnego. Plan badań rozszerzono o toczenie wzdłużne ujęte w drugim etapie. W tabeli 4.6 przedstawiono parametry skrawania dla toczenia ortogonalnego i wzdłużnego.

Tabela 4.6

Warunki obróbki podczas toczenia ortogonalnego i toczenia wzdłużnego

Toczenie ortogonalne		Toczenie wzdłużne
L.p.	Parametry obróbki	Parametry obróbki
1.	$v_c=100, 160, 240, 280, 320, 400$ m/min $f=0,12$ mm/obr $a_p=3,3$ mm	$v_c=100, 160, 240, 280, 320, 400$ m/min $f=0,12$ mm/obr $a_p=0,8$ mm
2.	$v_c=240$ m/min $f=0,04; 0,08; 0,12; 0,16; 0,2; 0,24$ mm/obr $a_p=3,3$ mm	$v_c=320$ m/min $f=0,04; 0,08; 0,12; 0,16; 0,2$ mm/obr $a_p=0,8$ mm

Badania własne zrealizowano w oparciu o program statyczny, zdeterminowany, selekcyjny PS/DS-U wg Polańskiego [45].

W pierwszej części każdego z etapów parametrami stałymi były głębokość skrawania i posuw, zaś prędkość zmieniała się w ustalonym zakresie. W drugiej części parametrami stałymi była głębokość i prędkość skrawania, zaś zmiennym parametrem był posuw. Wszystkie próby toczenia były powtarzane dwukrotnie.

4.5. ALGORYTM OBLICZEŃ

Na rys. 4.18 przedstawiono algorytm według którego wyznaczono wszystkie charakterystyki procesu ujęte w pracy. Wyszczególnione wielkości w algorytmie z rys. 4.18 wyznaczono z następujących zależności:

– opór właściwy skrawania:

$$k_c = \frac{F_c}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.1)$$

– objętościowa wydajność skrawania:

$$Q_v = v_c \cdot f \cdot ap \quad [\text{cm}^3/\text{min}] \quad (4.2)$$

– mechaniczne obciążenie styku:

$$k_F = \frac{F_c}{l_{nc}} \quad [\text{N/mm}] \quad (4.3)$$

– liczba Pecleta:

$$Pe = \frac{v_{ch} \cdot l_{nc}}{\alpha_w} \quad [-] \quad (4.4)$$

– kąt tarcia:

$$\Theta_o = \arctg\left(\frac{F_f}{F_c}\right) + \gamma_o \quad [^\circ] \quad (4.5)$$

– siła tarcia:

$$F_\gamma = \sqrt{(F_c^2 + F_f^2)} \cdot \sin \Theta_o \quad [\text{N}] \quad (4.6)$$

– siła normalna:

$$F_{\gamma N} = \sqrt{(F_c^2 + F_f^2)} \cdot \cos \Theta_o \quad [\text{N}] \quad (4.7)$$

– współczynnik tarcia:

$$\mu = \text{tg} \Theta_o \quad [-] \quad (4.8)$$

– naprężenia normalne:

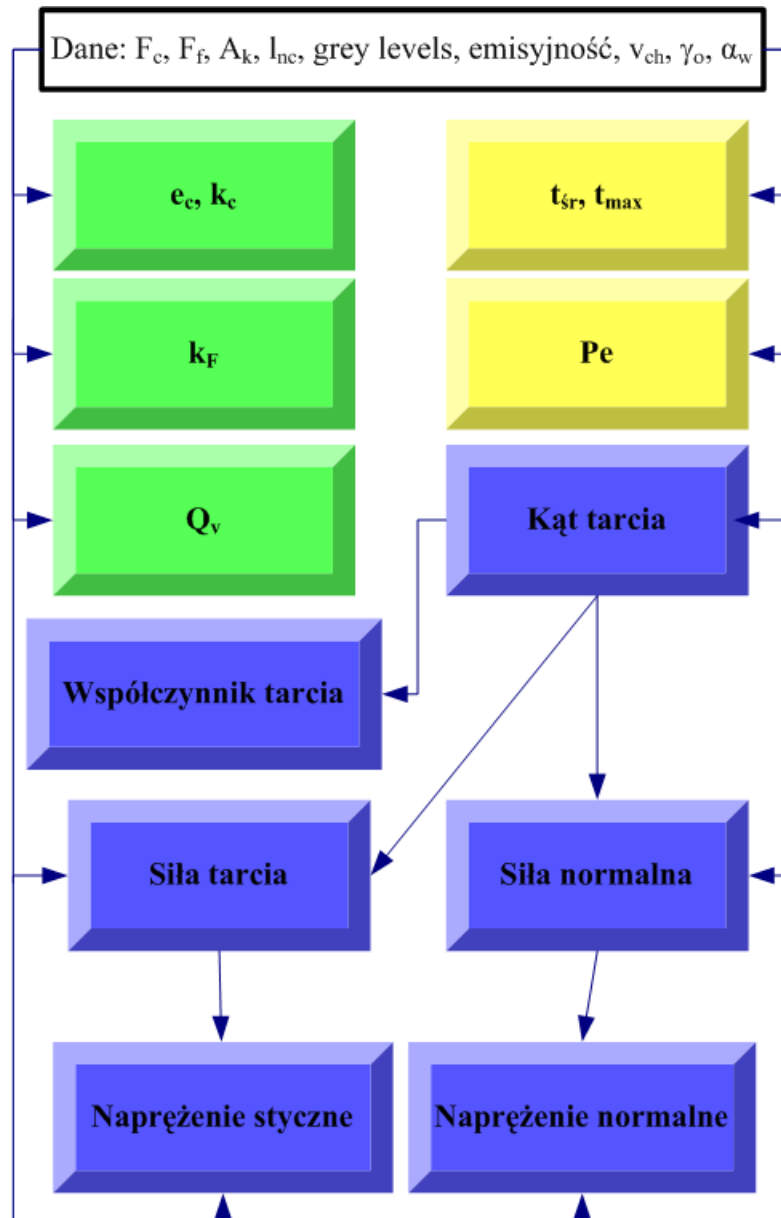
$$\sigma_k = \frac{F_{\gamma N}}{A_k} \quad [\text{MPa}] \quad (4.9)$$

– naprężenia styczne:

$$\tau_k = \frac{F_\gamma}{A_k} \quad [\text{MPa}] \quad (4.10)$$

– Ra teoretyczne:

$$Rat = \frac{0,0321 \cdot f^2}{r_e} \quad [\mu\text{m}] \quad (4.11)$$



Rys. 4.18. Algorytm obliczeń

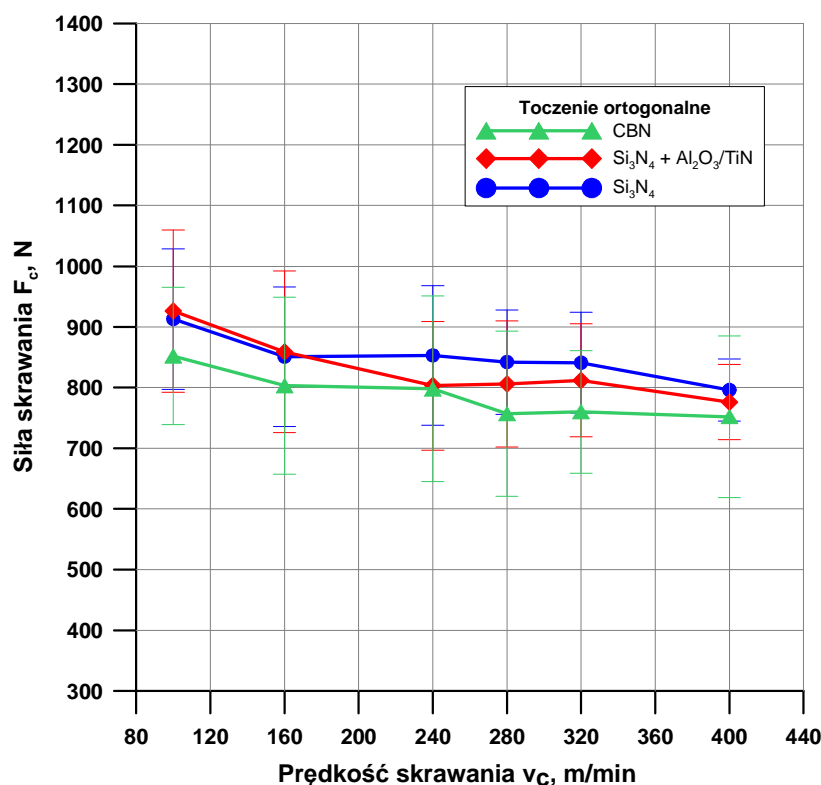
5. OPRACOWANIE I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

5.1. MECHANICZNE ODDZIAŁYWANIA W PROCESIE SKRAWANIA

Oddziaływania mechaniczne w procesie skrawania (toczenia ortogonalnego) żeliwa sferoidalnego analizowano za pomocą charakterystyk takich jak: składowe siły skrawania, opór właściwy skrawania, energia właściwa skrawania, mechaniczne obciążenie styku. Przedstawiono również obrazy otrzymanych wiórów.

5.1.1. Składowa F_c całkowitej siły skrawania

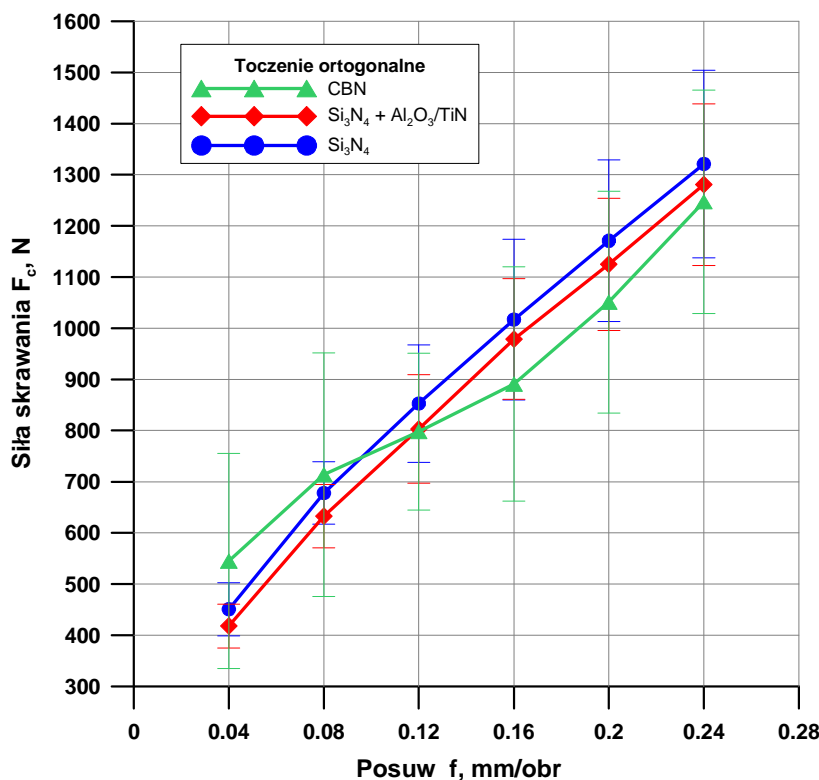
Na rys. 5.1 i 5.2 przedstawiono wpływ prędkości skrawania i posuwu na przebieg średniej wartości siły skrawania F_c , zmierzonej podczas toczenia ortogonalnego żeliwa sferoidalnego przy użyciu ostrzy z ceramiki azotkowej i CBN.



Rys. 5.1. Wpływ prędkości skrawania na składową siłę skrawania F_c ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Na podstawie otrzymanych wyników badań (rys. 5.1) stwierdzono, że w całym zakresie badanych prędkości następuje spadek wartości siły F_c o ok. 15% dla wszystkich zastosowanych ostrzy. W przypadku gdy, skrawano ostrzem z CBN

maksymalną wartość siły F_c ok. 850 N, otrzymano dla najmniejszej prędkości $v_c=100$ m/min. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania siła ta maleje w sposób nieliniowy, osiągając najmniejszą wartość ok. 750 N dla prędkości $v_c=400$ m/min. Podobny przebieg (z tendencją malejącą) zarejestrowano dla ostrzy z ceramiki azotkowej (Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$). W tym przypadku maksymalna wartość siły F_c wyniosła ok. 920 N, gdy skrawano z prędkością $v_c=100$ m/min. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania do $v_c=400$ m/min wartość siły F_c zmniejszyła się do ok. 785 N. Porównując otrzymane przebiegi zaobserwowano, że dla ostrza z CBN w zakresie prędkości $v_c=100\div 400$ m/min, otrzymano nieznacznie mniejsze wartości siły F_c o ok. $30\div 70$ N niż w przypadku zastosowania ostrzy z ceramiki azotkowej (wyjątek, gdy skrawano z $v_c=240$ m/min). Analizując przedziały ufności (wynikające z przebiegu widma siły) stwierdzono, że proces skrawania przebiegał stabilnie.



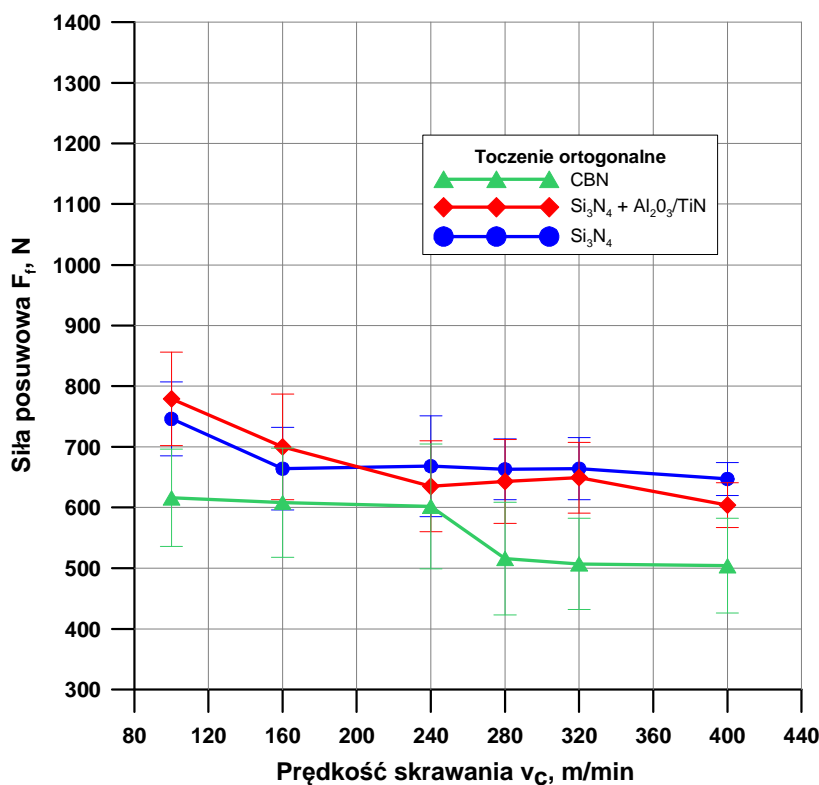
Rys. 5.2. Wpływ posuwu na siłę skrawania F_c
($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Z wykresu zmian siły F_c na rys. 5.2 wynika, że wraz ze wzrostem posuwu siła skrawania F_c wzrasta dla wszystkich badanych ostrzy, co potwierdza się z danymi literaturowymi [14]. Cechą charakterystyczną są zbliżone wartości siły F_c dla ostrzy z ceramiki azotkowej. W tym przypadku siła F_c rośnie od wartości ok. 435 N ok. do ok. 1300 N. Z tego wynika, że siła ta wzrosła trzykrotnie w badanym zakresie zmian posuwu. Gdy skrawano ostrzem z CBN zauważono, że dla posuwu z zakresu

$f=0,04\div0,08$ mm/obr zarejestrowana siła F_c jest większa, w porównaniu z wartościami siły F_c zmierzonej dla ostrzy z ceramiki azotkowej. Fakt ten można wytłumaczyć tym, że ostrze z CBN posiada zaokrągloną krawędź skrawającą ($r_n=7\div10$ μm), co w konsekwencji doprowadza do braku stabilności procesu w zakresie posuwu $f=0,04\div0,08$ mm/obr. Potwierdzają to również wartości przedziałów ufności z przebiegu widma siły. Przedziały te są pięciokrotnie większe niż w przypadku użycia ostrzy z ceramiki azotkowej.

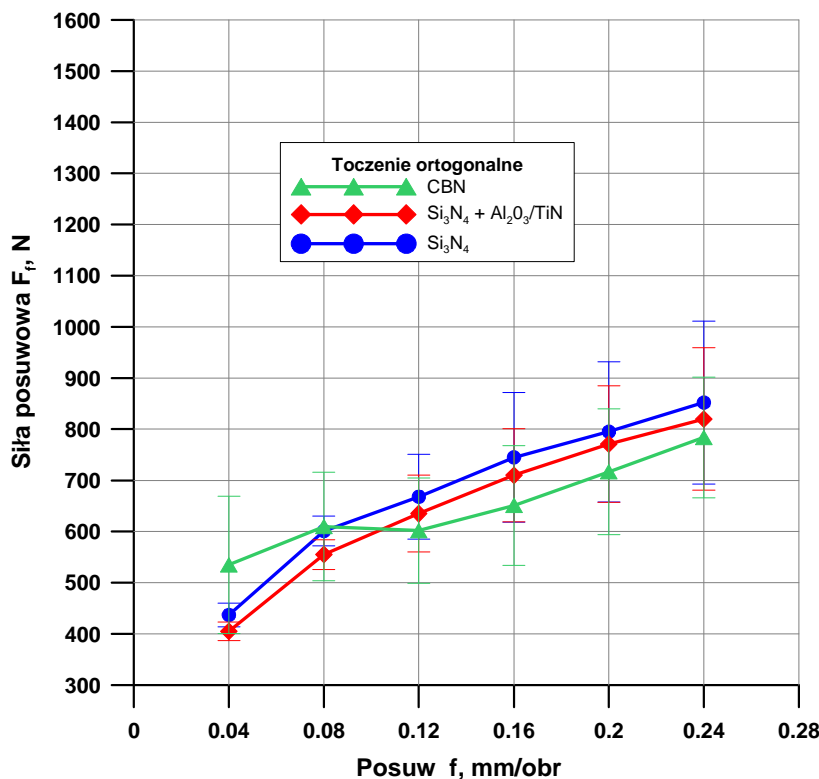
5.1.2. Składowa F_f całkowitej siły skrawania

Na rys. 5.3 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na przebieg siły posuwowej F_f . Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania następuje spadek wartości siły posuwowej F_f . Dla ostrzy z ceramiki azotkowej wartość siły F_f nieznacznie maleje w miarę wzrostu prędkości od ok. 760 N do ok. 620 N. W przypadku skrawania ostrzem z CBN zarejestrowano wartości siły o ok. 40÷150 N mniejsze w porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej. Zauważono, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania wartość siły posuwowej maleje o ok. 20% dla ostrza z CBN. Analizując przedziały ufności stwierdzono, że proces skrawania przebiegał stabilnie.



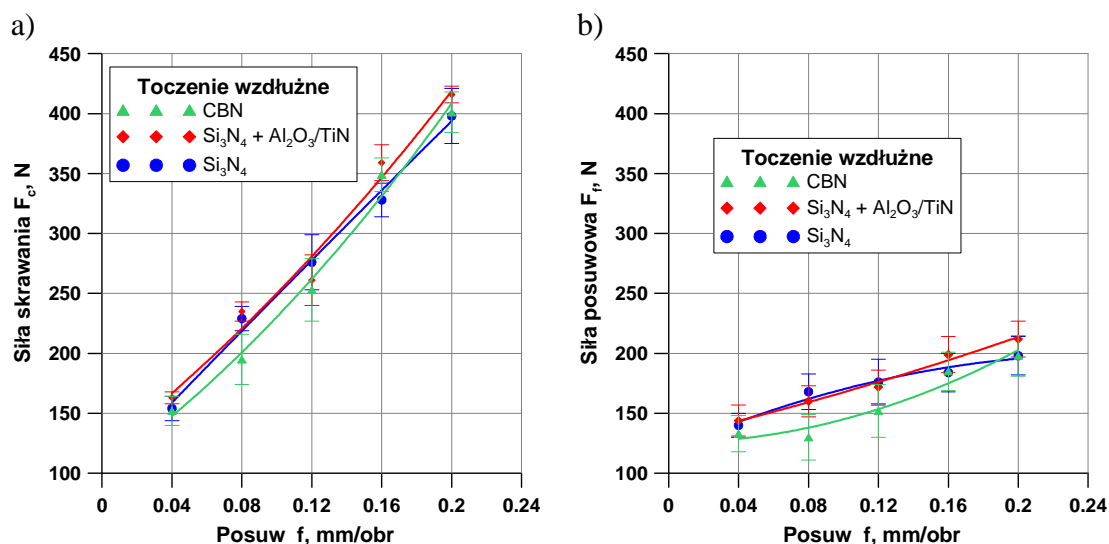
Rys. 5.3. Wpływ prędkości skrawania na siłę posuwową F_f ($v_c=100\div400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Wpływ posuwu na siłę posuwową przedstawiono na rys. 5.4. W przypadku skrawania ostrzami z ceramiki azotkowej zauważono, że wraz ze wzrostem posuwu następuje widoczny wzrost wartości siły posuwowej. Rysunek 5.4 potwierdza, że gdy skrawano ostrzem z CBN w zakresie posuwu $f=0,04\div 0,08$ mm/obr, otrzymano taki sam trend przebiegu siły posuwowej F_f jak opisano w rozdziale 5.1.1.



Rys. 5.4. Wpływ posuwu na siłę posuwową F_f
($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

W fachowej literaturze [65] przedstawiono wyniki badań procesu skrawania (toczenia nieortogonalnego) żeliwa sferoidalnego ostrzami z ceramiki azotkowej i CBN. Należy dodać, że w badaniach zastosowano dla ostrzy z ceramiki azotkowej płytki trójkątne o geometrii TNGA 160408 T02520. W przypadku ostrza z CBN zastosowano płytki trójkątne o oznaczeniu TNGA 160408 S01030. Jak wynika z rys. 5.5a wraz ze wzrostem posuwu następuje liniowy wzrost siły skrawania F_c dla wszystkich badanych ostrzy. Najmniejsze wartości siły F_f (rys. 5.5b) uzyskano dla ostrza z CBN w zakresie posuwu $f=0,04\div 0,12$ mm/obr. Analizując przedziały ufności otrzymane z widma siły zaobserwowano, że proces obróbki przebiegał stabilnie. Uzyskane wyniki badań nie wykazują wyraźnego wpływu materiału ostrza na przebieg średniej wartości siły skrawania F_c i siły posuwowej F_f .



Rys. 5.5. Wpływ posuwu na siłę a) skrawania F_c i b) posuwową F_f ($v_c=320$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm) [65]

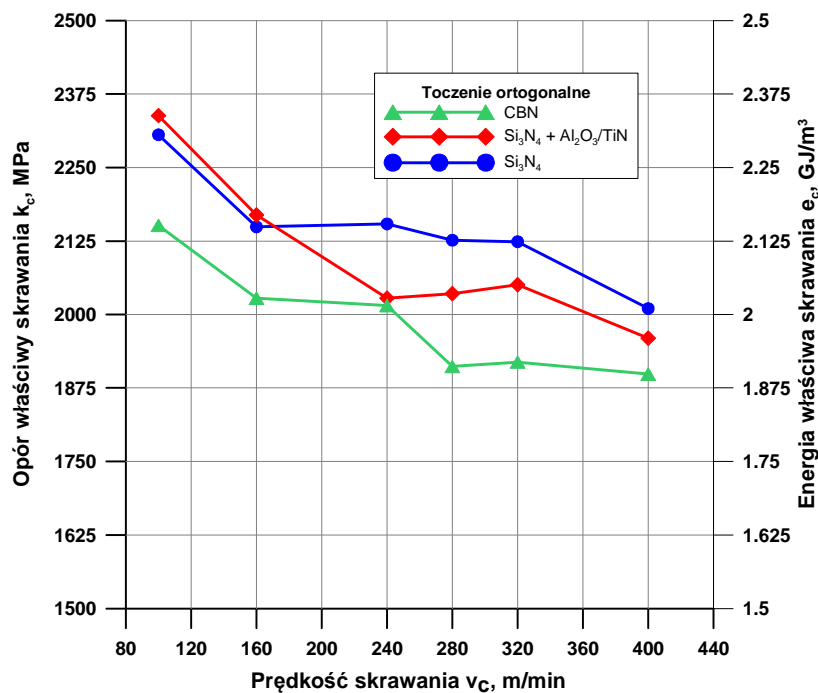
Na podstawie przeprowadzonych badań własnych stwierdzono, że zaburzenia procesu skrawania w zakresie posuwu $f=0,04\div 0,08$ mm/obr dla ostrza z CBN wynikają z zastosowanej mikrogeometrii krawędzi skrawającej ostrza ($r_n=7\div 10$ μ m), a nie z gatunku zastosowanego materiału ostrza narzędzia skrawającego. Należy dodać, że ostrza z ceramiki azotkowej nie posiadają zaokrąglonej krawędzi skrawającej (tabela 4.4).

5.1.3. Opór właściwy skrawania – energia właściwa skrawania

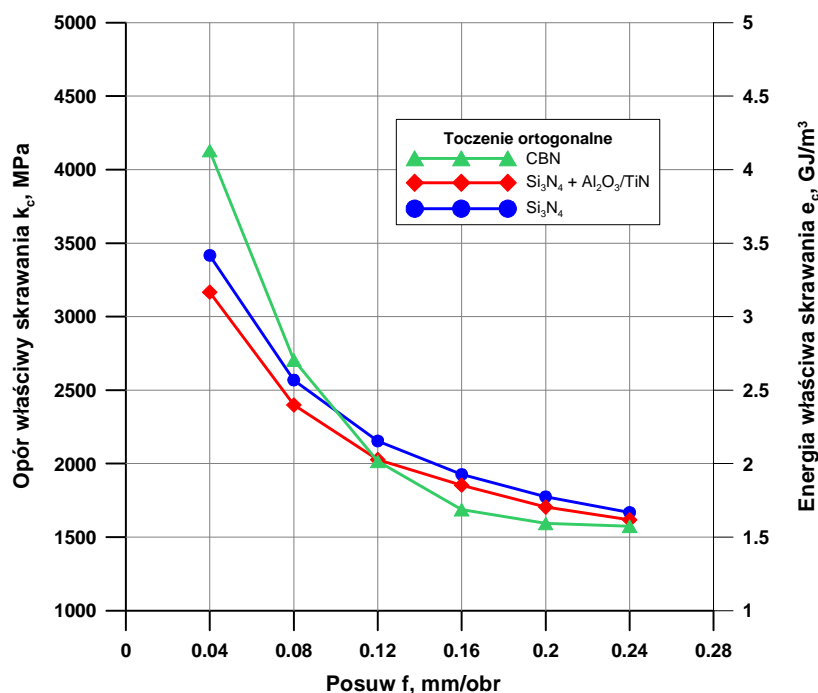
Na rys. 5.6 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na opór właściwy skrawania k_c i energię właściwą skrawania e_c . W przeprowadzonych badaniach wartość k_c zmienia się od ok. 2300 MPa do ok. 1900 MPa. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania następuje spadek wartości k_c dla wszystkich badanych ostrzy narzędzi skrawających. Jest to konsekwencja zmniejszenia się wartości siły skrawania F_c (rys. 5.1) dla stałego przekroju warstwy skrawanej.

W przypadku wpływu posuwu (rys. 5.7) na przebieg wartości oporu skrawania zauważono, że dla ostrza z CBN ($f=0,04$ mm/obr) wyznaczono największą wartość k_c ok. 4100 MPa. W porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej, różnica ta wynosi ok. 1000 MPa. W przypadku wpływu prędkości skrawania wyznaczono wartość $e_c\approx 2,1$ GJ/m³, co jest zgodne z danymi literaturowymi dla żeliwa [14]. Natomiast wzrost posuwu (od $f=0,04$ do 0,24 mm/obr) powoduje zmniejszenie e_c do ok. 1,6 GJ/m³ jako konsekwencję zwiększenia grubości warstwy skrawanej [16]. Z tego powodu do badań eksperymentalnych wybrano posuw ($f=0,12$ mm/obr) z zakresu gwarantującego

obniżenie energochłonności procesu. Z rys. 5.8 wynika jednoznacznie, że skrawanie żeliwa sferoidalnego ostrzem z CBN zapewnia uzyskanie największej wartości objętościowej wydajności skrawania przy najmniejszym wydatku energetycznym. Gdy skrawano z prędkością $v_c=240$ m/min i posuwem $f=0,24$ mm/obr, uzyskano Q_v (rys. 5.9) ok. $190 \text{ cm}^3/\text{min}$ dla wszystkich badanych ostrzy narzędzi skrawających.

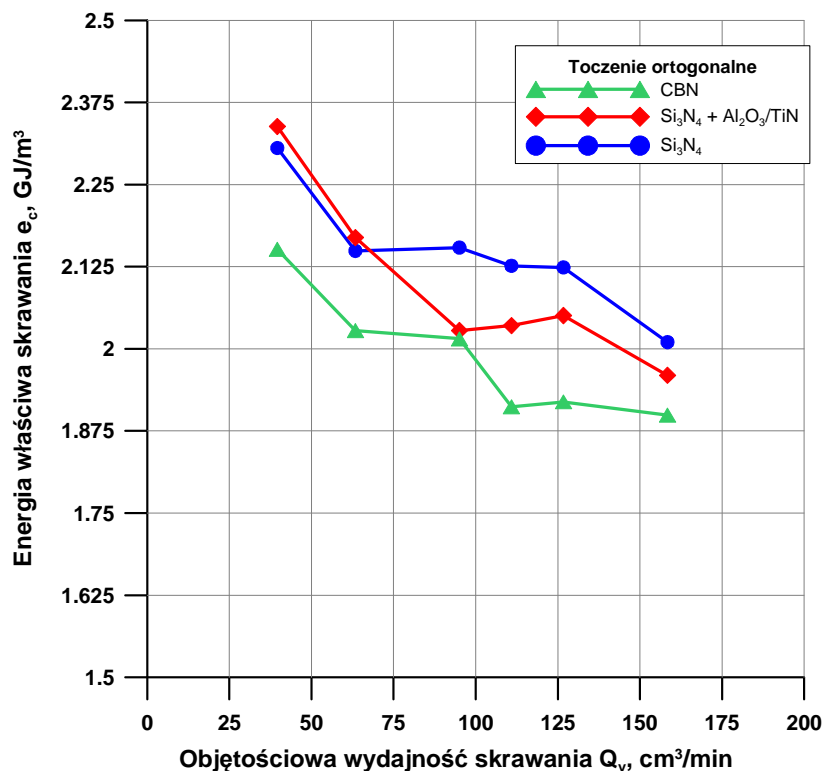


Rys. 5.6. Wpływ prędkości skrawania na opór właściwy skrawania k_c i energię właściwą skrawania e_c ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

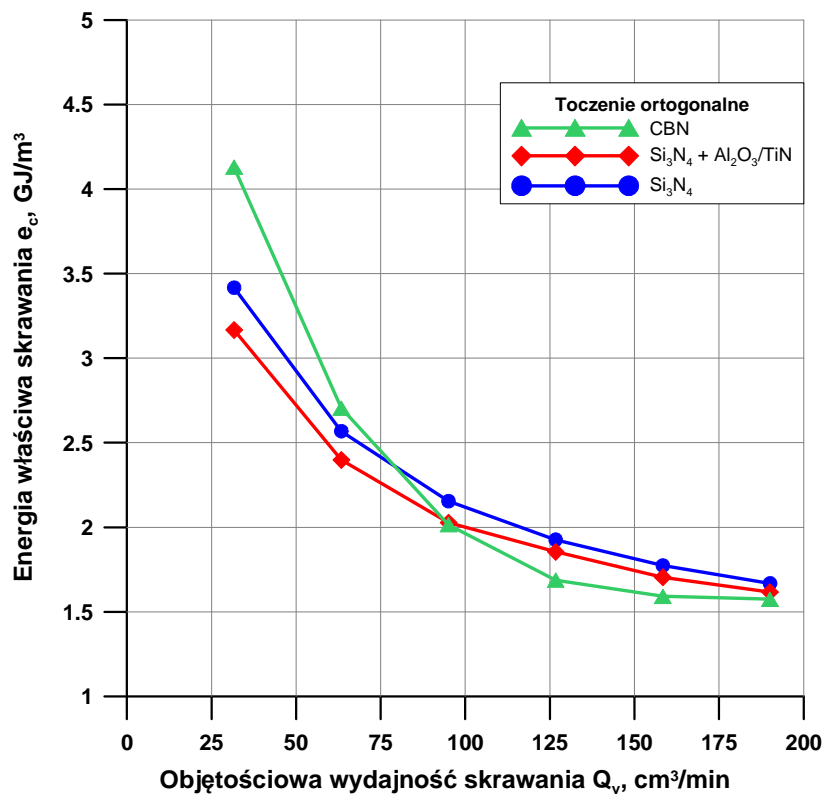


Rys. 5.7. Wpływ posuwu na opór właściwy skrawania k_c oraz energię właściwą skrawania e_c ($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Należy dodać, że energia właściwa skrawania jest wskaźnikiem określającym pracę niezbędną do usunięcia jednostki objętości materiału obrabianego.



Rys. 5.8. Wpływ objętościowej wydajności skrawania na energię właściwą skrawania e_c ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

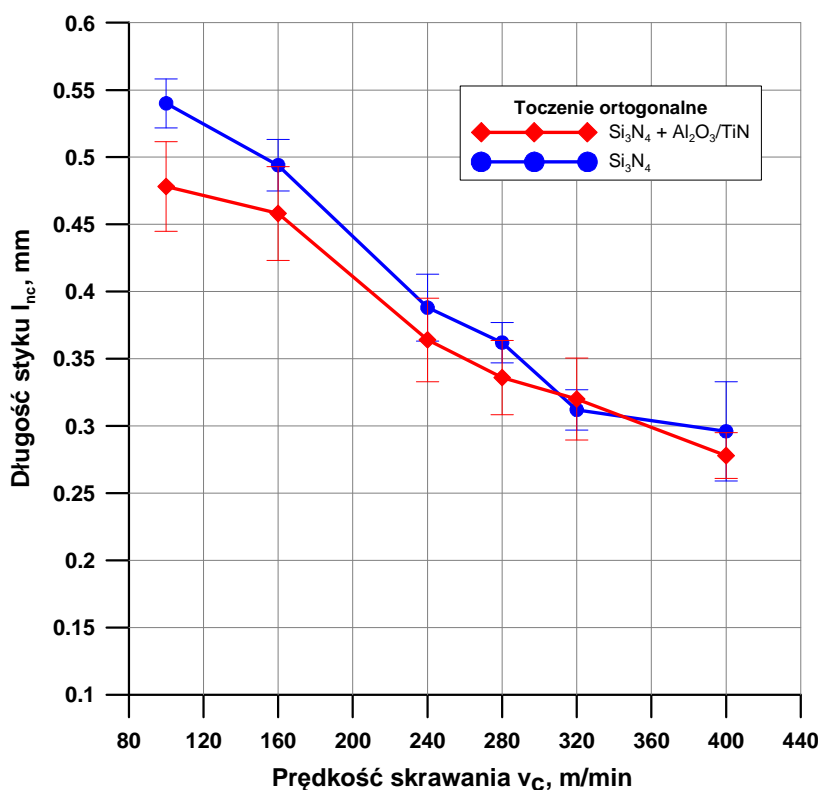


Rys. 5.9. Wpływ objętościowej wydajności skrawania na energię właściwą skrawania e_c ($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

5.1.4. Długość styku wiór - ostrze

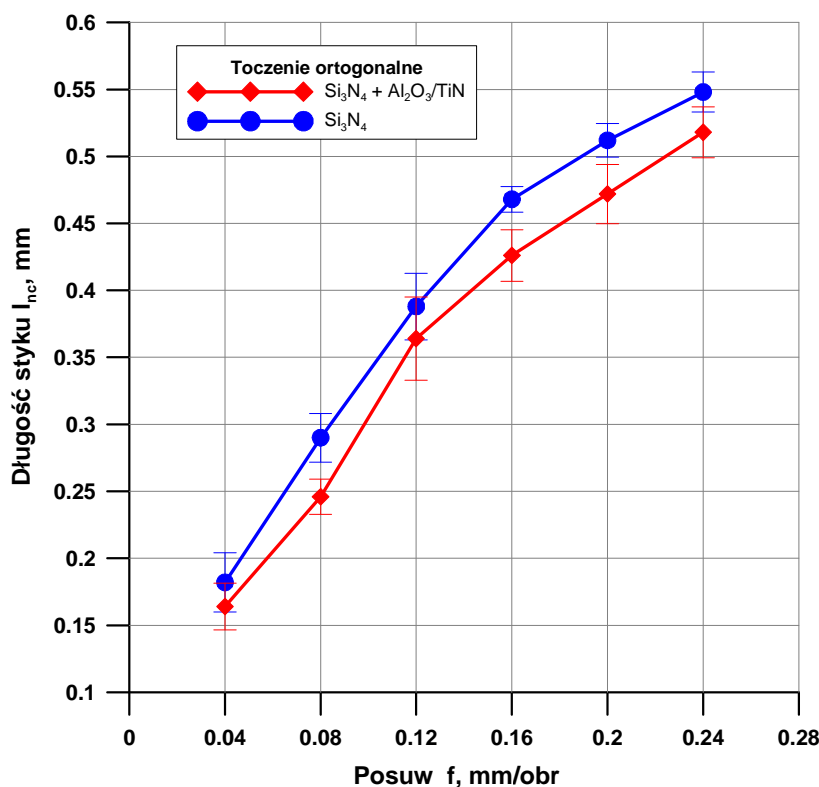
Ważnym aspektem w badaniu przebiegu procesu skrawania jest pomiar długości kontaktu. Jest on o tyle trudny, że wyniki pomiaru są oparte na danych doświadczalnych, a konsekwencją tego są wyniki obarczone błędami, które powinno się traktować jako przybliżone wartości. Wiarygodność tych danych w głównej mierze zależy od jakości wykonanych zdjęć, metodyki pomiaru i w dużej mierze od subiektywnej interpretacji osoby mierzącej.

Na rys. 5.10 i 5.11 przedstawiono wpływ prędkości skrawania i posuwu na długość kontaktu l_{nc} . Jak wynika z rys. 5.10 wraz ze wzrostem prędkości skrawania następuje spadek wartości długości kontaktu dla badanych ostrzy z ceramiki azotkowej. W przypadku ostrza z niepokrywanej ceramiki azotkowej największą wartość l_{nc} ok. 0,54 mm zarejestrowano, gdy skrawano z prędkością $v_c=100$ m/min. Dla porównania przy tej samej prędkości skrawania ostrzem z pokrywanej ceramiki azotkowej uzyskano l_{nc} ok. 0,48 mm. Cechą charakterystyczną przebiegu rys. 5.10 jest to, że w zakresie wyższej prędkości skrawania uzyskano zbliżone wartości l_{nc} dla obu ostrzy z ceramiki azotkowej.



Rys. 5.10. Wpływ prędkości skrawania na długość kontaktu l_{nc}
($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Wraz ze wzrostem posuwu (rys. 5.11) następuje wyraźny wzrost długości styku, co jest konsekwencją zwiększającej się grubości warstwy skrawanej. Największą wartość l_{nc} zarejestrowano dla posuwu $f=0,24$ mm/obr, gdy skrawano ostrzem z pokrywanej ceramiki azotkowej jak i niepokrywanej. Stwierdzono, że dla ostrza z niepokrywanej ceramiki azotkowej uzyskano większe wartości l_{nc} o ok. 0,03 mm w całym zakresie badanych posuwów. Może to świadczyć o zmniejszeniu intensywności tarcia w strefie kontaktu, co przedstawiono w rozdziale 5.3.



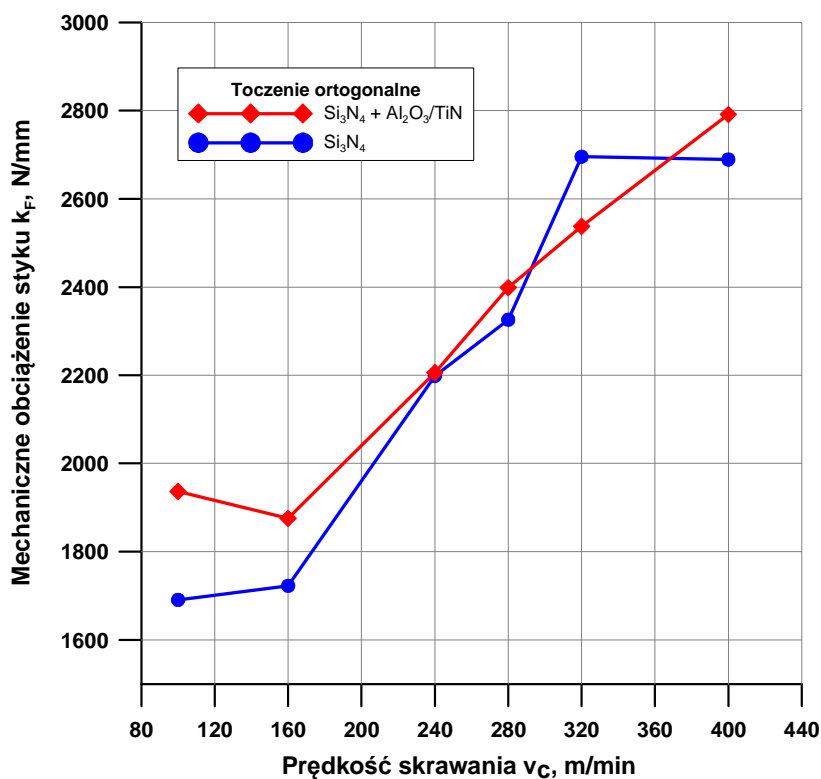
Rys. 5.11. Wpływ posuwu na długość kontaktu l_{nc}
($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Podsumowując, można stwierdzić, że zbliżone wartości długości styku dla niepokrywanej i pokrywanej ceramiki azotkowej mogą wynikać z tego, że użyte materiały narzędziowe charakteryzują się podobnymi właściwościami fizykomechanicznymi.

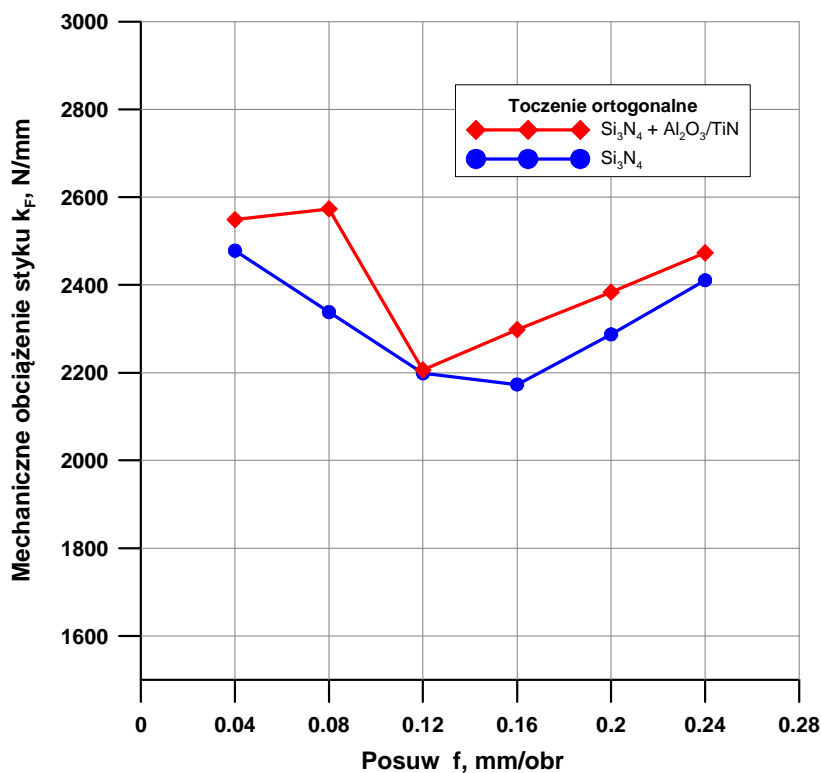
5.1.5. Mechaniczne obciążenie styku

Jak wynika z rys. 5.12 i 5.13 naniesiona powłoka Al₂O₃/TiN nie wpływa istotnie na wartość mechanicznego obciążenia styku. Taki wynik jest konsekwencją zarejestrowania zbliżonych wartości składowej siły F_c i długości styku l_{nc} . W zakresie prędkości $v_c=240\div 280$ m/min uzyskano praktycznie takie same wartości k_F dla

badanych ostrzy narzędzi skrawających. Dla posuwu $f=0,12$ mm/obr (5.13) zarejestrowano najmniejsze wartości mechanicznego obciążenia styku, ok. 2200 N/mm dla pokrywanej i niepokrywanej ceramiki azotkowej.



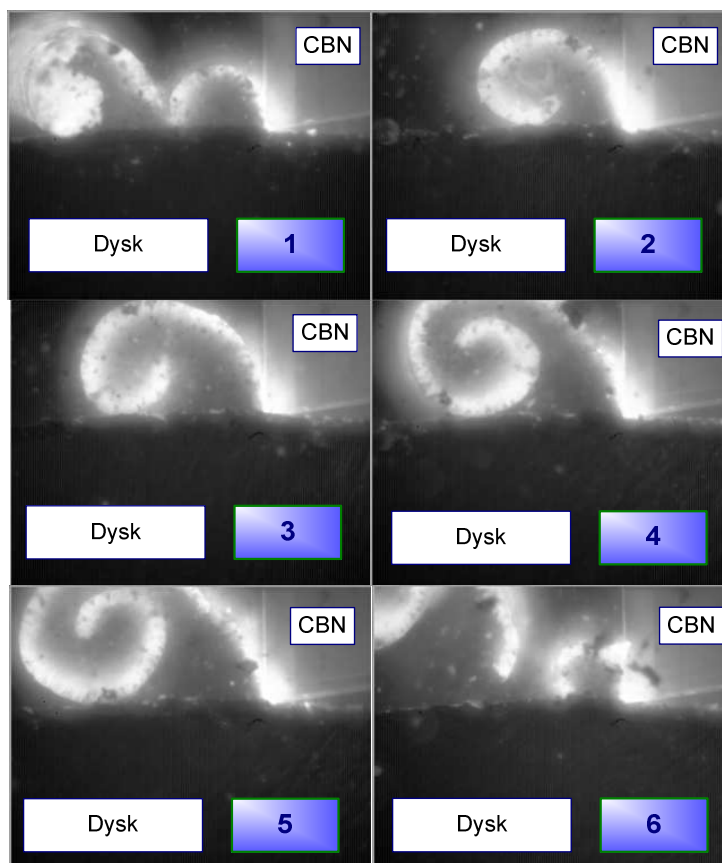
Rys. 5.12. Wpływ prędkości skrawania na mechaniczne obciążenie styku k_F ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



Rys. 5.13. Wpływ posuwu na mechaniczne obciążenie styku k_F ($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

5.1.6. Wióry w procesie skrawania

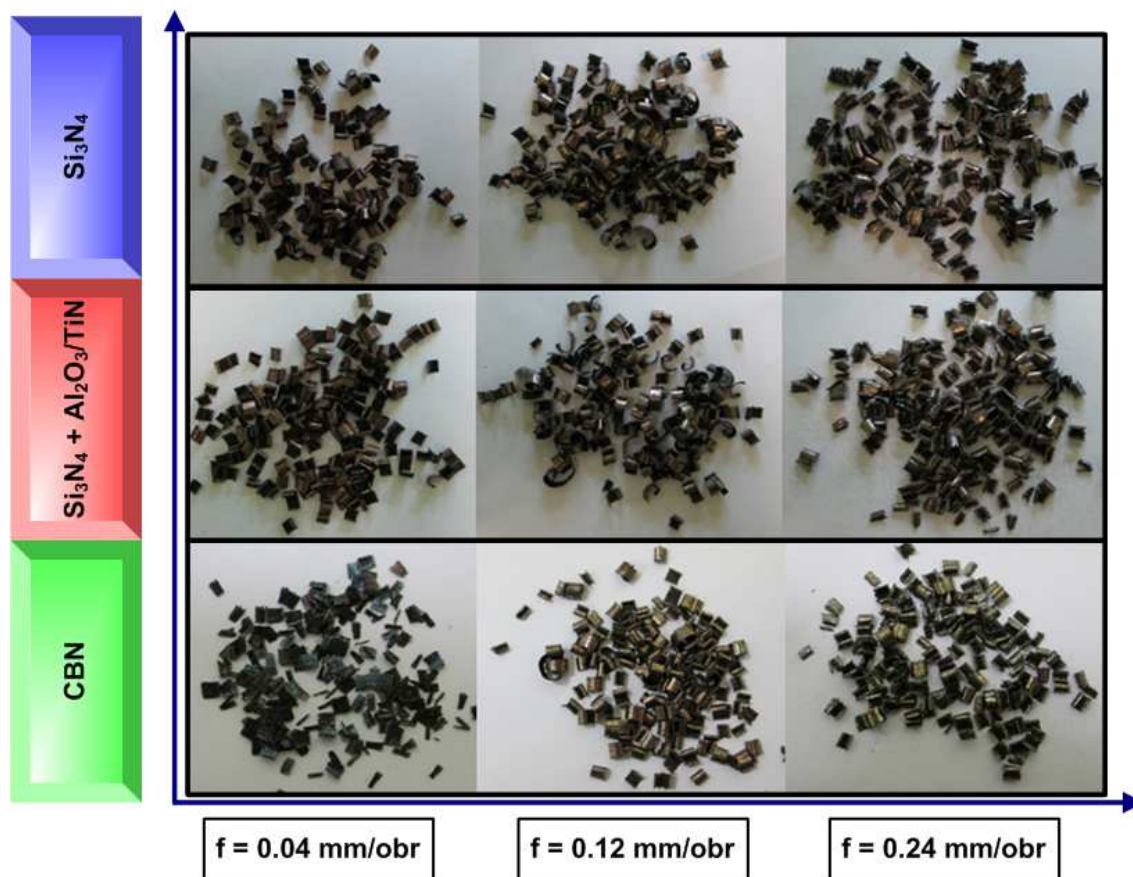
Wióry w procesie skrawania są materiałem odpadowym, ale ich obserwacja dostarcza wielu informacji na temat przebiegu procesu skrawania. W przypadku obróbki materiałów kruchych jakim jest żeliwo, mamy do czynienia z wiórami elementowymi. Wióry w takiej postaci zajmują mało miejsca i bez problemu opuszczają strefę obróbki [22]. Na rys 5.14 przedstawiono przebieg tworzenia wióra zarejestrowany za pomocą kamery IR. Kamera termowizyjna firmy Flirt System posiada opcję szybkiej rejestracji obrazu [68]. Dzięki tej możliwości zarejestrowano proces tworzenia wióra dla ostrza z CBN, gdy skrawano z prędkością $v_c=100$ m/min. Rysunek 5.14 przedstawia kolejne etapy procesu tworzenia wióra. W pierwszym etapie następuje oderwanie poprzedniego wióra (rys. 5.14–1) i początek tworzenia nowego wióra. W kolejnych etapach stwierdzono wyraźne zwijanie wióra w spiralę (rys. 5.14–2÷5) aż do momentu oderwania wióra (rys. 5.14–6).



Rys. 5.14. Proces tworzenia wióra (CBN $v_c=100$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Na rys. 5.15 pokazano wybrane obrazy wiórów powstałych podczas skrawania żeliwa SF. Stwierdzono, że prędkość skrawania w całym badanym zakresie nie wpływa

istotnie na postać wiórów, dlatego przedstawiono tylko wpływ drugiego badanego parametru skrawania (posuwu). Jak wynika z rys. 5.15 praktycznie wszystkie wióry mają kształt krótkiej spirali. Wraz ze wzrostem posuwu zauważono nieznaczne zmiany kształtu wióra.



Rys. 5.15. Wpływ posuwu na postać wiórów

Interesujący wynik uzyskano dla ostrza z CBN, gdy skrawano z posuwem $f=0,04 \text{ mm/obr}$ (rys. 5.16). Na podstawie otrzymanego obrazu (rys. 5.16) stwierdzono, że wiór nie zwiija się w spiralę. Przyczynę takiego zjawiska można upatrywać w zakłóceniach wartości siły skrawania F_c i siły posuwowej F_f .



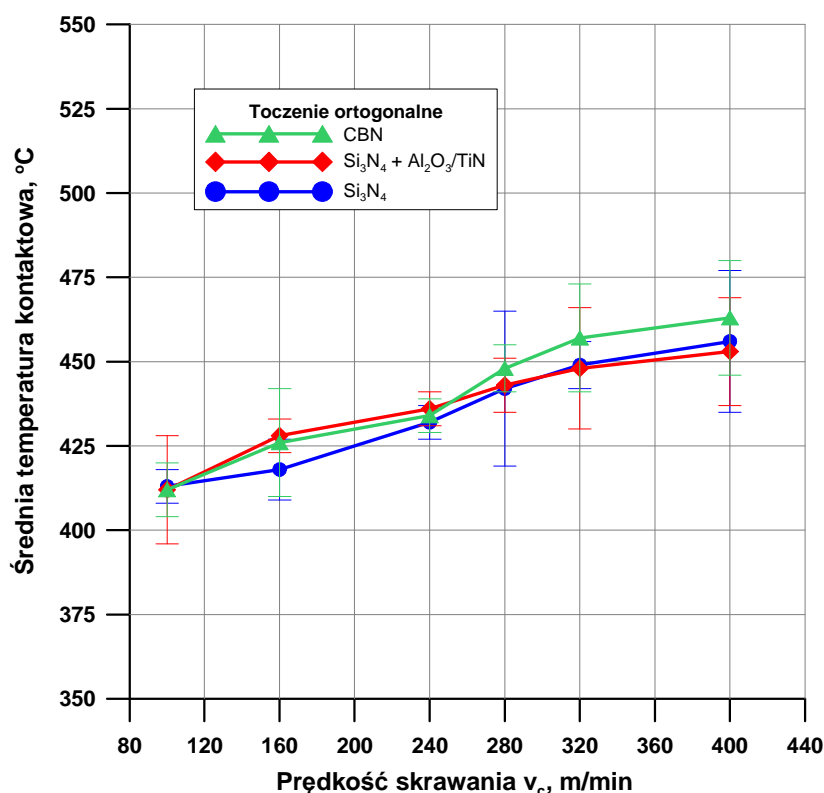
Rys. 5.16. Postać wiórów po skrawaniu ostrzem z CBN ($f=0,04 \text{ mm/obr}$)

5.2. TERMICZNE ODDZIAŁYWANIA W PROCESIE SKRAWANIA

Termiczne oddziaływania w procesie skrawania żeliwa sferoidalnego oceniono na podstawie: średniej (t_{sr}) i maksymalnej temperatury (t_{max}) kontaktowej oraz liczby Pecleta. Przedstawiono obrazy rozkładu temperatury w strefie skrawania otrzymane za pomocą kamery IR, na podstawie których określono wartości t_{sr} i t_{max} .

5.2.1. Średnia temperatura kontaktowa

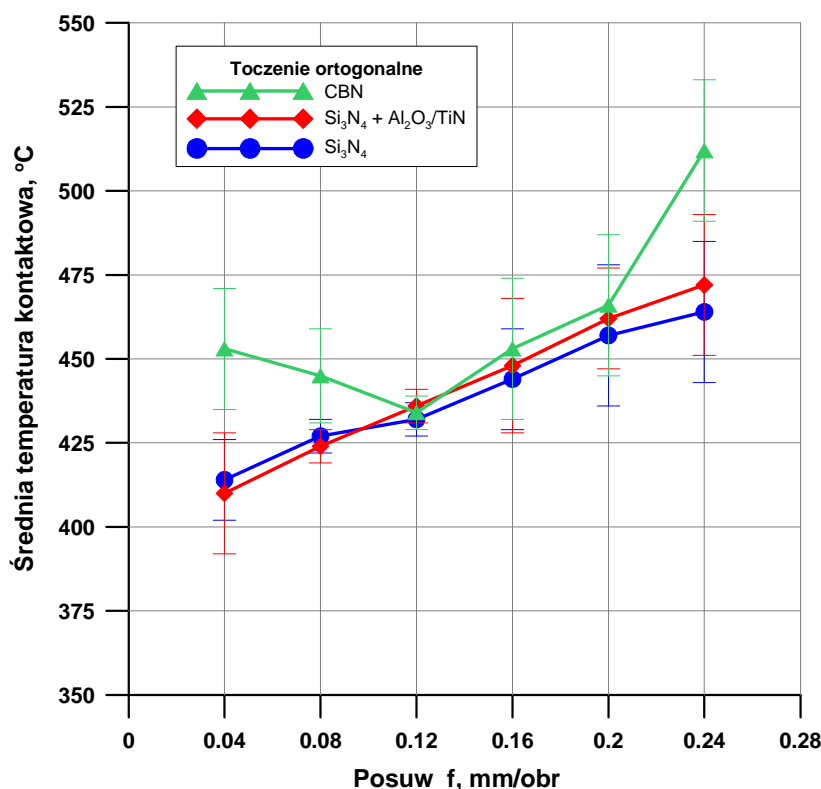
Rysunki 5.17 i 5.18 przedstawiają zmiany średniej wartości temperatury kontaktowej w funkcji prędkości skrawania i posuwu. W przeprowadzonych testach toczenia średnia temperatura kontaktowa zmieniała się w zakresie wartości od ok. 410°C do ok. 510°C, w zależności od stosowanych parametrów skrawania.



Rys. 5.17. Wpływ prędkości skrawania na średnią temperaturę kontaktową ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania od $v_c=100$ m/min do $v_c=400$ m/min (rys. 5.17) przyrost średniej temperatury kontaktowej jest rzędu ok. 50°C. Zbliżone wartości średniej temperatury kontaktowej dla ostrzy z ceramiki azotkowej mogą być kojarzone z podobnymi właściwościami termicznymi użytych

materiałów narzędziowych. Interesujący wynik uzyskano dla ostrza z CBN (rys. 5.18) ze względu, że w zakresie posuwu $f=0,04\div 0,08$ mm/obr zarejestrowano znacznie większe wartości średniej temperatury kontaktowej w porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej. Fakt ten może wynikać z zarejestrowanych zakłóceń przebiegu wartości składowych sił skrawania (F_c i F_f) dla posuwu z zakresu $f=0,04\div 0,08$ mm/obr. Dla ostrza z CBN zarejestrowano najniższą temperaturę, gdy skrawano z posuwem $f=0,12$ mm/obr (rys 5.18). Można to również powiązać z tym, że dla zastosowanej geometrii narzędzia uzyskano grubość warstwy skrawanej, przy której energia właściwa skrawania osiąga wartość gwarantującą obniżenie energochłonności procesu (rys. 5.7).

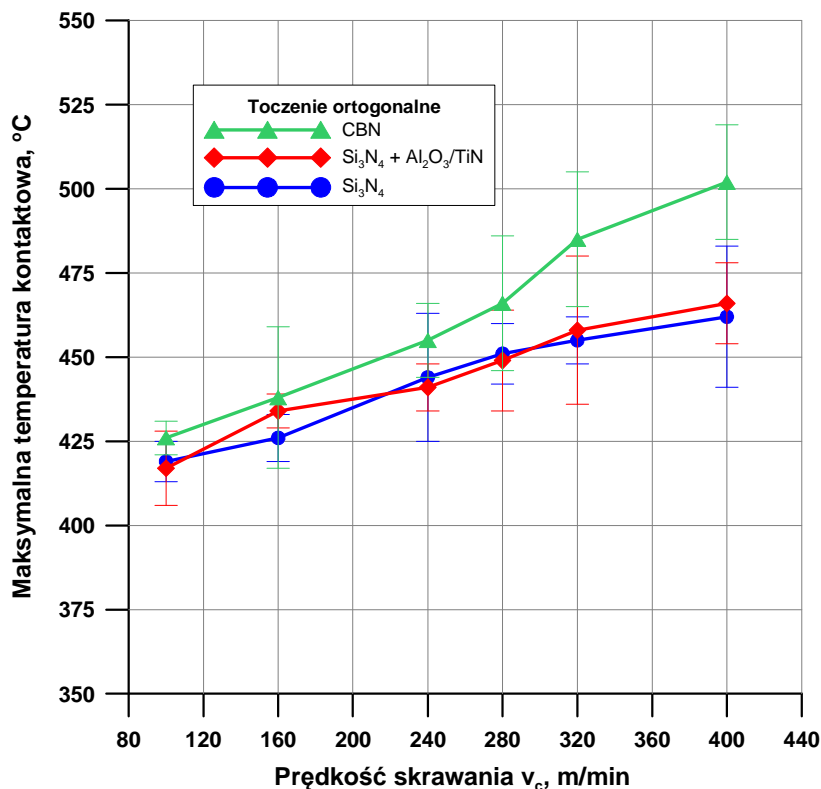


Rys. 5.18. Wpływ posuwu na średnią temperaturę kontaktową ($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

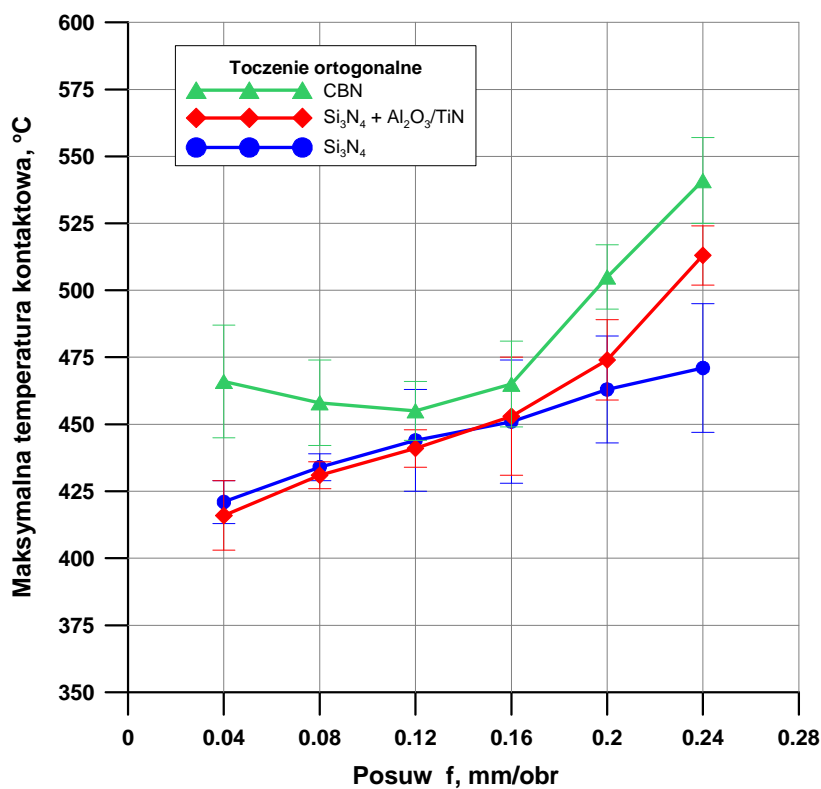
5.2.2. Maksymalna temperatura kontaktowa

Na rys. 5.19 i 5.20 przedstawiono zmiany maksymalnej wartości temperatury kontaktowej w funkcji prędkości skrawania i posuwu. Maksymalna temperatura kontaktowa zmieniała się w zakresie wartości od ok. 420°C do ok. 540°C w zależności od parametrów skrawania. Zaobserwowano, że największą różnicę ok. 40°C, pomiędzy średnią, a maksymalną temperaturą kontaktową uzyskano dla ostrza z CBN, gdy skrawano z $v_c=400$ m/min. Małe różnice między średnią i maksymalną temperaturą

kontaktową w skrawaniu żeliwa SCI są następstwem zmniejszenia długości/pola styku i koncentracji ciepła w niewielkim obszarze w porównaniu ze skrawaniem stali [12].



Rys. 5.19. Wpływ prędkości skrawania na maksymalną temperaturę kontaktową ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



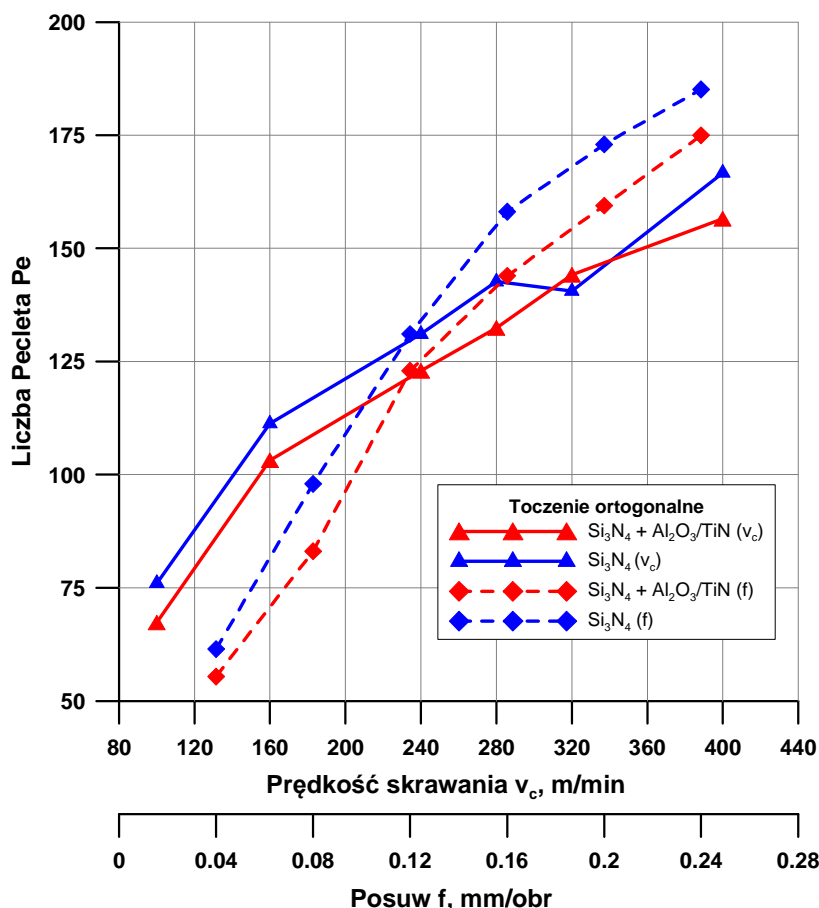
Rys. 5.20. Wpływ posuwu na maksymalną temperaturę kontaktową ($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

5.2.3. Liczba Pecleta

Do opisywania termodynamicznych procesów, w których występuje generowanie ciepła, wykorzystuje się liczbę Pecleta. Zdefiniowano ją następującym wzorem [13]:

$$Pe = \frac{v_c l_{nc}}{\alpha_w}$$

gdzie: v_c - prędkość skrawania, l_{nc} - długość kontaktu, α_w - dyfuzyjność cieplna materiału obrabianego. Wartość dyfuzyjności cieplnej dla skrawanego żeliwa sferoidalnego przyjęto równą $\alpha_w = 1.184 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ [64]. Wartość liczby Pecleta przedstawia w sposób bezwymiarowy wpływ technologicznych i geometrycznych parametrów procesu odniesionych do własności termofizycznych badanego materiału. Współczynnik dyfuzyjności określa, z jaką szybkością w danym materiale przemieści się czoło fali cieplnej powstającej na skutek miejscowego nagrzania materiału [63].

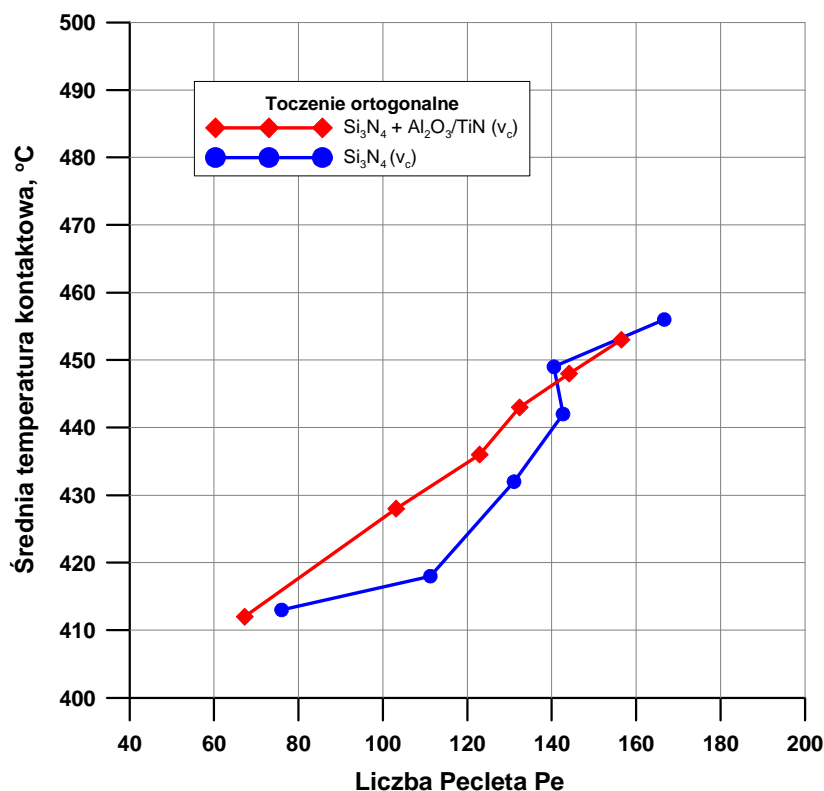


Rys. 5.21. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na liczbę Pecleta Pe ($v_c = 100 \div 400 \text{ m/min}$, $f = 0,04 \div 0,24 \text{ mm/obr}$, $a_p = 3,3 \text{ mm}$)

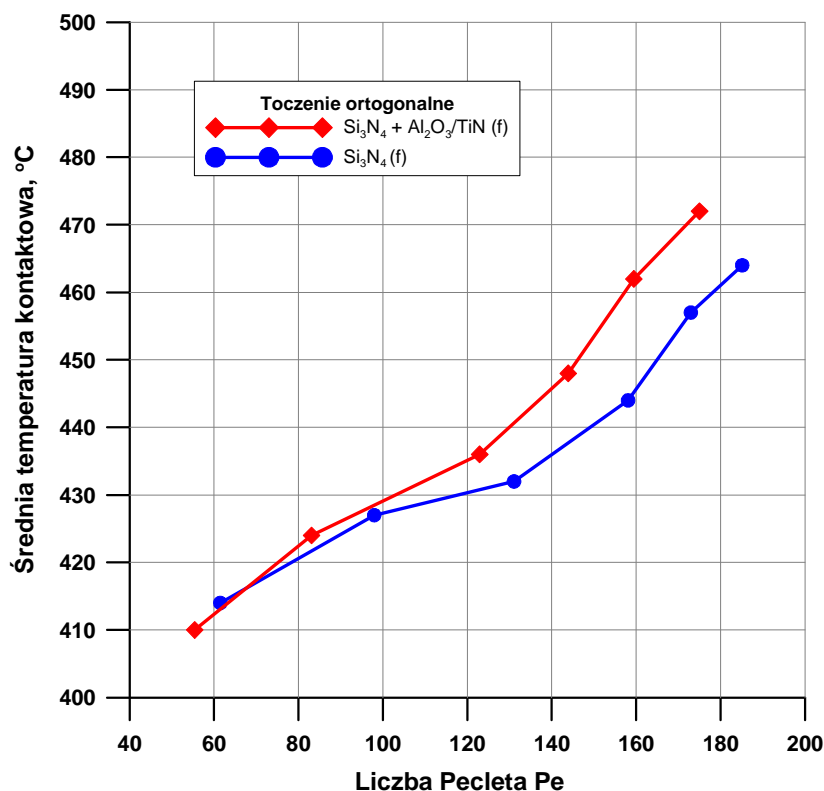
Na rys. 5.21 przedstawiono wpływ prędkości skrawania i posuwu na wartość liczby Pecleta, która zmienia się w zakresie od ok. 60 do ok. 180 w zależności od zastosowanych parametrów. Jak wynika z rys. 5.21 wraz ze wzrostem prędkości

skrawania i posuwu najwięcej ciepła przejmuje wiór (zgodnie z definicją liczby Pecleta). Fakt ten może być kojarzony z podobnymi właściwościami termicznymi zastosowanych narzędzi z ceramiki azotkowej. W przypadku wpływu posuwu na przebieg procesu, można zauważyć, że dla posuwu $f=0,04$ mm/obr następuje transfer ciepła do wióra i do narzędzia. Wraz ze wzrostem posuwu coraz więcej ciepła jest transportowane do wióra. W przypadku, gdy skrawano z posuwem $f=0,24$ mm/obr, otrzymano wartość liczby Pecleta ok. 180.

Na podstawie rys. 5.22 stwierdzono, że wraz ze wzrostem liczby Pecleta następuje równoczesny wzrost średniej temperatury kontaktowej. Zauważono (rys. 5.23), że w zakresie posuwu $f=0,12\div 0,24$ mm/obr następuje zauważalny wzrost wartości liczby Pecleta i średniej temperatury kontaktowej.



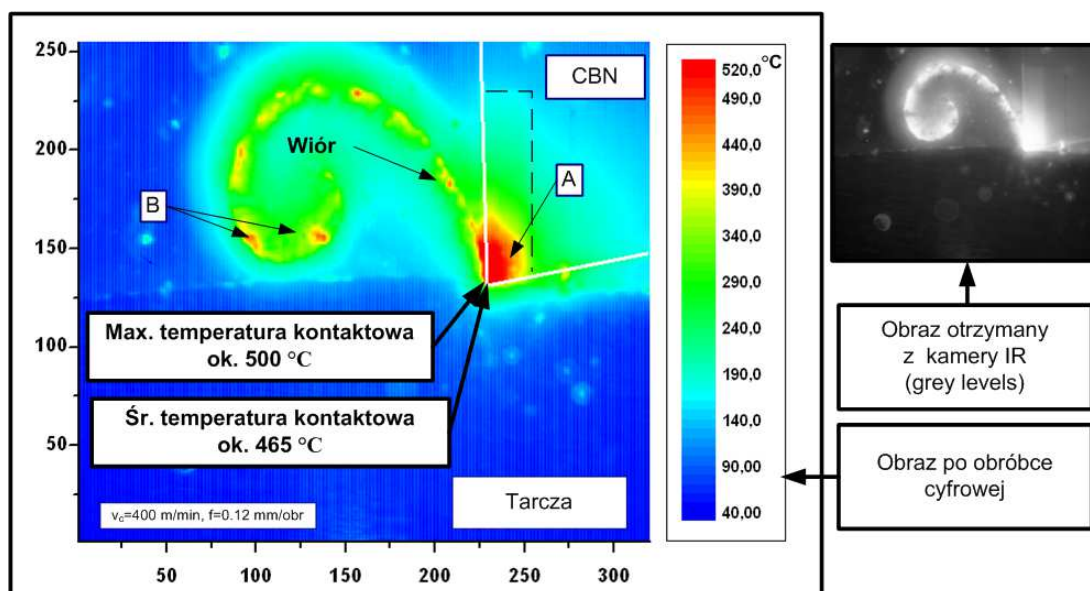
Rys. 5.22. Wpływ liczby Pecleta na średnią temperaturę kontaktową ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



Rys. 5.23. Wpływ liczby Pecleta na średnią temperaturę kontaktową ($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

5.2.4. Rozkład temperatury w strefie skrawania

Na rys. 5.24÷26 przedstawiono mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania w zależności od zastosowanego materiału ostrza narzędnia skrawającego.

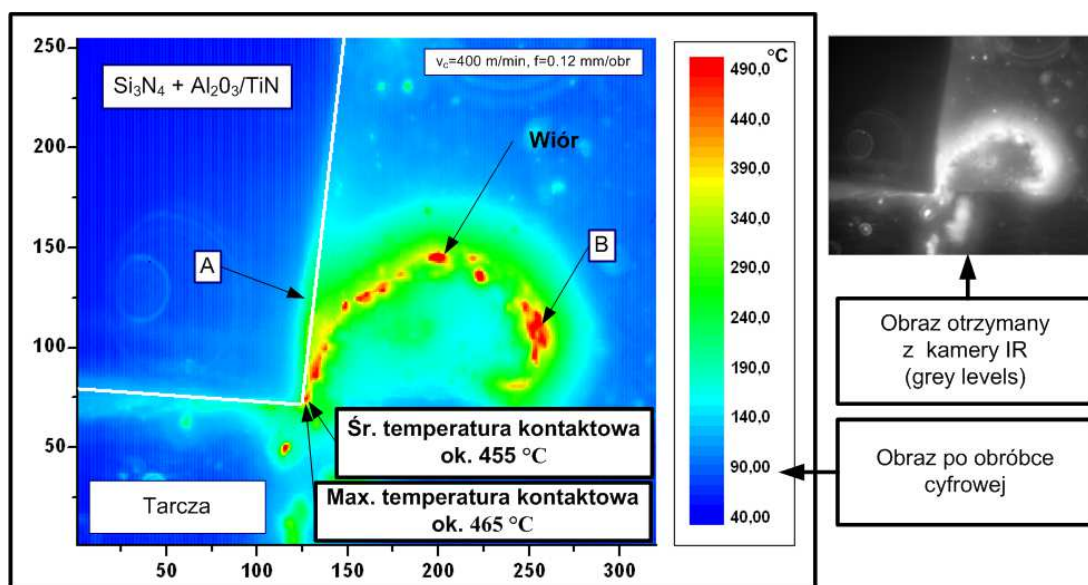


Rys. 5.24. Mapa rozkładu temperatury w strefie skrawania otrzymana przy użyciu ostrza z CBN ($v_c=400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Na obrazach naniesiono zarys ostrza skrawającego, a także zaznaczono średnią i maksymalną temperaturę kontaktową. Przedstawiono również obraz otrzymany bezpośrednio z kamery IR bez obróbki cyfrowej. Obraz jest czarno-biały ze względu na to, że jest on w odcieniach szarości „grey levels”.

Analizując obraz rozkładu temperatury (rys. 5.24), gdy skrawano ostrzem z CBN, zauważono charakterystyczną strefę (rys. 5.24–A) wysokiej temperatury w ostrzu. Fakt ten można wytłumaczyć tym, że ciepło ze strefy tworzenia wióra promieniuje i zostaje zarejestrowane przez kamerę termowizyjną jako ciepło w ostrzu narzędzia. Wynika to z zastosowanej geometrii ostrza, ponieważ długość krawędzi skrawającej wyniosła 3,4 mm, a grubość tarczy była równa 3,3 mm. Gdyby zastosować ostrze o dłuższej krawędzi skrawającej, tak jak w przypadku narzędzi z ceramiki azotkowej (rys. 5.25÷26–A), to w konsekwencji nie uzyskano by takiego efektu.

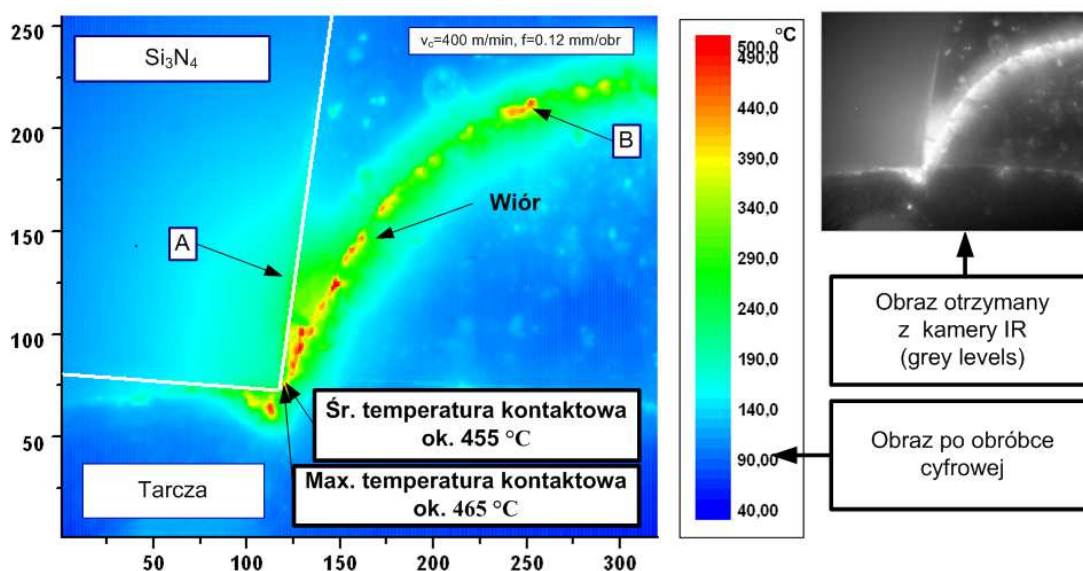
W przypadku skrawania ostrzami z ceramiki azotkowej duża koncentracja stref wysokiej temperatury oznaczona kolorem czerwonym, znajdowała się poza strefą skrawania jak przedstawiono na rys. 5.25÷26 (np. na końcu wióra rys. 5.25–B). Fakt ten można wytłumaczyć tym, że podczas skrawania użyto dla ostrzy z ceramiki azotkowej oprawki, w której kąt pochylenia krawędzi skrawającej wyniósł $\lambda_s = -6^\circ$. W trakcie procesu tworzenia, wiór obrócił się stroną spęczoną do kamery IR, czego konsekwencją było zarejestrowanie wysokiej wartości temperatury poza strefą tworzenia wióra. Strona spęczona ma znacznie większą chropowatość, a co za tym idzie, zwiększa się emisyjność (co potwierdzają dane literaturowe [38]), wprowadzając tym samym błędy w uzyskanym obrazie.



Rys. 5.25. Mapa rozkładu temperatury w strefie skrawania otrzymana przy użyciu ostrza z pokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że najwyższa temperatura kontaktowa występuje na powierzchni natarcia w pewnej odległości od krawędzi skrawającej tam, gdzie wiór najsilniej naciska i trze o powierzchnię natarcia (co jest zgodne z danymi literaturowymi [43]).

W załączniku A przedstawiono wszystkie mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego żeliwa sferoidalnego.



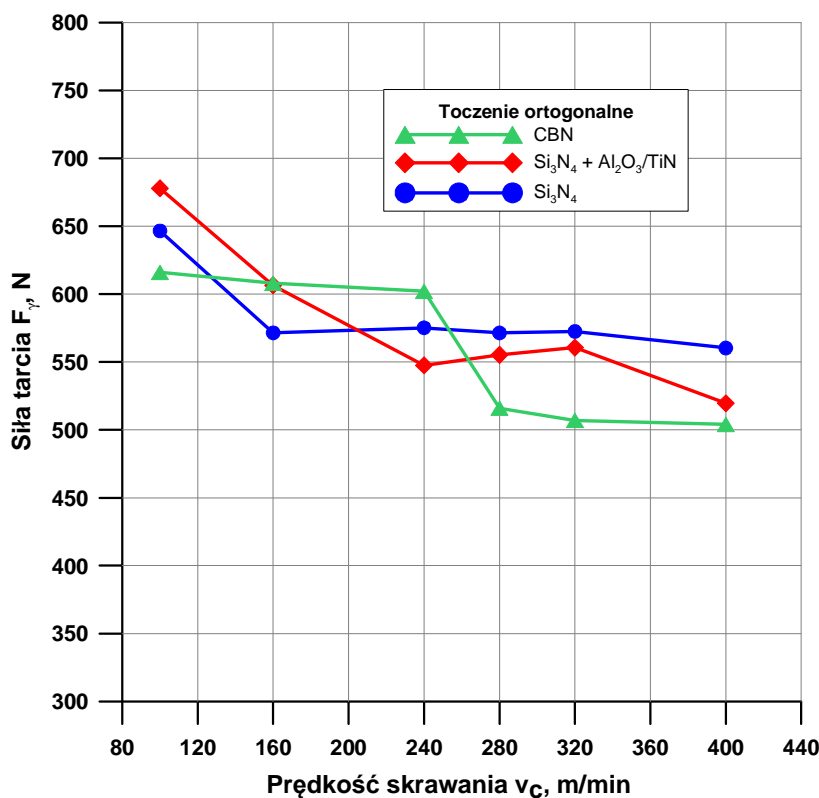
Rys. 5.26. Mapa rozkładu temperatury w strefie skrawania otrzymana przy użyciu ostrza z niepokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

5.3. TRIBOLOGICZNE ODDZIAŁYWANIA W PROCESIE SKRAWANIA

Badając proces skrawania należy uwzględnić, oprócz oddziaływań mechanicznych i termicznych jeszcze oddziaływania tribologiczne. W rozdziale 5.3 przedstawiono wyniki badań wyznaczone za pomocą klasycznego modelu ortogonalnego (koło Marchenta), który uwzględnia kąt natarcia γ_0 wynikający z geometrii zastosowanej oprawki narzędziowej (tabela 4.4). Wartość kąta tarcia wyznaczono na podstawie wzorów użytych w pracach [40, 63] dla narzędzi o ujemnym kącie natarcia. Do oceny oddziaływań tribologicznych w strefie styku wiór – ostrze wykorzystano siłę tarcia F_γ i współczynnik tarcia μ oraz średnie naprężenia kontaktowe (normalne σ_k i styczne τ_k).

5.3.1. Siła tarcia

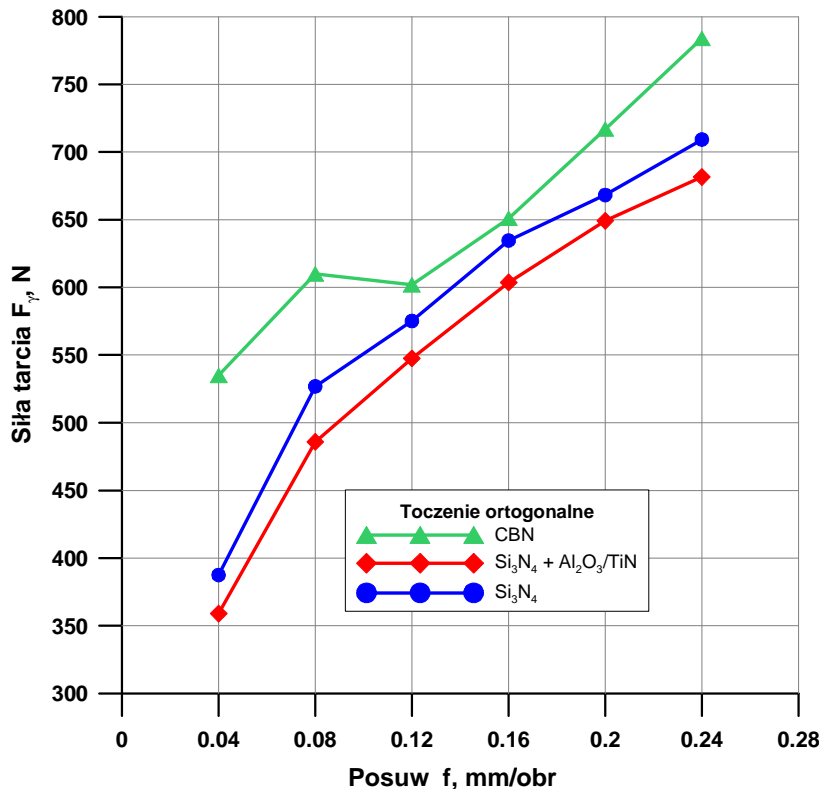
Na rys. 5.27 przedstawiono średnie wartości siły tarcia F_γ w funkcji prędkości skrawania uzyskane dla badanych ostrzy narzędzi skrawających.



Rys. 5.27. Wpływ prędkości skrawania na wartość siły tarcia F_γ ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Na podstawie przeprowadzonych analiz wyników badań stwierdzono, że wartości siły F_γ dla niepokrywanej ceramiki azotkowej, jak i ceramiki pokrywanej są do siebie zbliżone i różnią się ok. 10÷40 N, w zależności od prędkości skrawania. Zaobserwowano dla ostrza z niepokrywanej ceramiki azotkowej, że w badanym zakresie prędkości siła tarcia maleje stopniowo o ok. 15%, a dla pokrywanej ceramiki azotkowej spadek wartości F_γ wynosił ok. 25%. W przypadku skrawania ostrzem z CBN w zakresie $v_c=280\div400$ m/min, zarejestrowano najmniejszą wartości F_γ wynoszącą ok. 510 N.

Wraz ze wzrostem posuwu, jak wynika z rys. 5.28, rosną wartości siły tarcia. Zauważono, że dla ostrzy z ceramiki azotkowej następuje dwukrotny wzrost wartości siły F_γ w badanym zakresie posuwu (rys. 5.28). Skrawając ostrzem z CBN w zakresie posuwu $f=0,04\div0,08$ mm/obr, zauważono większe wartości siły F_γ o ok. 100÷160 N w porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej, co może wynikać z braku stabilności procesu skrawania. Cechą charakterystyczną analizowanej zależności jest zbliżony przebieg siły F_γ dla ostrzy z ceramiki azotkowej. Dla pokrywanej ceramiki azotkowej uzyskano mniejsze wartości o ok. 20÷40 N w badanym zakresie posuwu, w porównaniu z ostrzem z niepokrywanej ceramiki azotkowej.



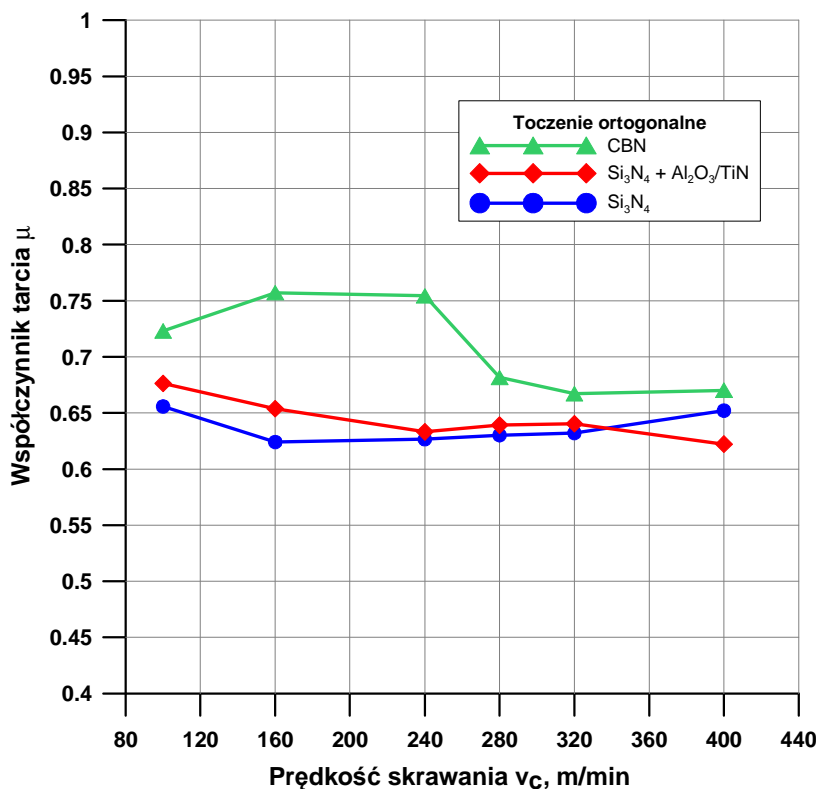
Rys. 5.28. Wpływ posuwu na wartość siły tarcia F_γ
($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Podsumowując, można stwierdzić, że im większy posuw tym większa siła tarcia działająca na powierzchni natarcia ostrza.

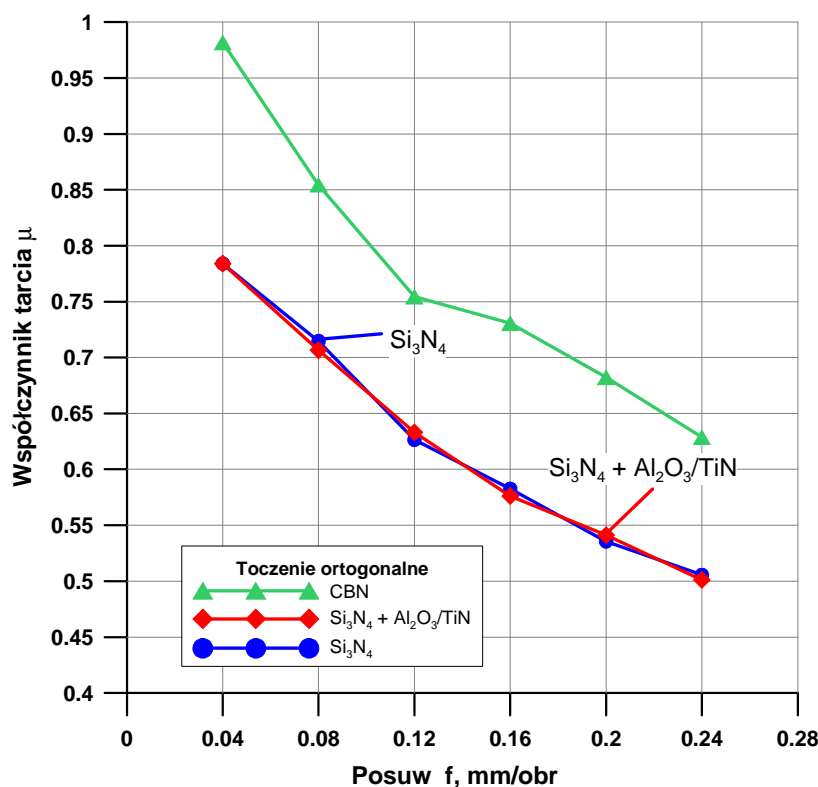
5.3.2. Współczynnik tarcia

Rysunki 5.29 i 5.30 obrazują zależność współczynnika tarcia μ od prędkości skrawania i posuwu. Przebieg współczynnika tarcia μ w funkcji prędkości skrawania (rys. 5.29) dla badanych ostrzy narzędzi skrawających zmienia się w zakresie ok. $0,75 \div 0,6$. Wartości współczynnika μ dla pokrywanej jak i niepokrywanej ceramiki azotkowej są do siebie zbliżone.

Jak wynika z rys. 5.30, wraz ze wzrostem posuwu następuje spadek wartości współczynnika tarcia. Największą wartość μ ok. 1 zarejestrowano dla ostrza z CBN, gdy skrawano z posuwem $f=0,04$ mm/obr. Cechą charakterystyczną zależności rys. 5.30 są identyczne wartości współczynnika tarcia dla ostrzy z ceramiki azotkowej. W przypadku skrawania ostrzem z CBN stwierdzono większe wartości współczynnika o ok. 0,15 w porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej. Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że różnice między wartościami współczynnika tarcia dla ostrzy z ceramiki azotkowej są zbyt małe, żeby można było zauważyć jakikolwiek wpływ powłoki na charakter tego przebiegu.



Rys. 5.29. Wpływ prędkości skrawania na współczynnik tarcia μ ($v_c=100 \div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

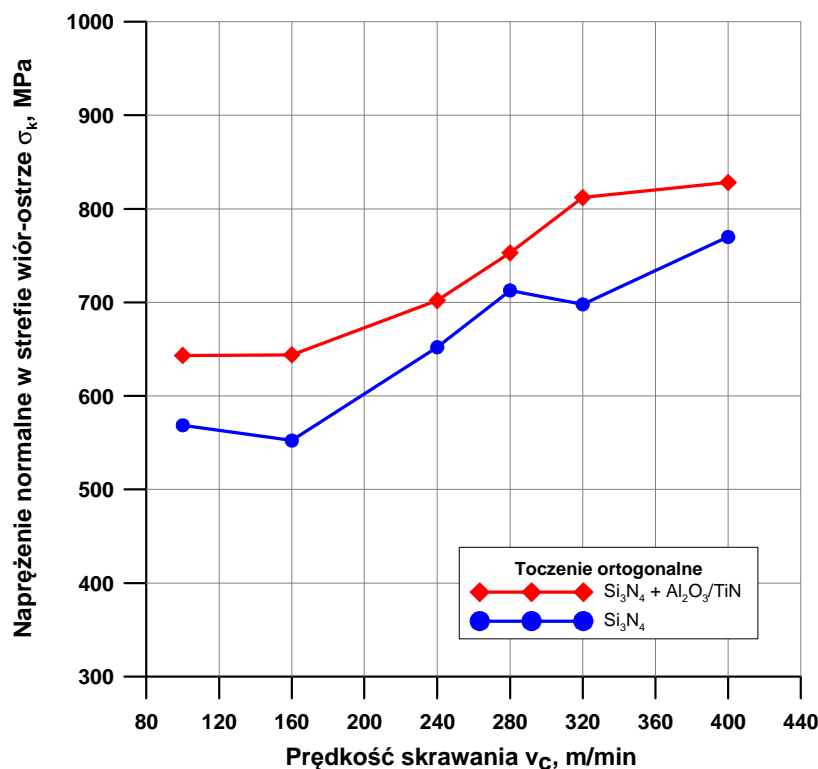


Rys. 5.30. Wpływ posuwu na współczynnik tarcia μ
 ($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że zastosowane parametry skrawania zmieniają wyraźnie warunki tribologiczne w strefie wiór-ostrze. Przebiegi współczynnika tarcia w funkcji prędkości skrawania i posuwu uzyskane dla ostrza z niepokrywanej ceramiki azotkowej są zbliżone do danych przedstawionych w literaturze [12].

5.3.3. Naprężenia kontaktowe w strefie wiór - ostrze

Zmiany wartości naprężeń normalnych w funkcji prędkości skrawania i posuwu przedstawiono na rys. 5.31 i 5.32. Jak wynika z rys. 5.31 wartość naprężenia normalnego σ_k zmienia się w zakresie od ok. 550 MPa do ok. 800 MPa, w zależności od zastosowanych parametrów skrawania. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania następuje wzrost wartości naprężenia normalnego σ_k . Jest to konsekwencja zmniejszającej się długości styku, a co za tym idzie, zmniejszenia pola kontaktu. W przypadku zastosowania pokrywanej ceramiki azotkowej uzyskano większe wartości σ_k o ok. 40÷100 MPa, w porównaniu z ostrzem bez powłoki.

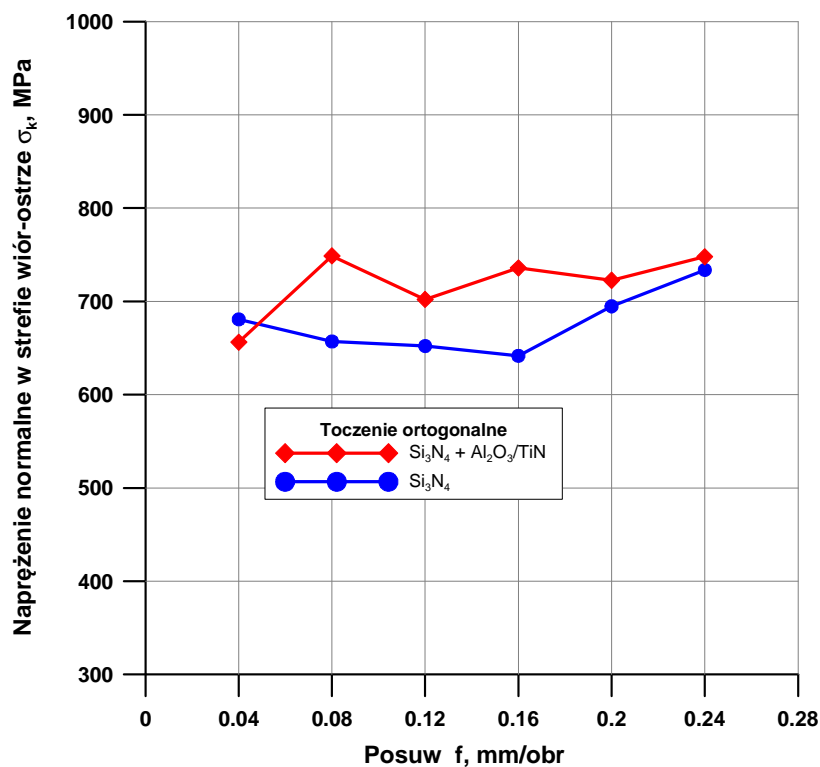


Rys. 5.31. Wpływ prędkości skrawania na wartość napężenia normalnego σ_k ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

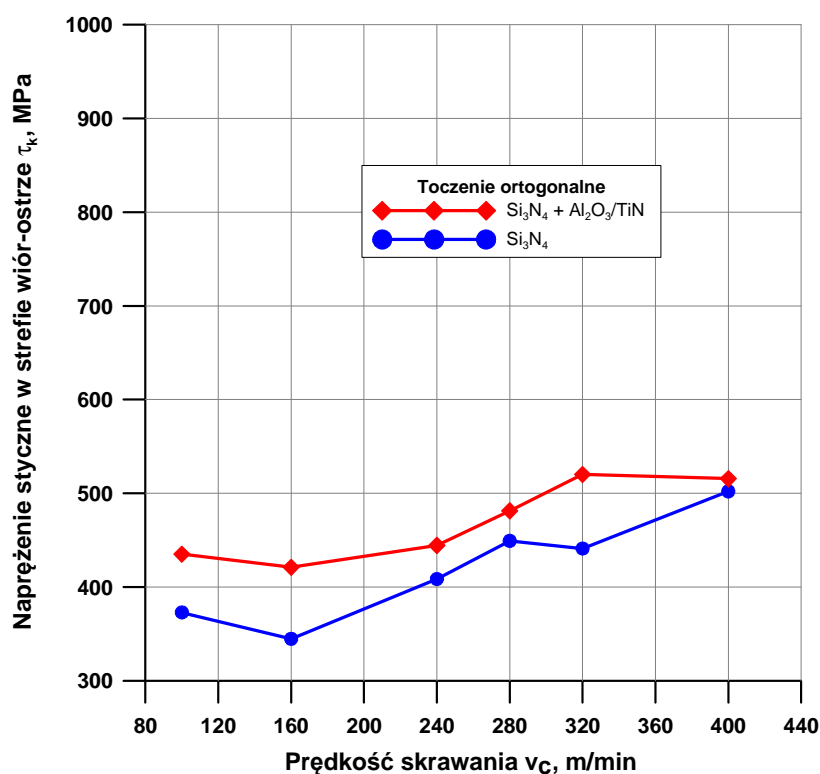
Jak wynika z rys 5.32, wzrost posuwu nie wpływa istotnie na zmianę wartości naprężeń normalnych. Wartość naprężeń w funkcji posuwu zmieniała się w zakresie od ok. 670 do ok. 740 MPa, czyli przyrost wartości σ_k wynosił zaledwie ok. 70 MPa.

Na rys. 5.33 i 5.34 przedstawiono zmiany naprężeń stycznych w funkcji prędkości skrawania i posuwu. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania następuje przyrost wartości naprężeń stycznych w zakresie od ok. 380 MPa do ok. 500 MPa. Analizując wpływ posuwu można stwierdzić, że zmniejszenie wartości naprężeń stycznych może być kojarzone z obniżeniem wartości współczynnika tarcia w badanym zakresie posuwu.

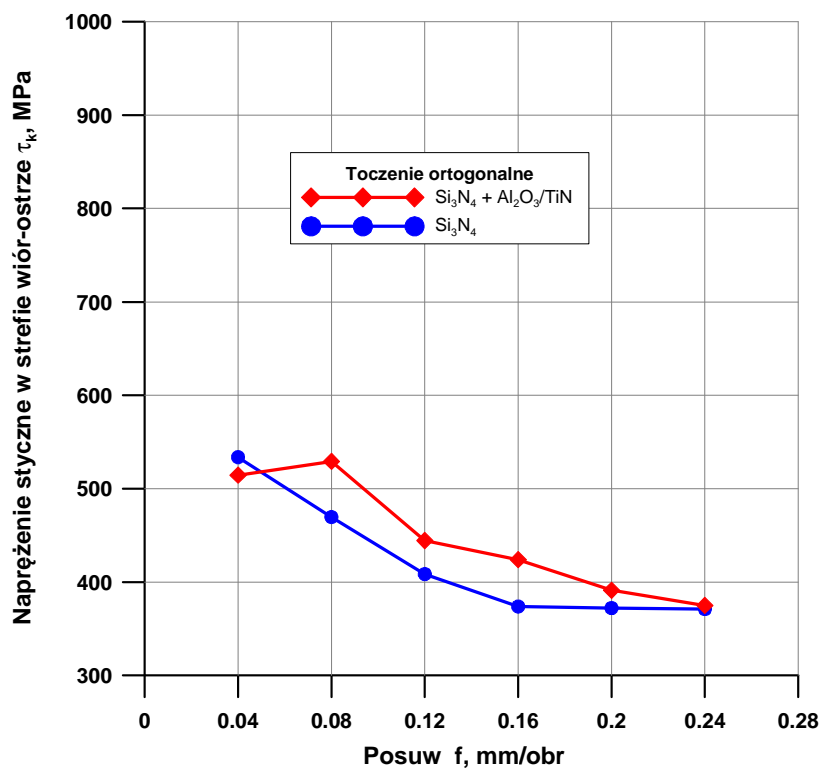
Podsumowując, można wnioskować, że zastosowanie powłoki nie wpływa widocznie na obniżenie naprężeń kontaktowych. Stwierdzono nawet, że w przypadku zastosowania pokrywanej ceramiki azotkowej uzyskano minimalnie większe wartości naprężeń kontaktowych.



Rys. 5.32. Wpływ posuwu na wartość naprężenia normalnego σ_k ($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



Rys. 5.33. Wpływ prędkości skrawania na wartość naprężenia stycznego τ_k ($v_c=100\div400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



Rys. 5.34. Wpływ posuwu na wartość napężenia stycznego τ_k
($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

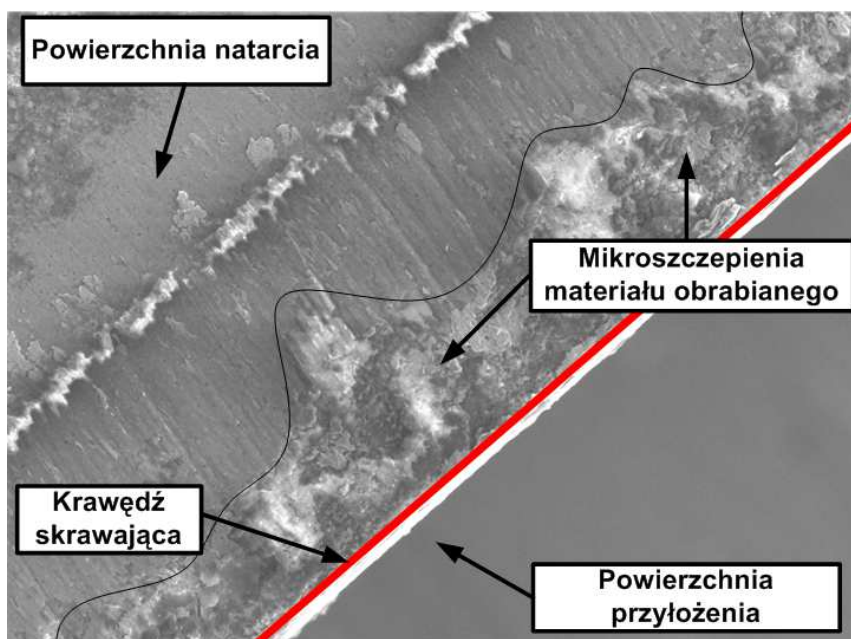
5.4. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ DOTYCZĄCYCH PROCESU SKRAWANIA

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych toczenia ortogonalnego i analizy wszystkich uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania następuje zmniejszenie wymiarów strefy kontaktu (l_{nc}). W konsekwencji doprowadza to do zmniejszenia wartości składowych sił F_c i F_f . Fakt ten wynika z tego, że wraz ze zmniejszającą się długością styku zmniejsza się obszar zacierania wióra o powierzchnię natarcia, czego konsekwencją są zmniejszające się wartości sił skrawania. Należy również uwzględnić wzrost średniej i maksymalnej temperatury kontaktowej w funkcji prędkości, która może mieć wpływ na zmniejszenie wytrzymałości materiału, a tym samym może doprowadzić do zmniejszenia wartości sił skrawania w badanym zakresie prędkości skrawania. Mniejsze wartości zarejestrowanych sił dla ostrza z CBN można wytłumaczyć faktem zastosowania innej geometrii narzędzia, gdzie $\gamma_o=0^\circ$. W przypadku skrawania ostrzem z CBN w zakresie posuwu $f=0,04\div 0,08$ mm/obr, stwierdzono wzrost sił skrawania oraz maksymalnej jak i średniej temperatury kontaktowej. Na podstawie przeprowadzonych badań fakt ten można wytłumaczyć zastosowaniem w badanym ostrzu zaokrąglonej krawędzi skrawającej (tabela 4.4). Wzrost wartości składowych sił (F_c , F_f) oraz wartości średniej temperatury kontaktowej w badanym zakresie posuwu wynika ze zwiększającej się grubości warstwy skrawanej, a tym samym wzrostu pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej.

Pomiar rozkładu temperatury w strefie skrawania za pomocą kamery IR dostarcza wielu problemów wynikających z określenia położenia maksymalnej i średniej temperatury kontaktowej w strefie skrawania. Należy również zwrócić uwagę, że w przypadku zastosowania oprawek narzędziowych z kątem pochylenia krawędzi skrawających otrzymuje się obrazy, w których najwyższa temperatura może znaleźć się „poza strefą skrawania”.

Podsumowując oddziaływania tribologiczne można stwierdzić, że otrzymane wyniki mają charakter poglądowy. W celu głębszej analizy problemu należy rozwinąć model ortogonalny o uwzględnienie fazki technologicznej dla płytek skrawających o ujemnym kącie natarcia.

Zbliżone przebiegi otrzymanych charakterystyk mechanicznych, termicznych i tribologicznych dla narzędzi z pokrywanej i niepokrywanej ceramiki azotkowej, mogą być kojarzone z podobnymi właściwościami fizykomechanicznymi użytych ostrzy. Brak wpływu powłoki $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ na przebieg procesu (oddziaływania mechaniczne, termiczne i tribologiczne) może wynikać z przyklejania się materiału obrabianego do ostrza (powłoki), a wraz ze wzrostem prędkości skrawania wzrasta również intensywność nanoszenia materiału obrabianego na ostrze. Przyczynę takiego zjawiska należy upatrywać w mikroszczepieniach materiału obrabianego (rys. 5.35). Na charakter otrzymanych zależności duży wpływ może mieć również sztywność układu OPUN.



Rys. 5.35. Mikroszczepienia z żeliwa sferoidalnego na pokrywanej ceramice azotkowej ($v_c=320$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

5.5. STAN GEOMETRYCZNY POWIERZCHNI OBROBIONEJ

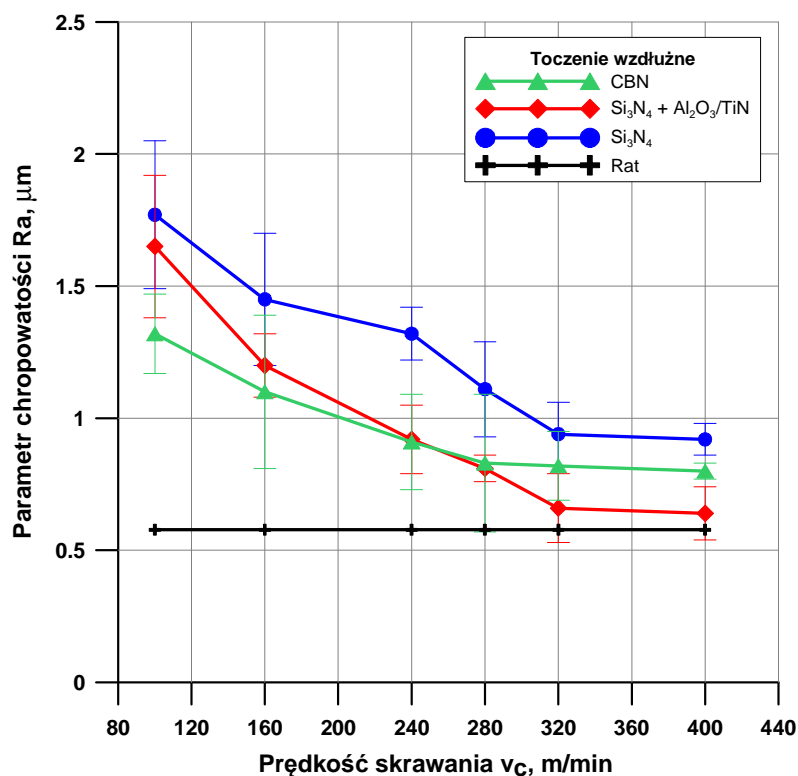
Badania podstawowe procesu skrawania rozszerzono o pomiar chropowatości powierzchni żeliwa sferoidalnego po toczeniu dokładnym ostrzami z CBN i ceramiki azotkowej. Do opisu mikronierówności powierzchni wybrano następujące parametry:

- pionowe: R_z – maksymalna wysokość nierówności ($R_z=R_p+R_v$),
- amplitudowe: R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu, R_{sk} – współczynnik asymetrii profilu, R_{ku} – współczynnik nachylenia profilu,
- poziome: R_{Sm} – średnia szerokość rowków elementów profilu,
- mieszane: $R_{\Delta q}$ – średni kwadratowy wznios profilu,
- krzywą udziału materiałowego: R_k – głębokość rdzenia chropowatości, R_{pk} – zredukowana wysokość wzniesień, R_{vk} – zredukowana głębokość wgłębień.

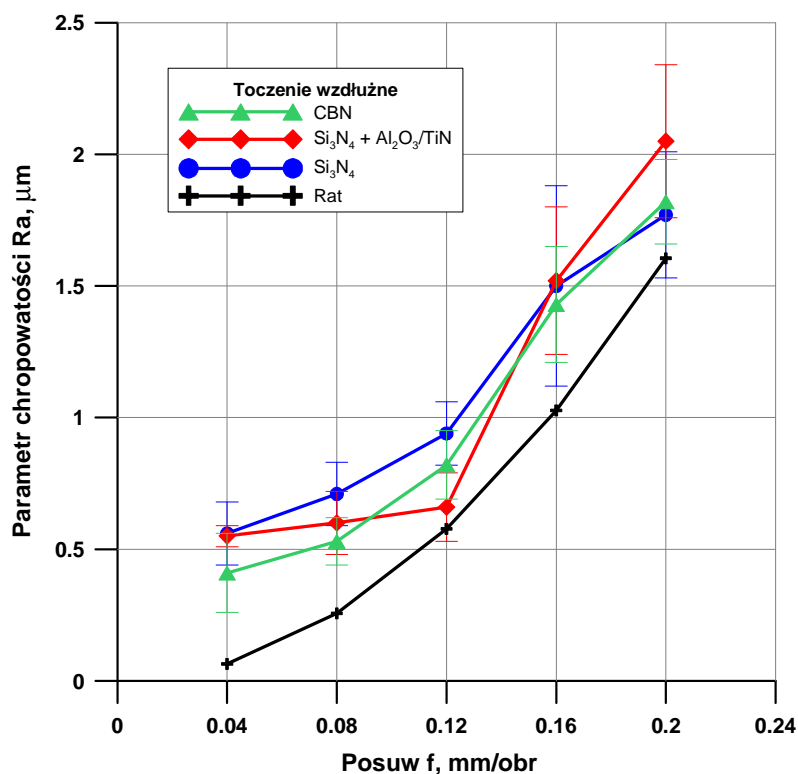
Dodatkowo dla wybranych powierzchni przedstawiono rzeczywiste obrazy powierzchni i ich topografie.

5.5.1. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na parametr chropowatości R_a

Parametr chropowatości R_a jest to średnia arytmetyczna wartość bezwzględna wszystkich odchyleń od linii średniej w przedziale odcinka elementarnego [59]. Jest to jeden z najczęściej używanych parametrów chropowatości do oceny stanu geometrycznego powierzchni [11, 42, 61]. Jak wynika z przeprowadzonych testów toczenia wzdłużnego żeliwa sferoidalnego, wraz ze wzrostem prędkości (rys. 5.36) skrawania następuje spadek wartości parametru R_a , z drugiej strony wzrost posuwu powoduje (rys. 5.37) zwiększenie wartości tego parametru. Analizując wpływ prędkości skrawania na parametr R_a stwierdzono, że największe wartości R_a ($1,7\div 0,9 \mu\text{m}$) uzyskano dla ostrza z niepokrywanej ceramiki azotkowej. W przypadku użycia ostrza z pokrywanej ceramiki azotkowej najniższą wartość parametru R_a zarejestrowano dla prędkości w zakresie od $v_c=240 \text{ m/min}$ do $v_c=400 \text{ m/min}$. Nieznacznie większe wartości R_a zmierzono dla ostrza z CBN ($v_c=240\div 400 \text{ m/min}$). Ostrze to zaś lepiej sprawdza się w zakresie mniejszych prędkości ($v_c=100\div 160 \text{ m/min}$) w porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej. Na wykresie naniesiono również teoretyczną wartość parametru chropowatości R_a ($R_{at}=0,57 \mu\text{m}$) wyznaczoną z wzoru 4.11.



Rys. 5.36. Wpływ prędkości skrawania na wartość parametru chropowatość Ra ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)



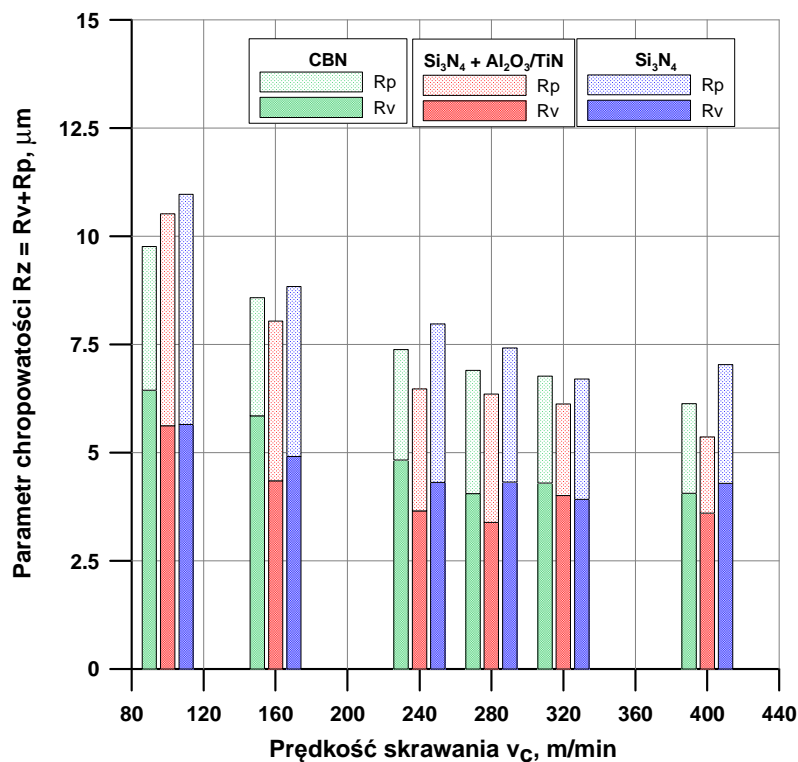
Rys. 5.37. Wpływ posuwu na wartość parametru chropowatość Ra ($v_c=320$ m/min, $f=0,04\div 0,2$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

Jak wynika z rys. 5.37, w porównaniu z ceramiką niepokrywaną mniejsze wartości parametru Ra otrzymano dla ostrzy z CBN i pokrywanej ceramiki azotkowej.

Dla wszystkich badanych ostrzy narzędzi skrawających przebiegi mają tendencję rosnącą w badanym zakresie posuwu, co jest zgodne z danymi literaturowymi [14].

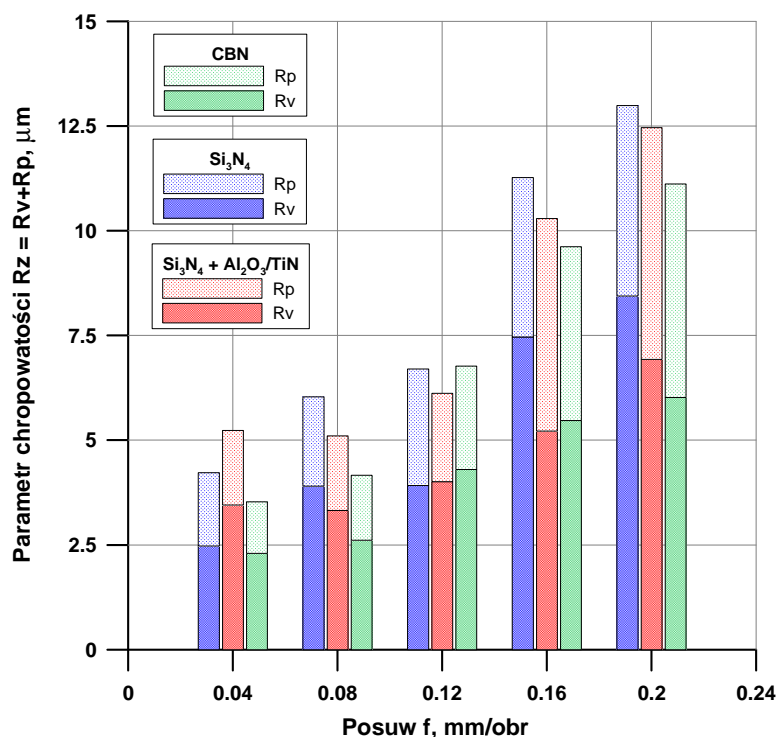
5.5.2. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na parametr chropowatości Rz

Rysunek 5.38 przedstawia wartość parametru chropowatości Rz oraz udział składowych Rp (maksymalnej wysokości profilu) i Rv (maksymalnego wgłębienia profilu) otrzymane po toczeniu dokładnym żeliwa sferoidalnego. Jak wynika z rys 5.38, wraz ze wzrostem prędkości skrawania następuje spadek wartości parametru Rz, a tym samym zmniejszenie wartości poszczególnych składowych Rp i Rv. Wartość parametru Rz zmieniała się w zakresie od ok. 10,5 μm do ok. 6 μm w zależności od zastosowanej prędkości skrawania i gatunku materiału ostrza narzędzia skrawającego. Analizując składowe parametru Rz zauważono relację, że $Rv > Rp$ w badanym zakresie prędkości. Wynika to z występowania w profilu chropowatości głębokich, lokalnych wgłębień.



Rys. 5.38. Wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni Rz ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

Na podstawie rys. 5.39 zaobserwowano, że wraz ze wzrostem posuwu następuje wzrost wartości parametru Rz w zakresie od ok. 4 μm do ok. 12 μm . Cechą charakterystyczną, tak jak na rys. 5.39, jest zależność składowych, że $Rv > Rp$. Najmniejsze wartości parametru Rz otrzymano, gdy skrawano ostrzem z CBN w badanym zakresie posuwu (wyjątek, gdy $f=0,12$ mm/obr).

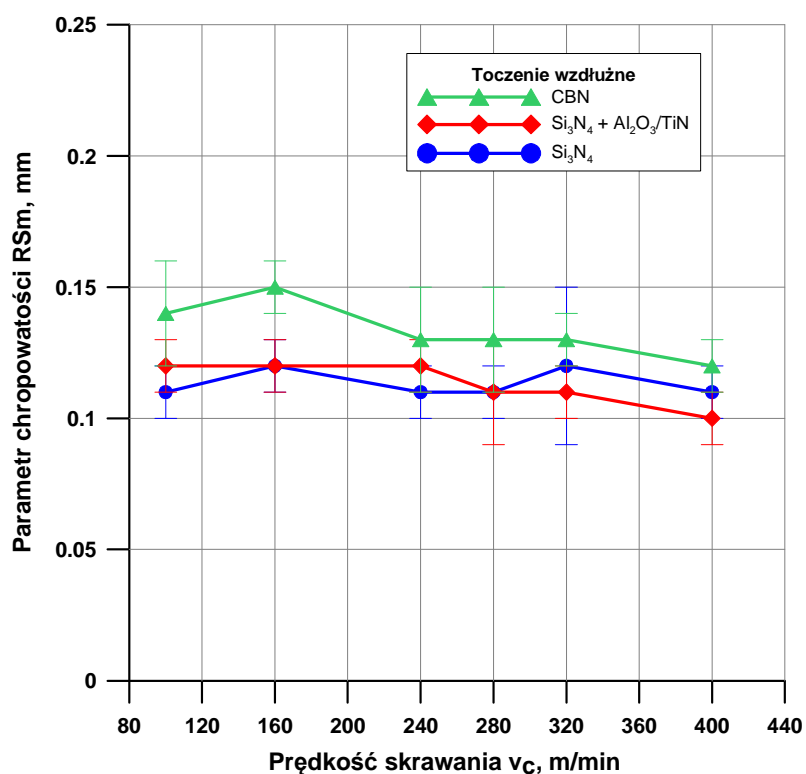


Rys. 5.39. Wpływ posuwu na wartość parametru chropowatości Rz ($v_c=320$ m/min, $f=0,04\div 0,2$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

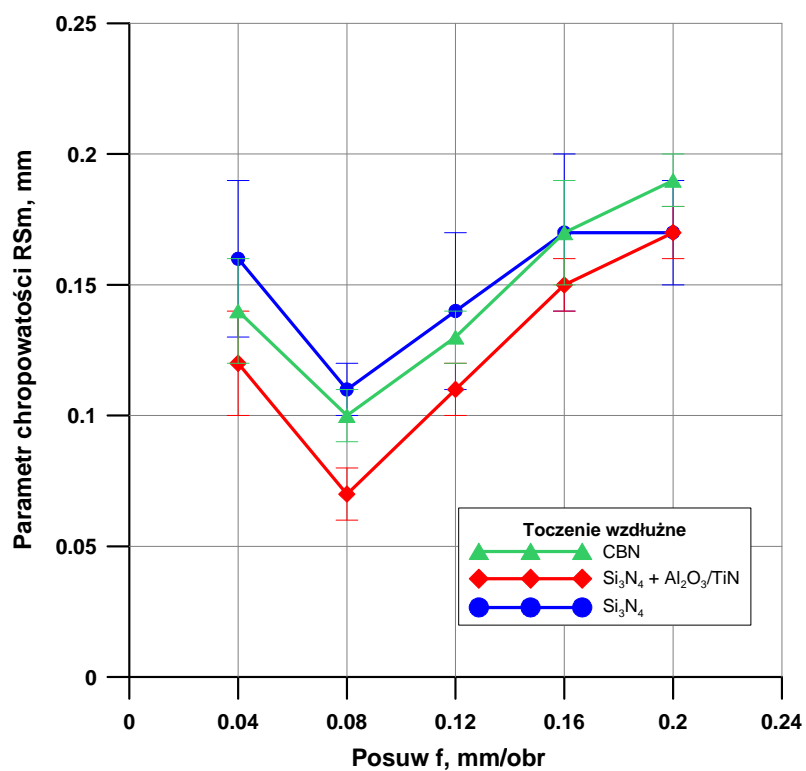
5.5.3. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na odstęp nierówności RSm

Parametr RSm określa średnią wartość szerokości elementów profilu wewnątrz odcinka elementarnego [1]. Jak wynika z rys. 5.40, wartość odstępów profilu dla ostrzy z pokrywanej i niepokrywanej ceramiki azotkowej zawiera się w przedziale $R_{Sm}=0,12\div 0,11$ mm, a tym samym wartość ta zbliżona jest do wartości zastosowanego posuwu ($f=0,12$ mm/obr). Nieco większe wartości uzyskano skrawając ostrzem z CBN ($R_{Sm}=0,14\div 0,13$ mm). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że prędkość skrawania nie wpływa istotnie na przebieg wartości parametru chropowatości RSm.

Na wartość analizowanego parametru RSm największy wpływ ma zastosowany posuw (rys 5.41). Generalnie dla profili otrzymanych przy zmiennym posuwie wartość parametru poziomego malała wraz z jego zmniejszaniem. Wartość parametru RSm zmieniała się w zakresie od ok. 0,08 mm do ok. 0,18 mm ($f=0,08\div 0,2$ mm/obr). Interesującym wynikiem było otrzymanie dla najmniejszego posuwu ($f=0,04$ mm/obr) wartości parametru RSm 3 razy większych od wartości zastosowanego posuwu. Fakt ten można wytłumaczyć tym, że dla zastosowanego posuwu ($f=0,04$ mm/obr) nastąpiło silne płynięcie materiału.



Rys. 5.40. Wpływ prędkości skrawania na wartość parametru chropowatości RSm ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

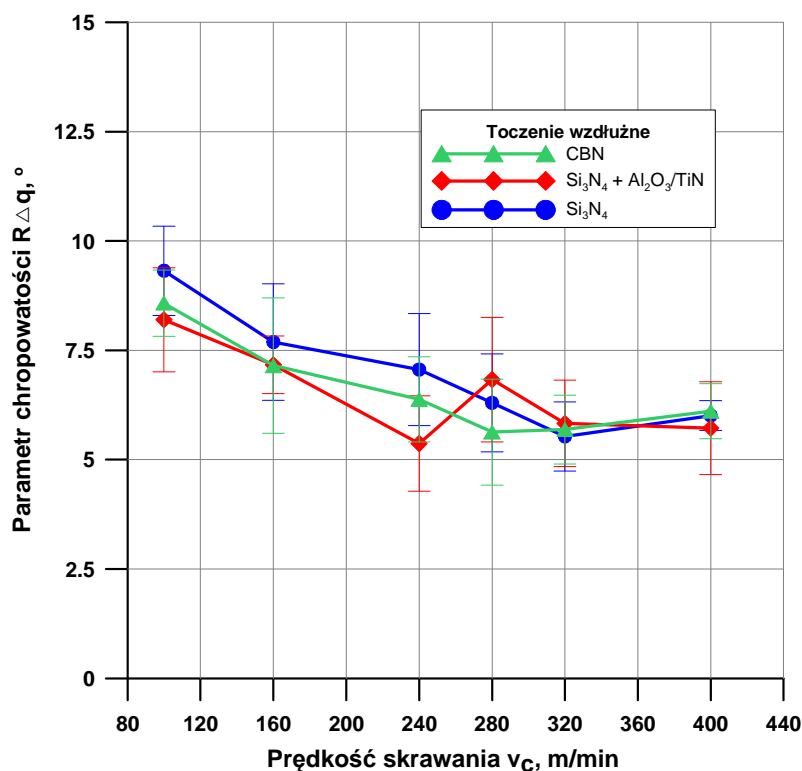


Rys. 5.41. Wpływ posuwu na wartość parametru chropowatości RSm ($v_c=320$ m/min, $f=0,04\div 0,2$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

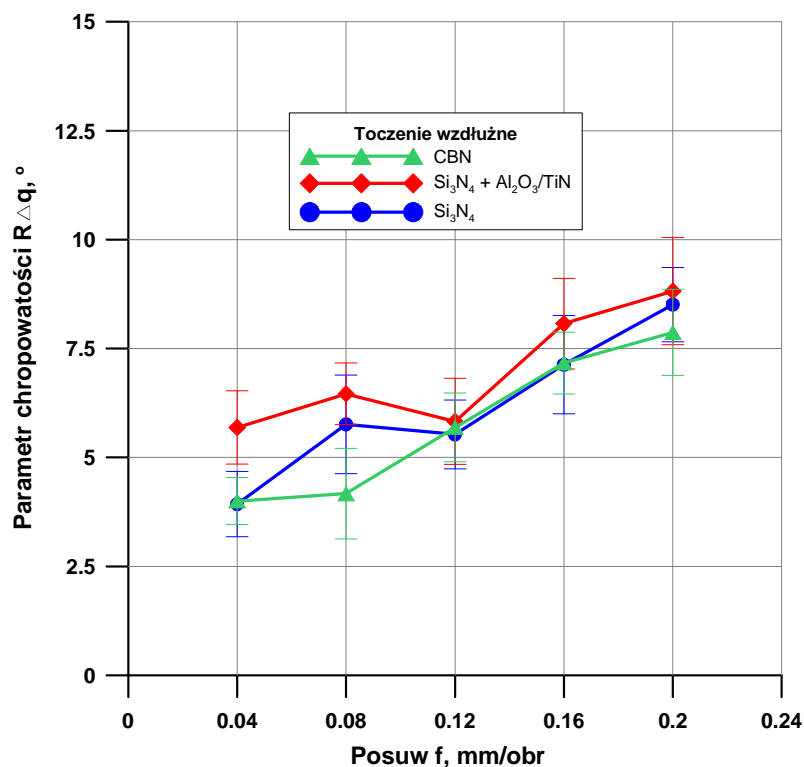
5.5.4. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na pochylenie profilu $R\Delta q$

Średnie kwadratowe pochylenie profilu chropowatości $R\Delta q$ (średni kwadratowy wznios profilu [1]) jest to średnia kwadratowa bezwzględnych pochyleń profilu względem linii średniej. Parametr ten jest bardzo wrażliwy na występowanie wartości ekstremalnych [59]. W analizowanym przypadku wpływu prędkości skrawania na wartość parametru $R\Delta q$ (rys. 5.42) zarejestrowano zmiany tego parametru w zakresie $R\Delta q=9\div 6^\circ$. Stwierdzono, że gdy skrawano z prędkością $v_c=320\div 400$ m/min, otrzymano zbliżone wartości analizowanego parametru dla wszystkich badanych ostrzy narzędzi skrawających.

Jak wynika z rys. 5.43 wraz ze wzrostem posuwu wartość parametru $R\Delta q$ zmieniała się w zakresie $R\Delta q=4\div 9^\circ$. Największe wartości $R\Delta q$ w badanym zakresie posuwu otrzymano dla ostrza z pokrywanej ceramiki azotkowej. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zbliżone wartości parametru $R\Delta q$ dla wszystkich zastosowanych narzędzi zależą głównie od odwzorowania geometryczno-kinematycznego ostrza narzędzia skrawającego oraz od odwzorowania samej krawędzi skrawającej.



Rys. 5.42. Wpływ prędkości na wartość parametru chropowatości $R\Delta q$ ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)



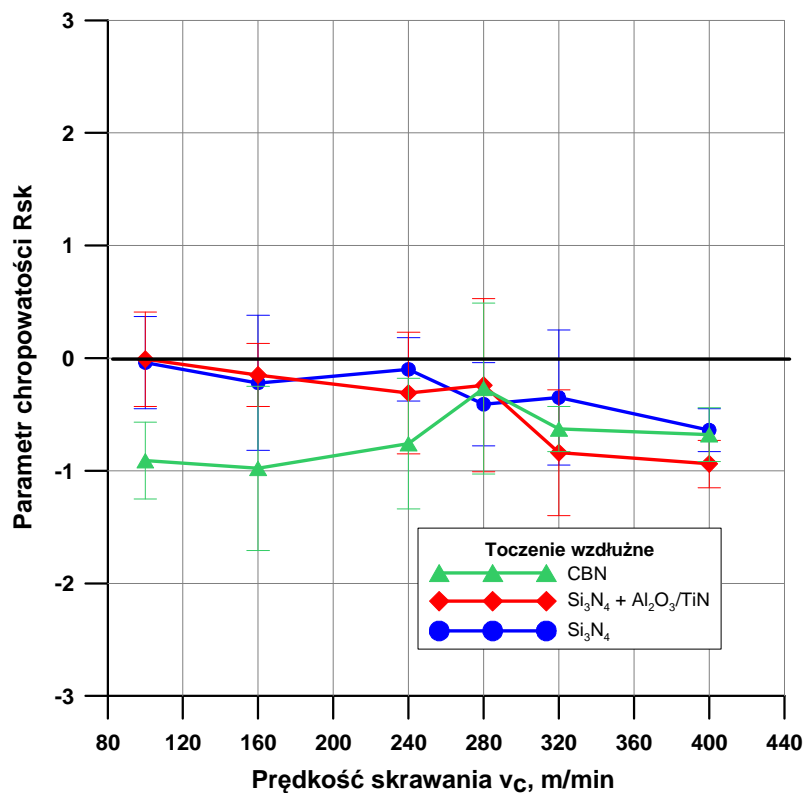
Rys. 5.43. Wpływ posuwu na wartość parametru chropowatości $R_{\Delta q}$ ($v_c=320$ m/min, $f=0,04\div 0,2$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

5.5.5. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na współczynnik skośności profilu R_{sk}

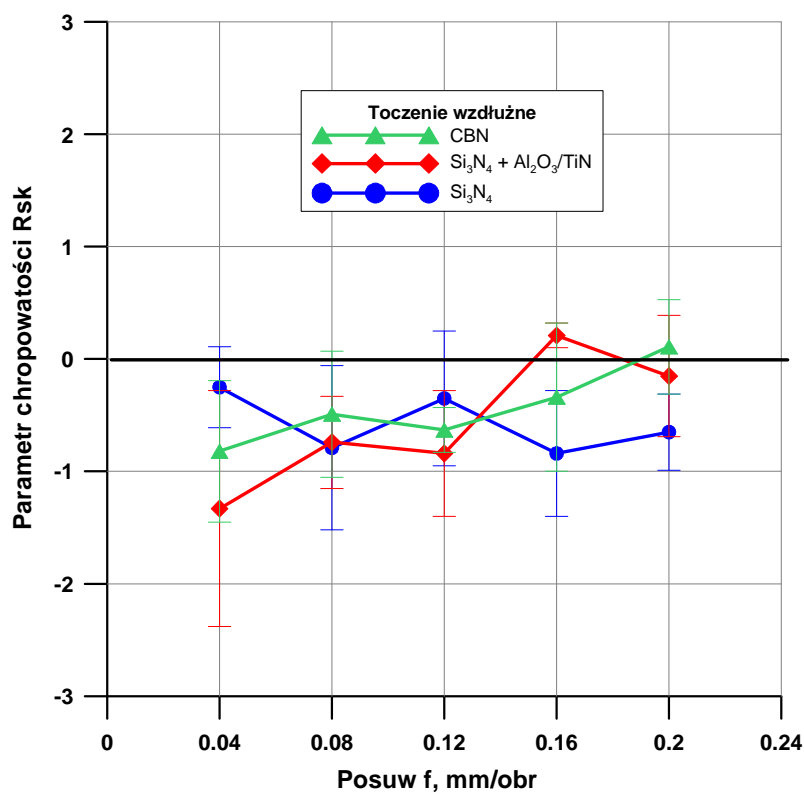
Współczynnik skośności profilu R_{sk} jest to współczynnik asymetrii, który jest momentem trzeciego rzędu krzywej rozkładu amplitudy, określonej na długości odcinka elementarnego [59]. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania (rys. 5.44) następuje spadek wartości analizowanego parametru R_{sk} w zakresie od ok. $R_{sk}=0$ do ok. $R_{sk}=-0,9$ dla ostrzy z ceramiki azotkowej. W przypadku skrawania ostrzem z CBN uzyskano bardziej stabilny przebieg parametru R_{sk} ($R_{sk}=-0,9\div -0,7$). Zaobserwowano, że w zakresie prędkości $v_c=160\div 400$ m/min, otrzymano wartości $R_{sk} < 0$ dla wszystkich badanych ostrzy narzędzi skrawających. Oznacza to koncentrację materiału w pobliżu wierzchołków profilu.

W przypadku analizy wpływu posuwu na wartość parametru R_{sk} (rys. 5.45) uzyskano ujemne wartości tego parametru. Wyjątkiem było, gdy skrawano ostrzem z pokrywanej ceramiki azotkowej ($f=0,16$ mm/obr) i CBN ($f=0,2$ mm/obr), gdyż wtedy otrzymano $R_{sk} > 0$. Stwierdzono, że dla ostrzy z pokrywanej ceramiki azotkowej i CBN nastąpił wzrost wartości R_{sk} w badanym zakresie posuwu. Należy dodać, że

analizowany parametr jest wrażliwy na pojedyncze wzniesienia i wgłębienia profilu, stąd duży rozrzut przedziałów ufności.



Rys. 5.44. Wpływ prędkości skrawania na wartość parametru chropowatość Rsk ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)



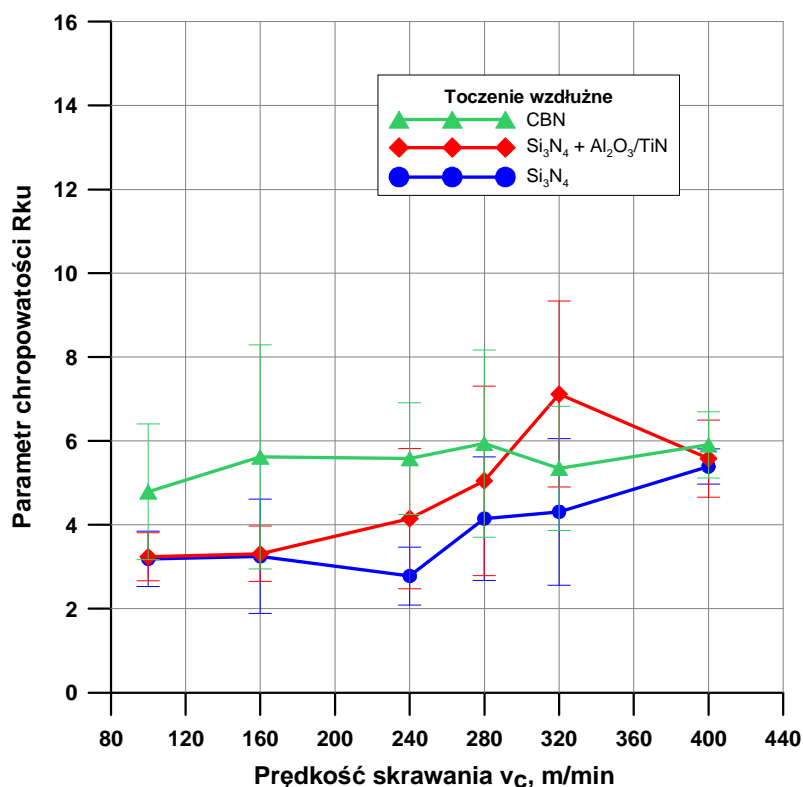
Rys. 5.45. Wpływ posuwu na wartość parametru chropowatość Rsk ($v_c=320$ m/min, $f=0,04\div 0,2$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

5.5.6. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na nachylenie profilu Rku

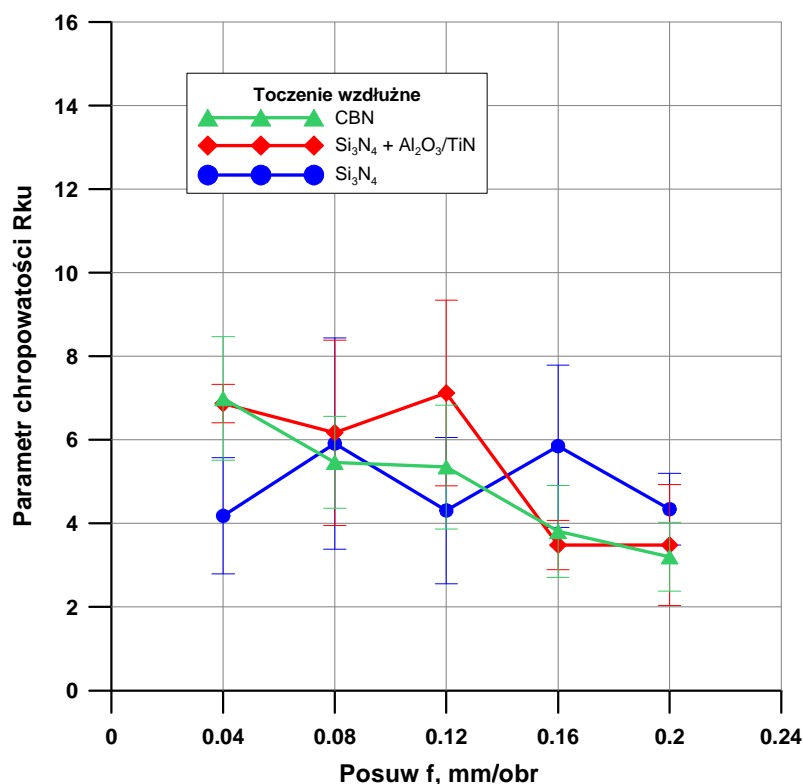
Parametr Rku (kurtoza) jest to współczynnik nachylenia profilu odpowiedzialny za miarę ostrości krzywej rozkładu amplitud (dla rozkładu Gaussa $Rku=3$). Jak wynika z rys. 5.46 wartość analizowanego parametru Rku zwiększała się wraz ze wzrostem prędkości skrawania dla ostrzy z ceramiki azotkowej w zakresie od ok. 3 do ok. 6. W przypadku skrawania ostrzem z CBN można zauważyć bardziej ustabilizowany przebieg wartości Rku w zakresie od ok. 5 do ok. 6. Zbliżone wartości parametru Rku dla wszystkich badanych ostrzy narzędzi skrawających otrzymano, gdy skrawano z maksymalną prędkością $v_c=400$ m/min.

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem posuwu (rys. 5.47) następuje spadek wartości parametru Rku (od ok. 7 do ok. 3,5) dla ostrza z CBN i pokrywanej ceramiki azotkowej.

Podsumowując, można stwierdzić, że w zakresie użytych parametrów skrawania otrzymano wartości Rku od ok. 3 do ok. 7. Oznacza to, że otrzymano profile powierzchni, które mają ostrą krzywą rozkładu amplitud, a w konsekwencji ostre wierzchołki i rowki profilu.



Rys. 5.46. Wpływ prędkości skrawania na parametr chropowatości Rku ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

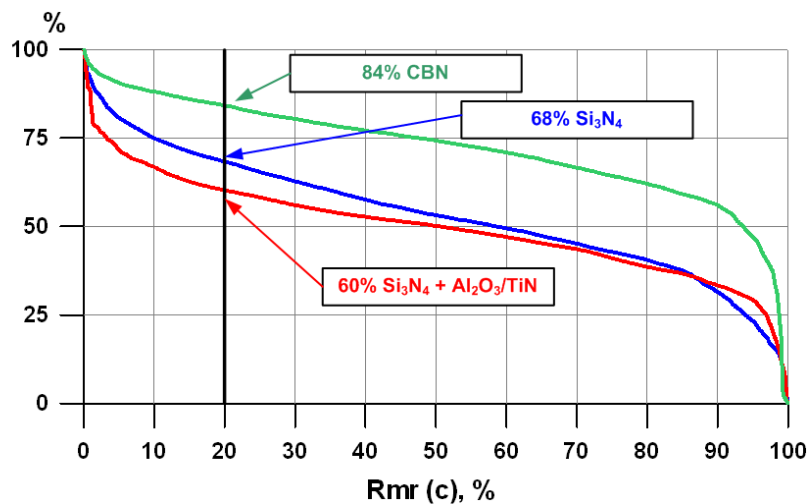


Rys. 5.47. Wpływ posuwu na parametr chropowatości Rku
($v_c=320$ m/min, $f=0,04\div 0,2$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

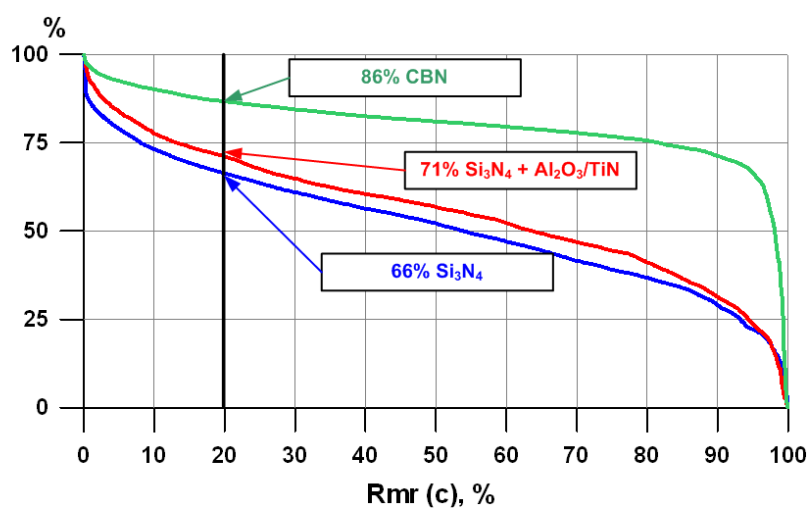
5.5.7. Krzywa nośności oraz opis wysokości za pomocą linearyzacji krzywej udziału materiałowego

Krzywa udziału materiałowego zwana jest również krzywą Abbotta – Firestone. Wyznaczenie krzywej AF podaje informacje o stanie powierzchni w aspekcie jej przydatności eksploatacyjnej [1]. Jak wynika z przeprowadzonych badań toczenia żeliwa sferoidalnego, analiza kształtu krzywej AF wykazuje korzystny wpływ zwiększania prędkości skrawania (rys. 5.48). Stwierdzono, że gdy skrawano z prędkością $v_c=400$ m/min (rys. 5.48c) otrzymano najkorzystniejszy kształt krzywej AF. Otrzymana powierzchnia charakteryzuje się tym, że ma usunięte wierzchołki, a tym samym odznacza się dużą odpornością na ścieranie. Na kształt omawianych krzywych ma wpływ wartość posuwu. Wraz z jego wzrostem kształt krzywych udziału materiałowego zmienia się z degresywno-progresywnego (zbliżony do litery S) na degresywny. Szczególnie widać to dla ostrza z pokrywanej ceramiki azotkowej ($f=0,2$ mm/obr) na rys. 5.52.

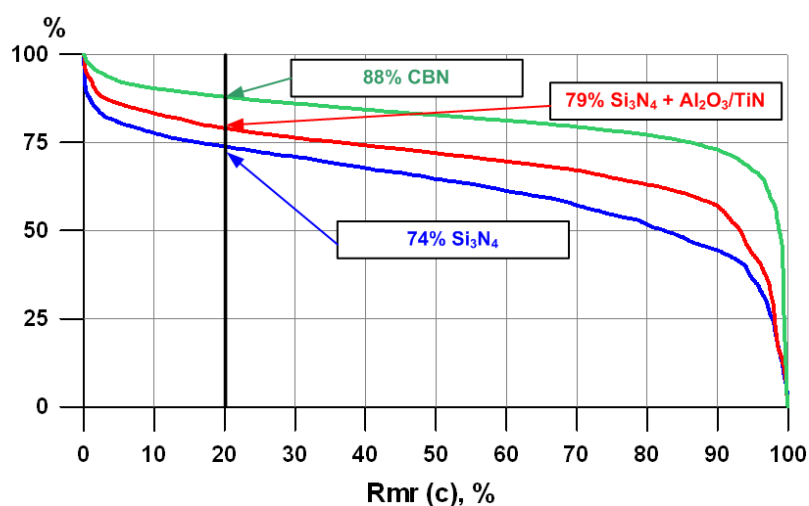
a)



b)

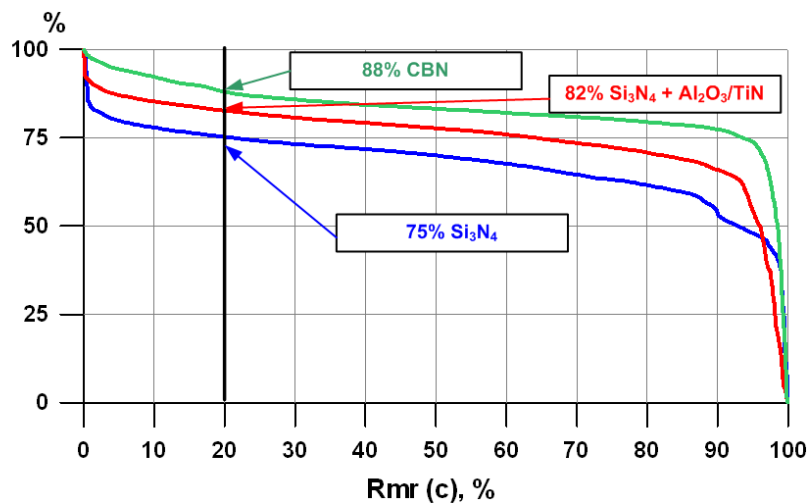


c)

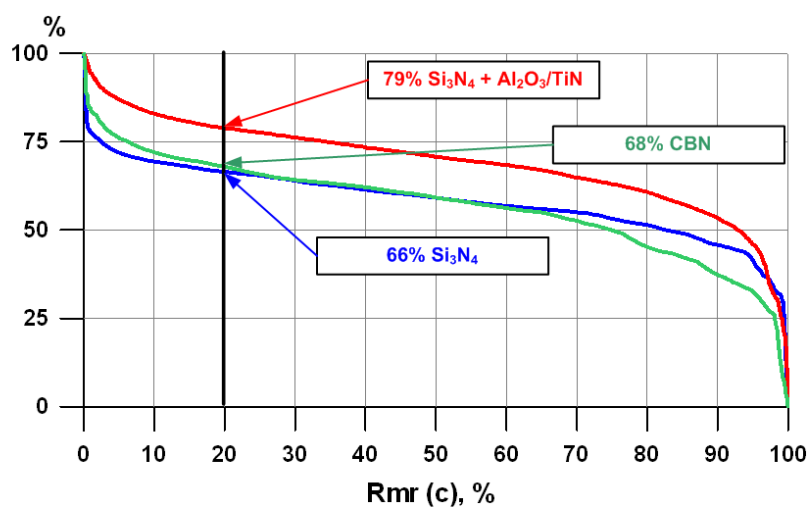


Rys. 5.48. Wpływ prędkości skrawania na kształt krzywej udziału materiałowego,
 a) $v_c = 100$ m/min, $f = 0,12$ mm/obr, $a_p = 0,8$ mm, b) $v_c = 240$ m/min, $f = 0,12$ mm/obr, $a_p = 0,8$ mm,
 c) $v_c = 400$ m/min, $f = 0,12$ mm/obr, $a_p = 0,8$ mm

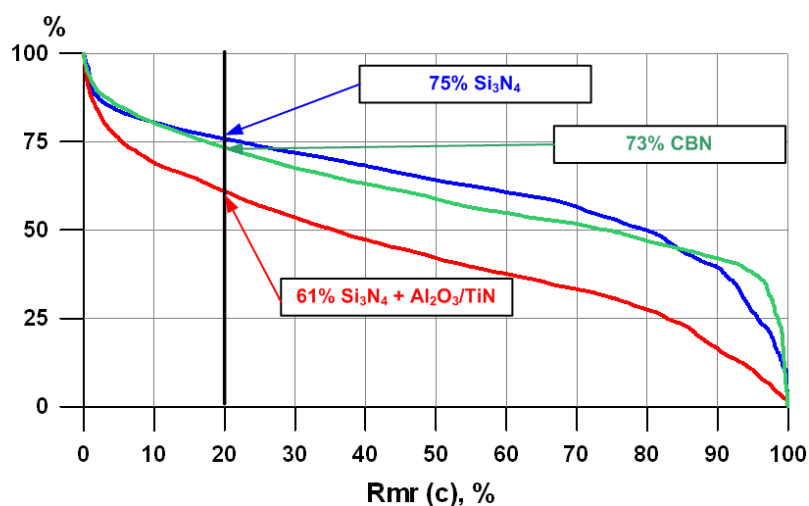
a)



b)



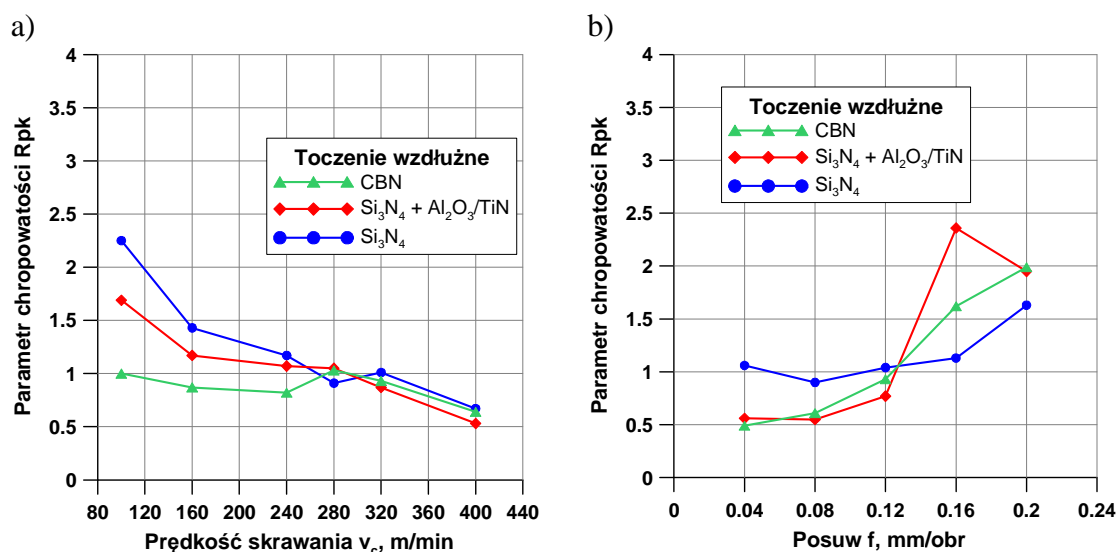
c)



Rys. 5.49. Wpływ posuwu na kształt krzywej udziału materiałowego,
 a) $v_c=320$ m/min, $f=0,04$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm, b) $v_c=320$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm,
 c) $v_c=320$ m/min, $f=0,2$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm

Podsumowując, można stwierdzić, że najbardziej korzystne kształty krzywej udziału materiałowego otrzymano dla ostrza z CBN.

Do oceny nośności powierzchni przydatne są parametry Rpk, Rk, Rvk. Zaletą tych parametrów jest to, że opisują zarówno wysokość jak i kształt powierzchni. Na rys. 5.50a i 5.50b przedstawiono wpływ prędkości i posuwu na wartość parametru Rpk. Parametr ten jest zredukowaną wysokością wzniesień profilu wystających ponad rdzeń profilu chropowatości. Jak wynika z rys. 5.50a największe wartości tego parametru zarejestrowano dla ostrza z niepokrywanej ceramiki azotkowej. Stwierdzono, że dla ostrza z CBN przebieg parametru Rpk jest bardzo stabilny w zakresie ok. $1 \div 0,6$. Cechą charakterystyczną są zbliżone wartości tego parametru dla wszystkich badanych ostrzy narzędzi skrawających w zakresie wyższych prędkości $v_c = 280 \div 400$ m/min.



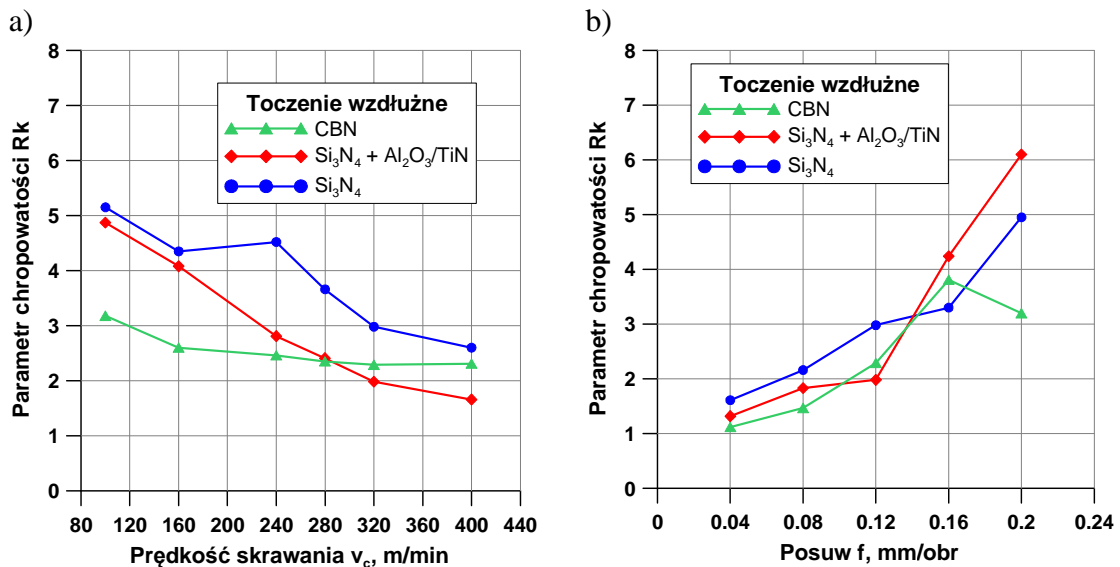
Rys. 5.50. Wpływ prędkości skrawania a) i posuwu b) na parametr Rpk

Na podstawie rys. 5.50b stwierdzono, że dla profili generowanych ostrzem z CBN i pokrywanej ceramiki azotkowej otrzymano zbliżone wartości analizowanego parametru (wyjątek, gdy skrawano z posuwem $f=0,16$ mm/obr). W przypadku skrawania ostrzem z niepokrywanej ceramiki azotkowej zarejestrowano bardzo stabilny przebieg Rpk w zakresie posuwu $f=0,04 \div 0,16$ mm/obr.

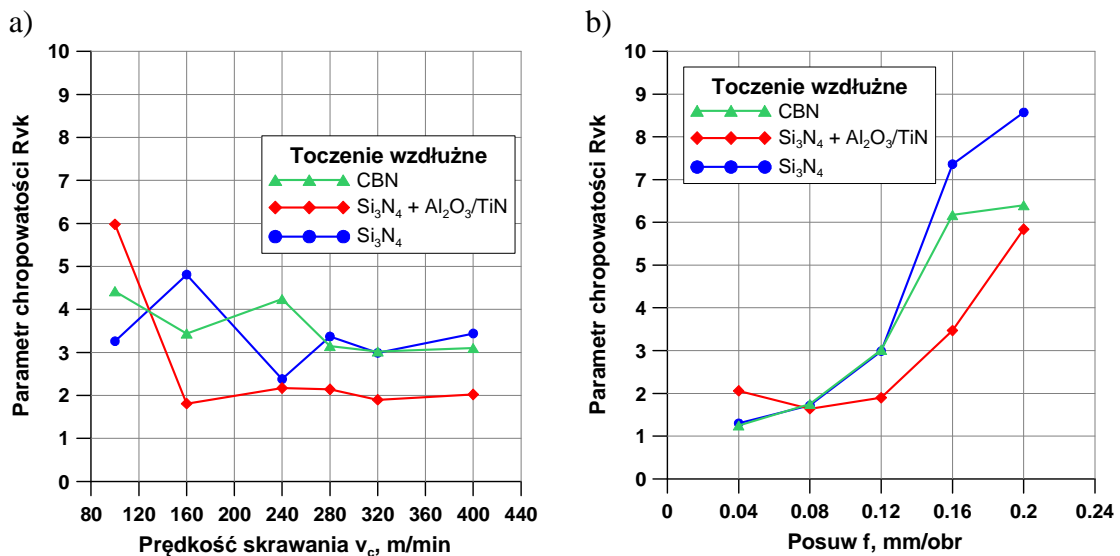
Parametr Rk opisuje głębokość rdzenia chropowatości profilu. Jak wynika z rys. 5.51a wraz ze wzrostem prędkości skrawania następuje spadek wartości Rk. Wartość analizowanego parametru dla ostrzy z ceramiki azotkowej zmieniała się w zakresie od ok. 5 do ok. 2 w zależności od zastosowanej prędkości skrawania. Skrawając ostrzem z CBN, otrzymano bardziej stabilny przebieg parametru Rk od ok. 3 do ok. 2,5 w porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej.

Głębokość rdzenia chropowatości R_k zwiększała się wraz ze wzrostem posuwu (rys. 5.51b). Największą wartość parametru R_k ok. 6 otrzymano, gdy skrawano ostrzem z pokrywanej ceramiki azotkowej ($f=0,2$ mm/obr).

Ostatnim analizowanym parametrem był parametr R_{vk} , czyli zredukowana głębokość wgłębień. Jak wynika z rys. 5.52a i 5.52b największy wpływ na wartość tego parametru ma posuw. Wraz ze wzrostem posuwu następuje ok. ośmiokrotny wzrost tego parametru dla ostrza z niepokrywanej ceramiki azotkowej, w przypadku ostrza z CBN jest to ok. sześciokrotny wzrost wartości parametru R_{vk} . Na podstawie rys. 5.52 stwierdzono, że najmniejsze wartości analizowanego parametru otrzymano dla ostrza z pokrywanej ceramiki azotkowej (wyjątek, gdy $v_c=100$ m/min (rys. 5.52a) oraz $f=0,04$ mm/obr (rys. 52b)).



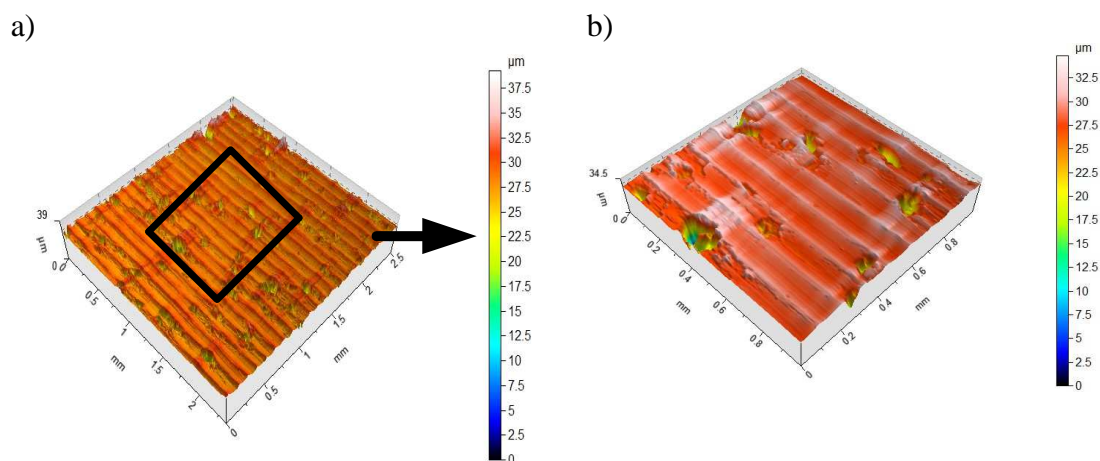
Rys. 5.51. Wpływ prędkości skrawania a) i posuwu b) na parametr R_k



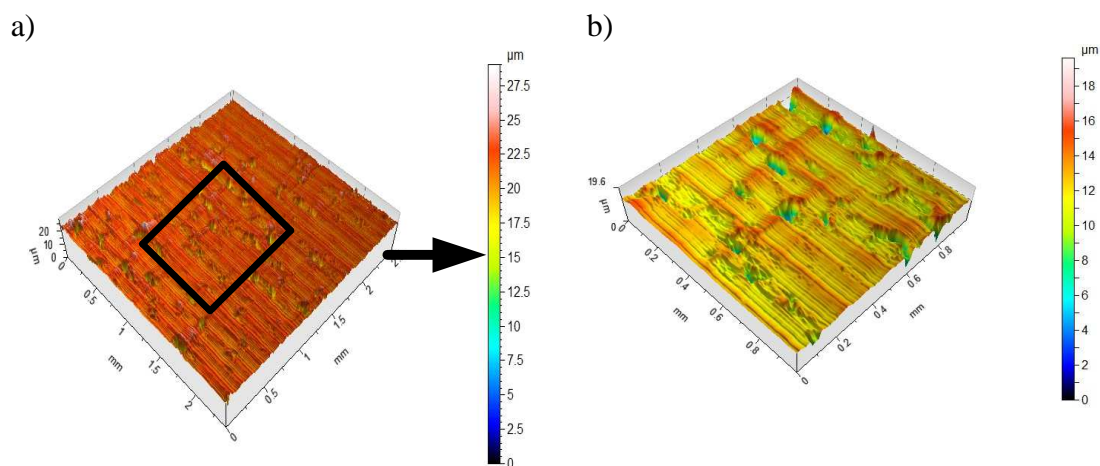
Rys. 5.52. Wpływ prędkości skrawania a) i posuwu b) na parametr R_{vk}

5.5.8. Obraz topografii powierzchni

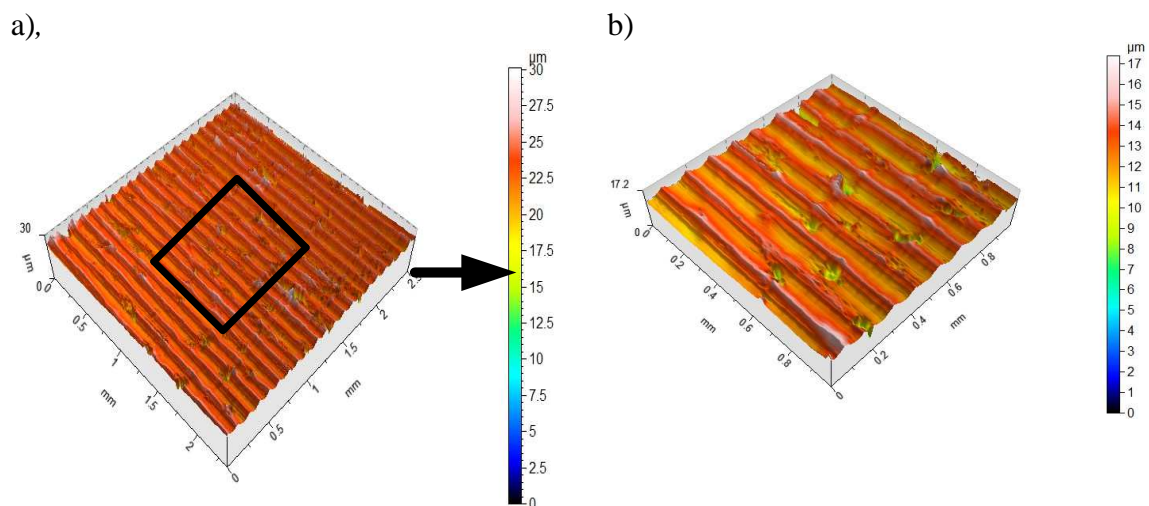
Na rys. 5.53÷55 przedstawiono przykładowe obrazy topografii powierzchni po dokładnym toczeniu żeliwa sferoidalnego z prędkością $v_c=400$ m/min wszystkimi badanymi ostrzami. Powierzchnie utworzone są z regularnych śladów odwzorowania ostrza skrawającego. Zauważono, że skrawając ostrzem z CBN otrzymano charakterystyczne lokalne wyrwania materiału widoczne na rys. 5.53b. Najmniejszą wartość parametru $Sa=0,82$ μm otrzymano dla ostrza z pokrywanej ceramiki azotkowej. Na rys. 5.56÷58 przedstawiono obrazy topografii powierzchni uzyskane, gdy skrawano z posuwem $f=0,04$ mm/obr. Cechą charakterystyczną są minimalne ślady zarysu ostrza skrawającego we wszystkich trzech przypadkach. Jest to spowodowane efektem ścinania części wierzchołków.



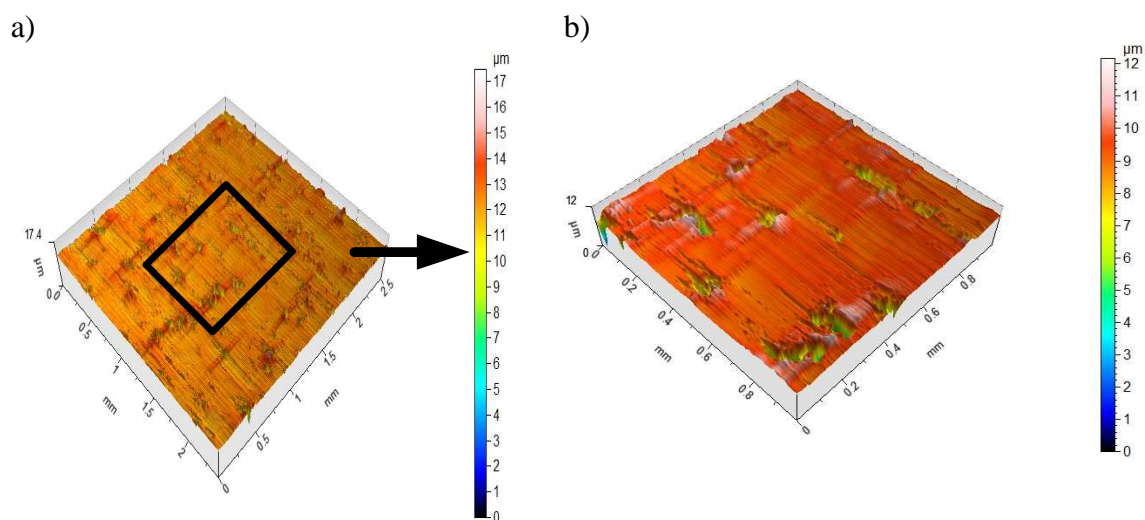
Rys. 5.53. Obraz topografii powierzchni ($Sa=1,16$ μm), a) po toczeniu ostrzem z CBN wraz z powiększeniami wybranych obszarów b). Parametry obróbki: $v_c=400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr



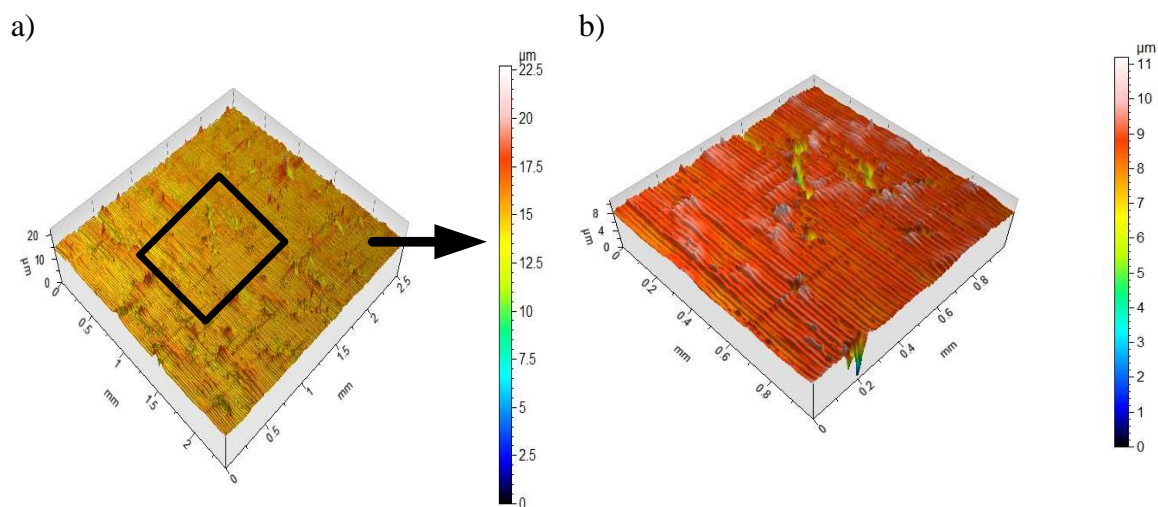
Rys. 5.54. Obraz topografii powierzchni ($Sa=0,82$ μm), a) po toczeniu ostrzem z $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ wraz z powiększeniami wybranych obszarów b). Parametry obróbki: $v_c=400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr



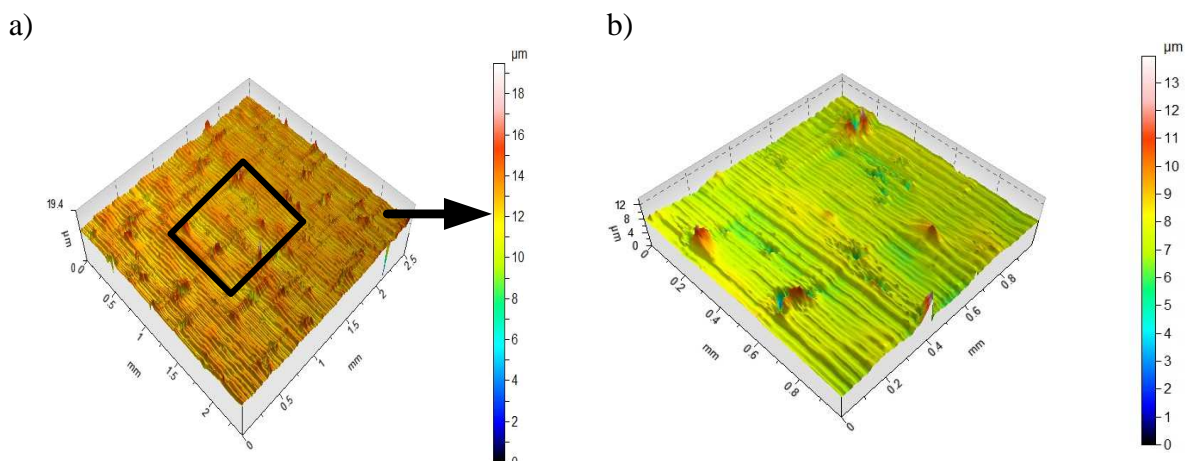
Rys. 5.55. Obraz topografii powierzchni ($Sa=0,98 \mu m$), a) po toczeniu ostrzem z Si_3N_4 wraz z powiększeniami wybranych obszarów b). Parametry obróbki: $v_c=400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr



Rys. 5.56. Obraz topografii powierzchni ($Sa=0,37 \mu m$), a) po toczeniu ostrzem z CBN wraz z powiększeniami wybranych obszarów b). Parametry obróbki: $v_c=320$ m/min, $f=0,04$ mm/obr



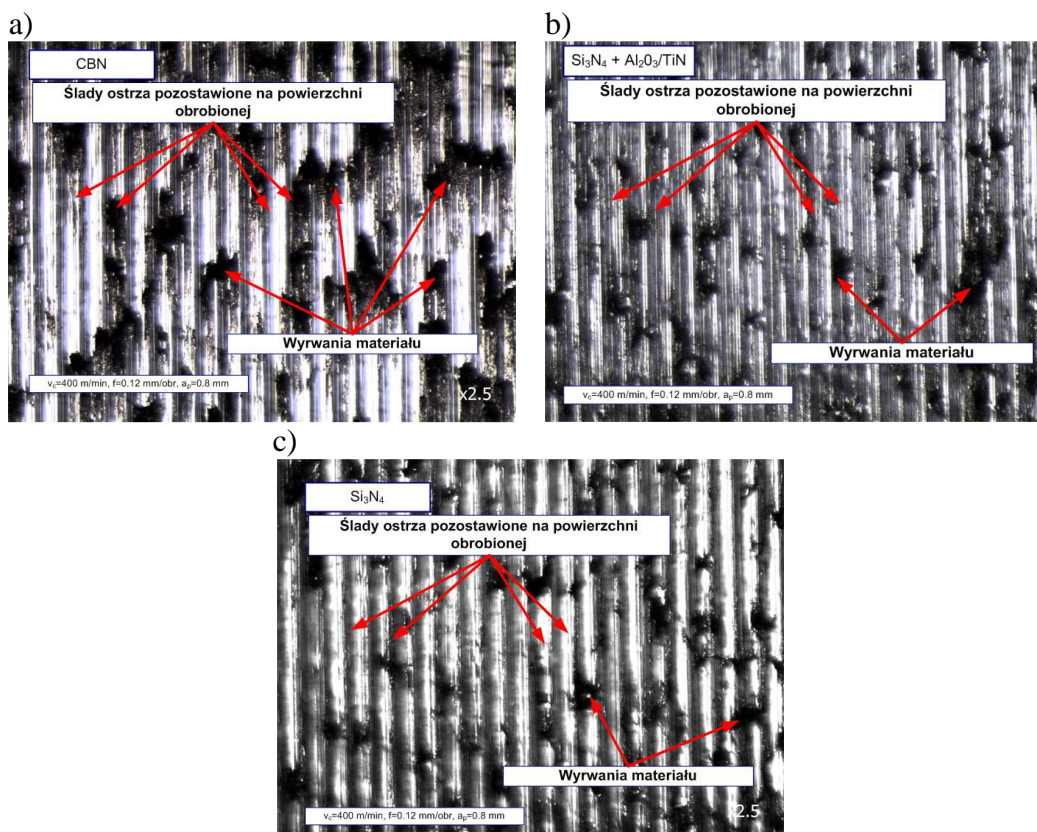
Rys. 5.57. Obraz topografii powierzchni ($Sa=0,45 \mu m$), a) po toczeniu ostrzem z $Si_3N_4 + Al_2O_3/TiN$ wraz z powiększeniami wybranych obszarów b). Parametry obróbki: $v_c=320$ m/min, $f=0,04$ mm/obr



Rys. 5.58. Obraz topografii powierzchni ($S_a=0,44 \mu\text{m}$), a) po toczeniu ostrzem z Si_3N_4 wraz z powiększeniami wybranych obszarów b). Parametry obróbki: $v_c=320 \text{ m/min}$, $f=0,04 \text{ mm/obr}$

5.5.9. Obraz rzeczywistej powierzchni

Na rys. 5.59 przedstawiono rzeczywisty obraz powierzchni obrobionej z żeliwa sferoidalnego. Na obrazach (rys. 5.59 a, b, c) wskazano ślady ostrza pozostawione na powierzchni obrobionej oraz charakterystyczny dla skrawania żeliwa sferoidalnego rozarty grafity albo pustki po wyrwanych kulkach grafitu. Tego rodzaju defekty zarejestrowano dla wszystkich badanych powierzchni.



Rys.5.59. Obraz rzeczywistej powierzchni żeliwa sferoidalnego po obróbce ostrzem z: a) CBN, b) $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, c) Si_3N_4 . Parametry obróbki: $v_c=400 \text{ m/min}$, $f=0,12 \text{ mm/obr}$, $a_p=0,8 \text{ mm}$

5.6. PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU 5.5

Na podstawie przeprowadzonych badań chropowości powierzchni stwierdzono, że wzrost prędkości skrawania wpływa na polepszenie jakości powierzchni (R_a). Można przypuszczać, że dalsze zwiększenie prędkości skrawania do zakresu $v_c=400\div 600$ m/min może doprowadzić do otrzymania wartości parametru R_a zbliżonej do wartości R_{at} . Istotny wpływ na przebieg badanych parametrów ma również posuw, wraz z jego wzrostem następuje pogorszenie jakości powierzchni. Stwierdzono, że najmniejsze wartości R_a otrzymano dla ostrzy z CBN i pokrywanej ceramiki azotkowej.

Z punktu widzenia technologicznego zbyt małe wartości odstępów (R_{Sm}), przy zachowaniu dużych wartości R_v , uniemożliwiają powstanie tzw. klinów smarnych, które przyczyniają się do zmniejszania nacisków powierzchniowych.

Należy zwrócić uwagę, że ujemne wartości parametru R_{sk} oznaczają powierzchnie o kształcie płaskowyzu. Taka powierzchnia nadaje się na powierzchnie ślizgowe np. łożysk czy tulei cylindrowych. Jak już podano wcześniej w rozdziale 2.3.4, z żeliwa sferoidalnego wykonuje się wiele podzespołów do silnika samochodowego, dlatego pożądanym jest łagodny kształt krzywej udziału materiałowego, w celu uzyskania dobrej nośności powierzchni. Należy dodać, że w obróbce wykończeniowej bardzo istotne są małe wartości parametru R_{pk} ze względu na uzyskanie lepszych właściwości nośnych powierzchni i ograniczenia zużycia w okresie docierania. W badanym zakresie parametrów skrawania otrzymano większe wartości zredukowanych głębokości wgłębień w porównaniu ze zredukowanymi wysokościami wierzchołków. W przypadku skrawania ostrzem z CBN otrzymano większe wartości R_{vk} , w porównaniu z ostrzem z pokrywanej ceramiki azotkowej (co również potwierdzają obrazy topografii powierzchni). Jest to spowodowane lokalnymi wyrwaniami grafitu.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Odnosząc się do konwencji niniejszej pracy wnioski poznawcze uszeregowano w dwóch grupach. Pierwsza grupa dotyczy wniosków [1–7] wysuniętych na podstawie badań doświadczalnych toczenia ortogonalnego, druga zaś grupa [8–11] dotyczy wniosków wysuniętych na podstawie badań chropowatości powierzchni żeliwa sferoidalnego.

WNIOSKI POZNAWCZE

- [1] Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych toczenia ortogonalnego przy użyciu zaawansowanych materiałów narzędziowych stwierdzono, że mechaniczne i termiczne charakterystyki nie ulegają znaczącym zmianom w zależności od zastosowanego materiału narzędziowego. Istotny wpływ na przebieg otrzymanych charakterystyk mają parametry skrawania.
- [2] W zakresie badanych parametrów skrawania najmniejsze wartości składowych sił skrawania otrzymano dla narzędzia z CBN, co wynika z zastosowania innej geometrii ostrza w porównaniu z ostrzami ceramicznymi, gdzie kąt natarcia $\gamma_0=0^\circ$. Fakt ten można powiązać z uzyskaniem również większego współczynnika tarcia. Analizując składowe siły skrawania, nie stwierdzono istotnego wpływu materiału ostrza skrawającego na ich przebieg.
- [3] Stosowanie posuwu z zakresu $f=0,12\div 0,24$ mm/obr powoduje obniżenie energochłonności procesu skrawania, jak również zwiększenie wydajności objętościowej (ilości usuwanego materiału w jednostce czasu).
- [4] W badanym zakresie prędkości skrawania i posuwu otrzymano charakterystyczne dla żeliwa wióry elementowe o kształcie krótkiej spirali.
- [5] Pomiar średniej temperatury kontaktowej wykonano za pomocą kamery IR. Dla zastosowanych parametrów skrawania temperatura kontaktowa zmieniała się w zakresie od ok. 410°C , gdy skrawano z prędkością $v_c=100$ m/min do ok. 510°C ($f=0,24$ mm/obr). Zmierzone wartości temperatury są zdecydowanie poniżej podawanych dla stali niestopowej wartości np. C45.
- [6] Stosowanie małych posuwów w zakresie $f=0,04\div 0,08$ mm/obr dla ostrza z CBN (o geometrii N123H1 40004 S01025) powoduje zakłócenia w przebiegu procesu

skrawania, co w konsekwencji prowadzi do uzyskania wyższych wartości sił skrawania, jak i wyższej temperatury kontaktowej.

- [7] W próbach skrawania ortogonalnego nie można wyraźnie określić wpływu powłoki Al_2O_3/TiN na przebieg procesu skrawania.
- [8] Najmniejszą chropowatość powierzchni zdefiniowaną parametrem chropowatości R_a otrzymano dla ostrzy z pokrywanej ceramiki azotkowej i CBN. Największy wpływ na analizowany parametr ma posuw. Wraz ze wzrostem posuwu rośnie również w sposób nieliniowy wartość parametru R_a .
- [9] Najbardziej korzystne kształty krzywej udziału materiałowego (degresywno-progresywny) otrzymano dla ostrza z CBN.
- [10] Skrawając ostrzem z CBN otrzymano charakterystyczne lokalne wyrwania kulek grafitu, co wynika z tego, że ostrze z CBN ma krawędź skrawającą o większym promieniu zaokrąglenia.
- [11] Z punktu widzenia jakości powierzchni istotne jest stosowanie ostrzy z CBN i pokrywanej ceramiki azotkowej w obróbce dokładnej żeliwa sferoidalnego.

WNIOSKI ROZWOJOWE

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i ich analizy można sprecyzować następujące kierunki rozwojowe:

- [1] Ze względu na rodzaj materiału obrabianego otrzymano wióry elementowe, z tego powodu nie było możliwości wyznaczenia współczynnika spęczenia wióra i tym samym nie można było wyznaczyć kąta poślizgu Φ_0 . Dlatego bardzo istotne dla przeprowadzonych badań jest wykonanie doświadczalnych pomiarów kąta poślizgu za pomocą kamery do szybkiego filmowania.
- [2] Analizując badania tribologiczne, należy zwrócić uwagę, że bardzo istotny wpływ na przebieg charakterystyki ma zastosowany kąt natarcia. Z tego wynika, że dla zastosowanej geometrii ostrza narzędzia skrawającego należy rozwinąć model ortogonalny o uwzględnienie geometrii ścinu technologicznego.
- [3] Otrzymane wyniki badań należy zweryfikować z badaniami symulacyjnymi MES.
- [4] Należy rozszerzyć badania procesu toczenia o nowe gatunki żeliwa: ADI i z grafitem wermikularnym.

7. LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S.: Pomiar geometryczny powierzchni. WNT, Warszawa 2008
- [2] BAILDONIT: Obróbka żeliw - nowe konstrukcje łamaczy wióra i gatunki pokryć tytanowych BAILDONIT. Mechanik, nr 5–6, 2002, str. 361–362
- [3] BIEL–GŁOGOWSKA A., KOWALSKI A.: Żeliwo sferoidalne typu ADI o nadzwyczajnych własnościach mechanicznych. Przegląd Mechaniczny, zeszyt 22/98, str. 15–19
- [4] BRANDENBERG K.: Obróbka żeliwa sferoidalnego ADI. Przegląd mechaniczny, zeszyt 22/98, str. 58–60
- [5] CAMUS_CU N.: Effect of cutting speed on the performance of Al₂O₃ based ceramic tools in turning nodular cast iron. Materials and Design, nr 27, 2006, str. 997–1006
- [6] CICHOSZ P.: Narzędzia skrawające. WNT, Warszawa 2006
- [7] DINCA C., LAZOGLUA I, SERPENGUZEL A: Analysis of thermal fields in orthogonal machining with infrared imaging. Journal of Materials Processing Technology, nr 198, 2008, str. 147–154
- [8] DMOCHOWSKI J.: Podstawy obróbki skrawaniem. PWN, Warszawa 1983
- [9] DOBRZAŃSKI L., KWAŚNY W., PAKUŁA D.: Powłoki PVD i CVD odporne na ścieranie naniesione na ceramikę narzędziową Si₃N₄. Mechanik, nr 4, 2005, str. 302–308
- [10] DOBRZAŃSKI L.: Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe: podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. WNT, Warszawa 2006
- [11] FELDSHTEIN E., PACHA-GOŁĘBIEWSKA H.: Warstwa wierzchnia żeliwa GJL2300 odpornego na ścieranie po toczeniu płytkami wieloostrowymi z różnych materiałów narzędziowych. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, nr 2, 2011, str. 9–17
- [12] GRZESIK W., RECH J., ŻAK K., CLAUDIN C.: Machining performance of pearlitic–ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture, nr 49, 2009, str. 125–133
- [13] GRZESIK W.: Friction behaviour of heat isolating coatings in machining: mechanical, thermal and energy-based considerations. International Journal of Machine Tools & Manufacture, nr 43, 2003, str. 145–150
- [14] GRZESIK W.: Podstawy skrawania materiałów metalowych. WNT, Warszawa 2010
- [15] GRZESIK W., ŻAK K.: Mechanical, thermal and tribological aspects of the machining process of nodular iron with coated carbide and ceramic tools. Advance Manufacturing Science and Technology, nr 1, 2009, str. 31–43

-
- [16] GRZESIK W., KISZKA P., KOWALCZYK D., RECH J., CLAUDIN CH.: Machining of nodular cast iron (PF-NCI) using CBN tools. 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting, 2012, str. 500–504
- [17] GÜRHING: Wysoko wydajne narzędzia do obróbki żeliw. *Mechanik*, nr 7, 2011, str. 584–586
- [18] GUZIK E., KUKUŁKA K.: Kształtowanie struktury żeliwa sferoidalnego w odlewach płytek o zróżnicowanej grubości. *Archiwum Odlewnictwa*, nr 1, 2001, str. 117–125
- [19] HAIMANN R.: *Metaloznawstwo*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [20] JAWORSKA L.: *Diament: otrzymywanie i zastosowanie w obróbce skrawaniem*. WNT, Warszawa 2007
- [21] JAWORSKA L.: Wpływ rozwoju metod wytwarzania spiekanych tworzyw narzędziowych na poprawę ich własności. V Konferencja Szkoły Obróbki Skrawaniem, Opole 2011, str. 28–40
- [22] JEMIELNIAK K.: *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004
- [23] KACZMAREK J.: *Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej*. WNT, Warszawa 1971
- [24] KACZOROWSKI M., KRZYŃSKA A.: *Konstrukcyjne materiały metalowe, ceramiczne i kompozytowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008
- [25] KASINA J., WSZOŁEK J., SMUK B.: Nowe materiały narzędziowe. II Konferencja Szkoły Obróbki Skrawaniem. Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków 2008, str. 163–174
- [26] KATUKU K., KOURSARIS A., SIGALAS I.: Wear, cutting forces and chip characteristics when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron with PcBN cutting tools under finishing conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, nr 209, 2009, str. 2412–2420
- [27] KEN BROOKS: There's more to hard materials than tungsten carbide alone. Original Research Article *Metal Power Report*, vol. 66, 2011, str. 36–37, 39–45
- [28] KENNAMETAL: Nowe materiały narzędziowe do toczenia żeliwa szarego i do toczenia na twardo. *Mechanik*, nr 10, 2004, str. 658–659
- [29] KISZKA P., KOWALCZYK D., GRZESIK W.: Wysokowydajne skrawanie żeliwa sferoidalnego z użyciem narzędzi z CBN. Konferencja pt. *Innowacyjne Technologie Wytwarzania pod redakcją Lucyny Jaworskiej*, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków 2011, str. 15–24
- [30] KOSMOL J. (pod red.): *Techniki wytwarzania. Obróbka wiórowa i ścierna*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002
- [31] KRZYŃSKA A., KACZOROWSKI M.: Własności mechaniczne i struktura żeliwa z grafitem mieszanym po dwustopniowym hartowaniu izotermicznym. *Archiwum Odlewnictwa*, nr 18, 2006, str. 89–94

- [32] KUPCZYK M.: Ostrza skrawające z twardymi i supertwardymi powłokami. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004
- [33] LEGUTKO S., TWARDOWSKI P.: Współczesne materiały narzędziowe stosowane na narzędzia skrawające, szczególnie do obróbki z dużymi prędkościami skrawania (HSM). Spiekane materiały narzędziowe przeznaczone na ostrza narzędzi do obróbki z wysokimi prędkościami skrawania. Praca pod redakcją: Stobierskiego L., Jaworskiej L.
- [34] MALKIEWICZ T.: Metaloznawstwo stopów żelaznych. Wyd. 3, PWN, Warszawa 1978
- [35] MAŁECKA J., GRZESIK W.: Żeliwo ADI – atrakcyjny i przyszłościowy materiał konstrukcyjny. Stal, nr 7–8, 2011, str. 72–75
- [36] MAŁECKA J., GRZESIK W., KOWALCZYK D., KISZKA P.: Image analysis of wear effects when machining nodular cast iron with silicon nitride tools. Tribologia, nr 22, 2011, str. 71–84
- [37] MIERNIK M.: Skrawalność metali. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [38] MINKINA W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004
- [39] NAYYAR V., KAMIŃSKI J., KINNANDER A., NYBORG L.: An experimental investigation of machinability of Graphitic Cast Iron Grades; Flake, Compacted and Spheroidal Graphite Iron in Continuous Machining Operations, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012
- [40] NIESŁONY P.: Identyfikacja wpływu powlekania ostrza narzędzia twardymi warstwami na mechaniczne, cieplne i tribologiczne charakterystyki procesu skrawania. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, 2000
- [41] NIESŁONY P.: Modelowanie przepływu ciepła i rozkładu temperatury w strefie skrawania dla ostrzy z twardymi powłokami ochronnymi. Politechnika Opolska, Oficyna Wydawnicza, Opole 2008
- [42] NOWICKI B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni. WNT, Warszawa 1991
- [43] OLSZAK W.: Obróbka skrawaniem. WNT, Warszawa 2008
- [44] PODRZUCKI CZ.: Żeliwo: struktura, właściwości, zastosowanie, T.2
- [45] POLAŃSKI Z.: Planowanie doświadczenia w technice. WNT, Warszawa 1984
- [46] PORADNIK OBRÓBKI SKRAWANIEM.: Podręcznik firmy Sandvik Coromant, 2010
- [47] POULACHON G., BANDYOPADHYAY B., JAWAHIR I., PHEULPIN S., SEGUIN E.: Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels. Wear, nr 256, 2004, str. 302–310
- [48] PRZYBYŁOWICZ K.: Inżynieria stopów żelaza. Wyd. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2008

- [49] PRZYBYŁOWICZ K.: Metaloznawstwo. Wyd. 4 zm., WNT, Warszawa 1994
- [50] RENA X.J., YANG Q.X., JAMES R.D.: Cutting temperatures in hard turning chromium hard facings with PCBN tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, nr 147, 2004, str. 38–44
- [51] RUDNIK S.: Metaloznawstwo. PWN, Warszawa 1978.
- [52] SCHNEIDER J., RICHTER G.: Eine Keramik für viele Fälle, *Werkstatt und Betrieb*, nr 6, 2006, str. 51–55
- [53] SECO: Nowa generacja gatunków do obróbki żeliwa TK1000 i TK2000. *Mechanik*, nr 4, 2005, str. 242–243
- [54] SKRZYPEK. J. S., PRZYBYŁOWICZ K.: Inżyniera metali i ich stopów. Wydawnictwo AGH, Kraków 2012
- [55] SOUZA J.V.C., NONO M.C.A., RIBEIRO M.V., MACHADO J.P.B., SILVA O.M.M: Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. *Materials and Design*, nr 30, 2009, str. 2715–2720
- [56] STORCH B.: Podstawy obróbki skrawaniem. Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001
- [57] SUMITOMO ELECTRIC.: Azotek boru – materiał przyszłości w obróbce skrawaniem. *Mechanik*, nr 1, 1998, str. 14–15
- [58] SUMITOMO ELECTRIC: NS260 i NS260C – nowe gatunki ceramiki azotkowej Si_3N_4 do szybkościowej obróbki żeliwa. *Mechanik*, nr 2, 1999, str. 66
- [59] WIECZOROWSKI M., CELLARY A., CHAJDA J.: Charakterystyka chropowatości powierzchni. Poznań 1996
- [60] WYSIECKI M.: Nowoczesne materiały narzędziowe. WNT, Warszawa 1997
- [61] YIGIT R., CELIK E., FINDIK F., KOKSAL S.: Effect of cutting speed on the performance of coated and uncoated cutting tools in turning nodular cast iron. *Journal of Materials Processing Technology*, nr. 204, 2008, str. 80–88
- [62] YIGIT R., CELIK E., FINDIK F., KOKSAL S.: Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, nr 26, 2008, str. 514–524
- [63] ŻAK K.: Wpływ materiału ostrza na przebieg procesu skrawania żeliwa sferoidalnego o strukturze perlityczno–ferrytycznej. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, 2008
- [64] ŻAK K., GRZESIK W.: Osobliwości procesu skrawania żeliwa sferoidalnego o strukturze perlityczno–ferrytycznej. II Konferencja Szkoły Obróbki Skrawaniem, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków 2008
- [65] ŻAK K., KISZKA P., GRZESIK W. KOWALCZYK D.: Skrawanie żeliwa sferoidalnego narzędziami z ceramiki azotkowej i CBN. *Mechanik*, nr 8–9, 2013, str. 634–642

- [66] ZYCHA J., WRÓBEL J.: Zmiany mikrostruktury i twardości żeliwa GJS-800-8 (ADI) wywołane zmęczeniem cieplnym. Archives of Foundry Engineering, vol. 12, 2012, str. 205-208
- [67] ŻEBROWSKI H. (pod red.): Techniki wytwarzania: obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004

STRONY WWW

- [68] <http://www.flir.com.pl>
- [69] <http://www.iod.krakow.pl>
- [70] <http://www.ios.krakow.pl>
- [71] <http://www.iscar.pl>
- [72] <http://www.kennametal.com>
- [73] <http://www.kistler.com>
- [74] <http://www.leica-microsystems.com>
- [75] <http://www.msm.cam.ac.uk>
- [76] <http://www.norson.pl>
- [77] <http://www.ruville.de>
- [78] <http://www.sandvik.com>

KATALOGI NARZĘDZIOWE

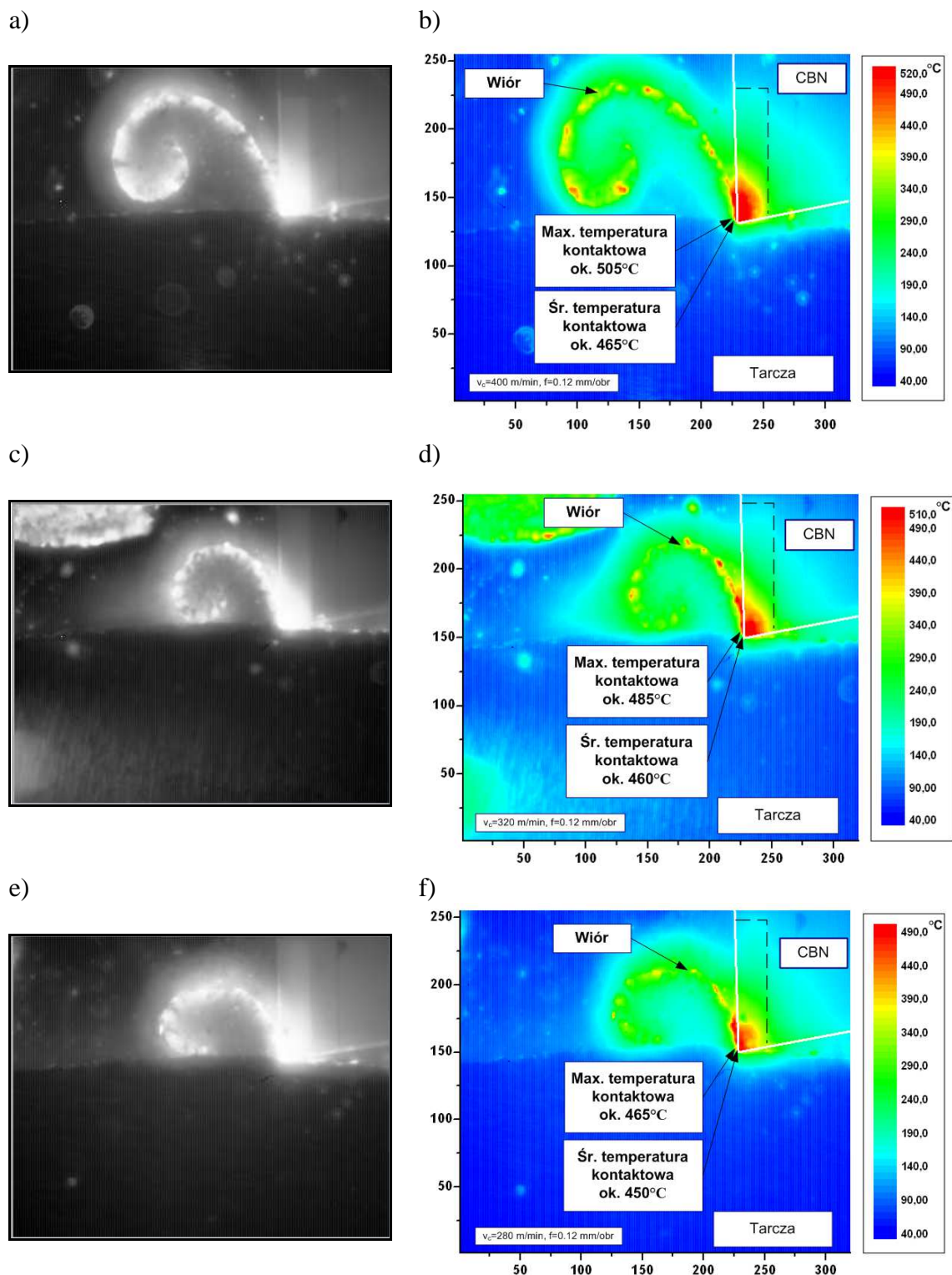
- [79] Katalog firmy Iscar
- [80] Katalog firmy Kennametal
- [81] Katalog firmy Sandvik Coromant
- [82] Katalog firmy Seco
- [83] Katalog firmy Tungaloy (FX105 Si₃N₄ Ceramic Grade)

NORMY:

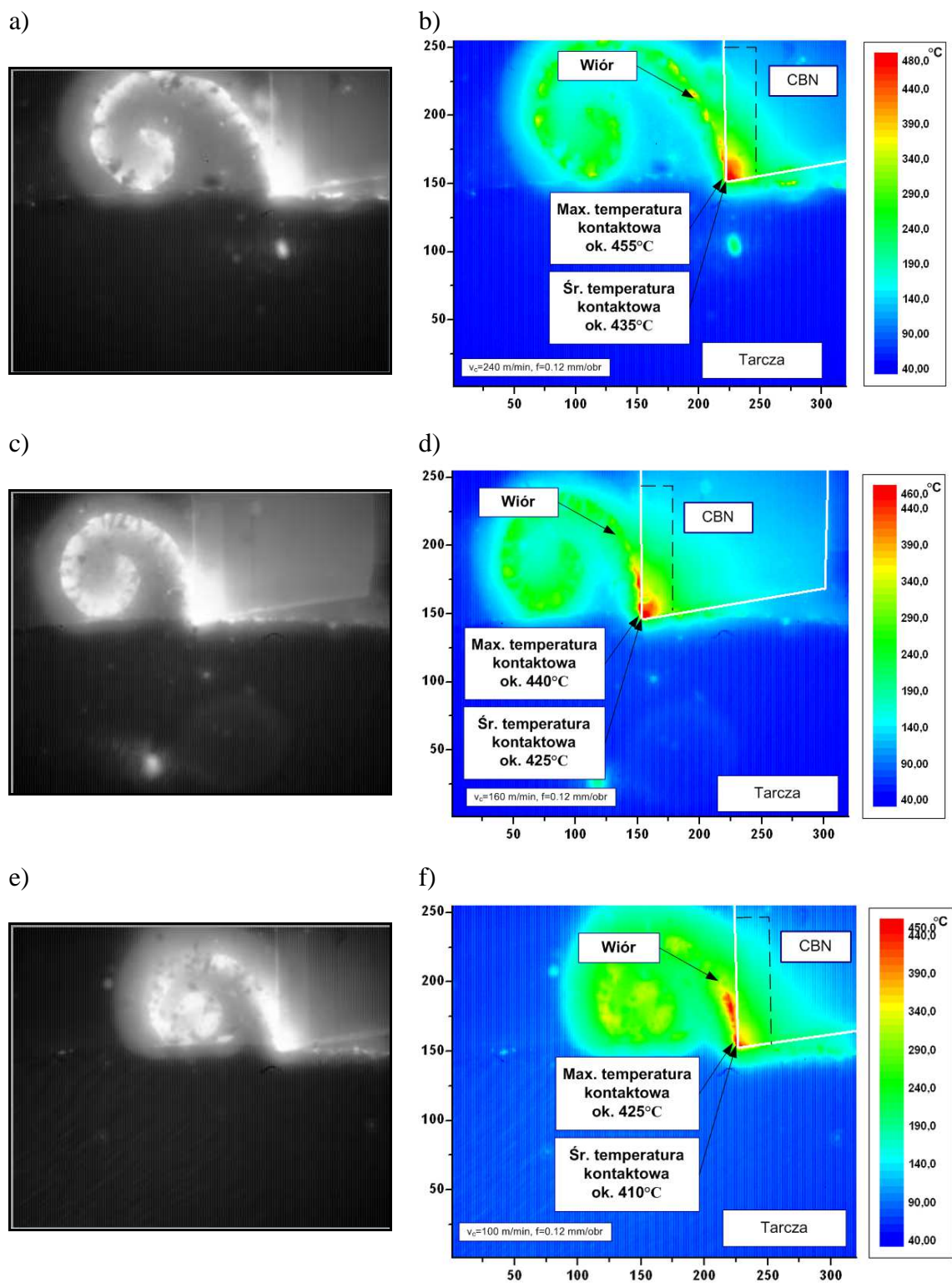
- [84] NORMA: EN 1563:1997. Żeliwo sferoidalne, klasyfikacja
- [85] NORMA: PN-91/H-04350

8. ZAŁĄCZNIKI

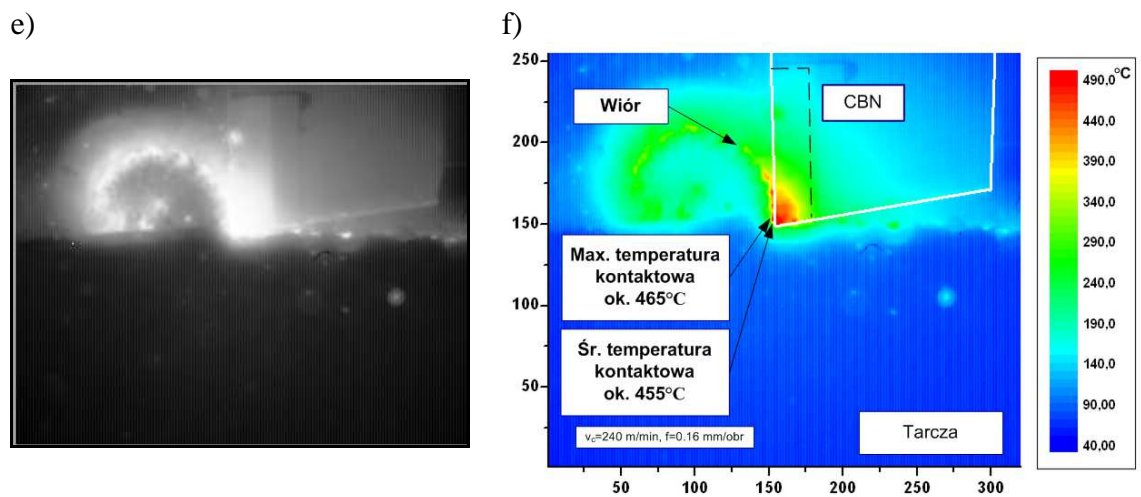
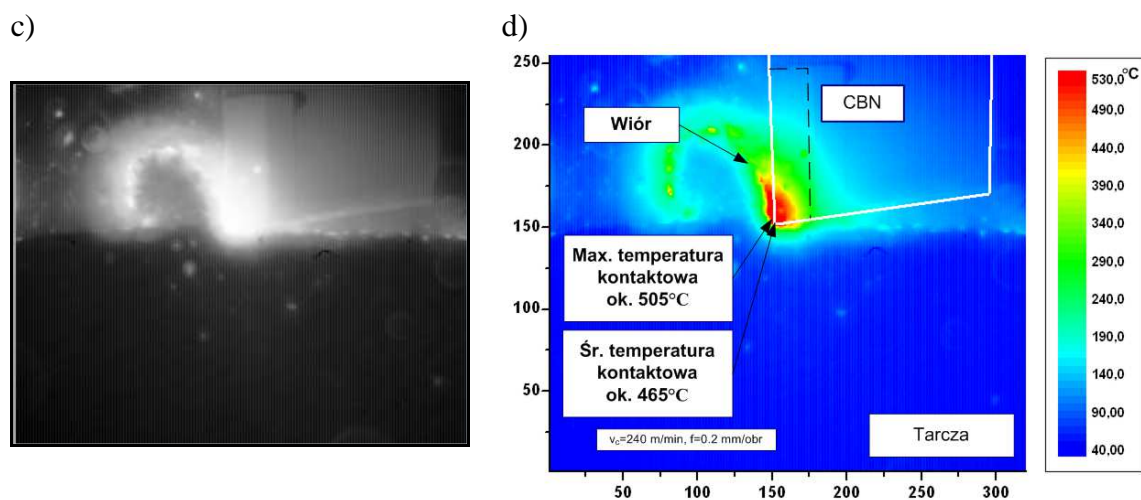
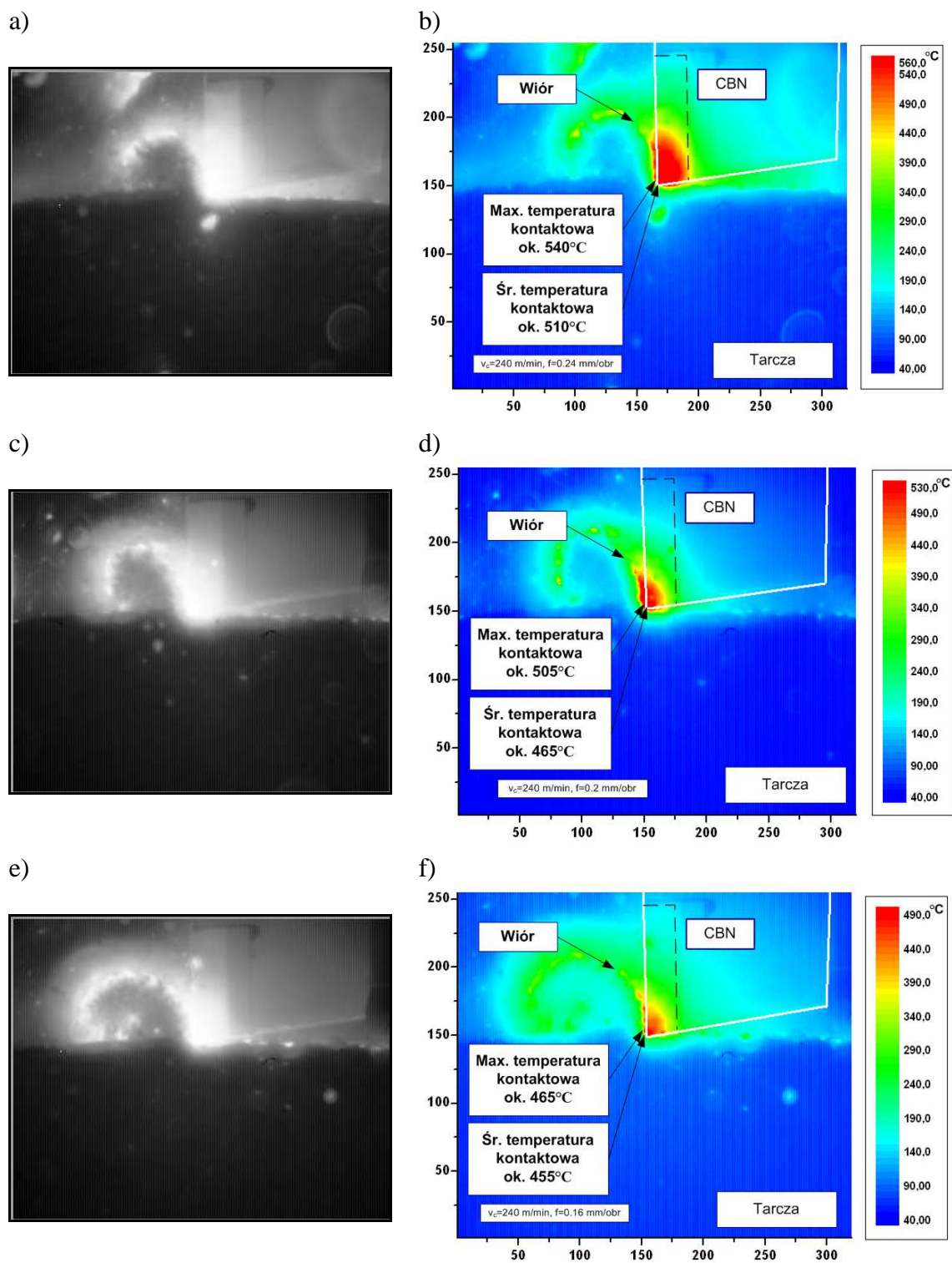
8.1. ZAŁĄCZNIK A – MAPY ROZKŁADU TEMPERATURY



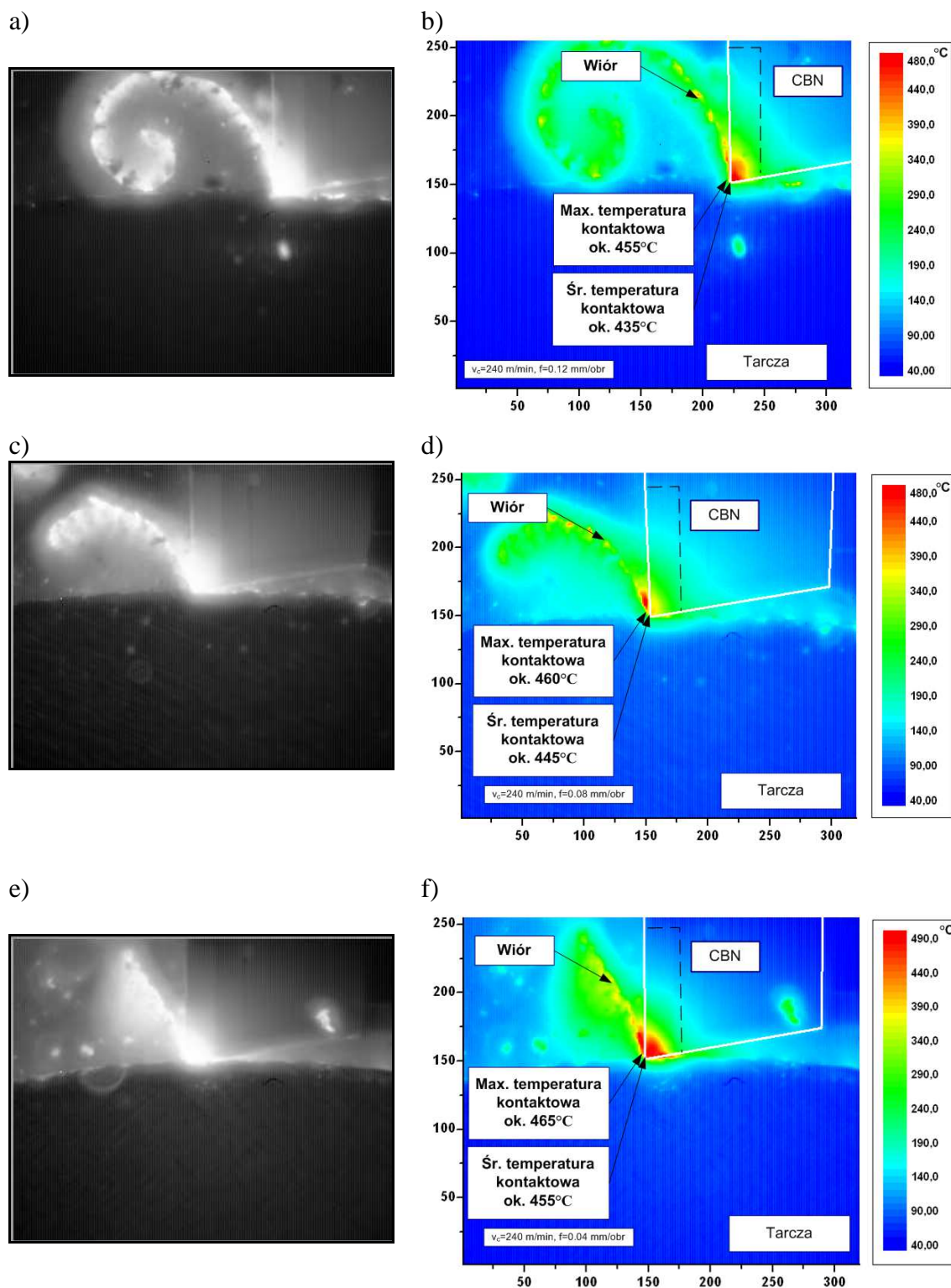
Rys. 8.1. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z CBN ($v_c=400\div 280$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



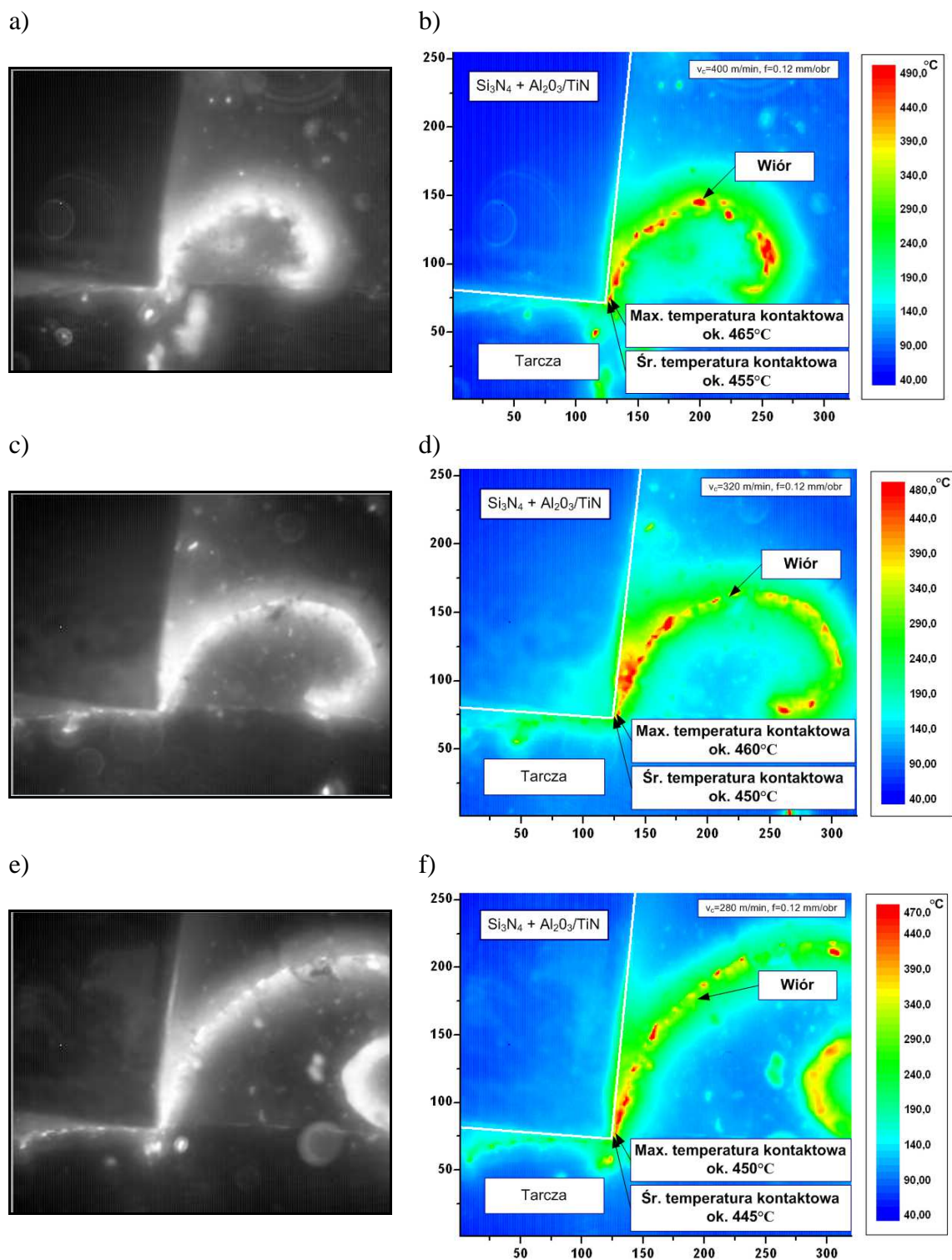
Rys. 8.2. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z CBN ($v_c=240\div 100$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



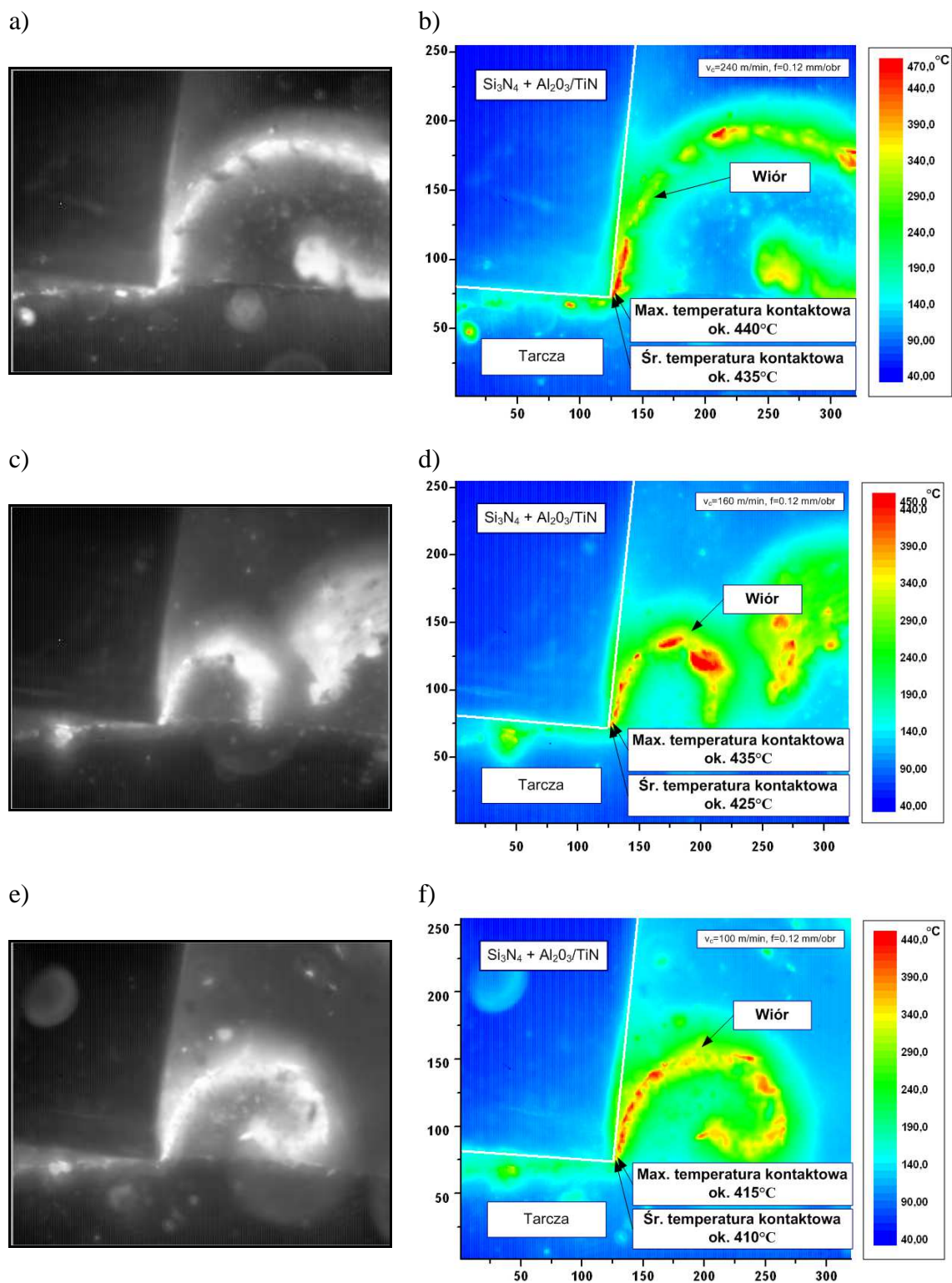
Rys. 8.3. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z CBN ($v_c=240$ m/min, $f=0,24\div 0,16$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



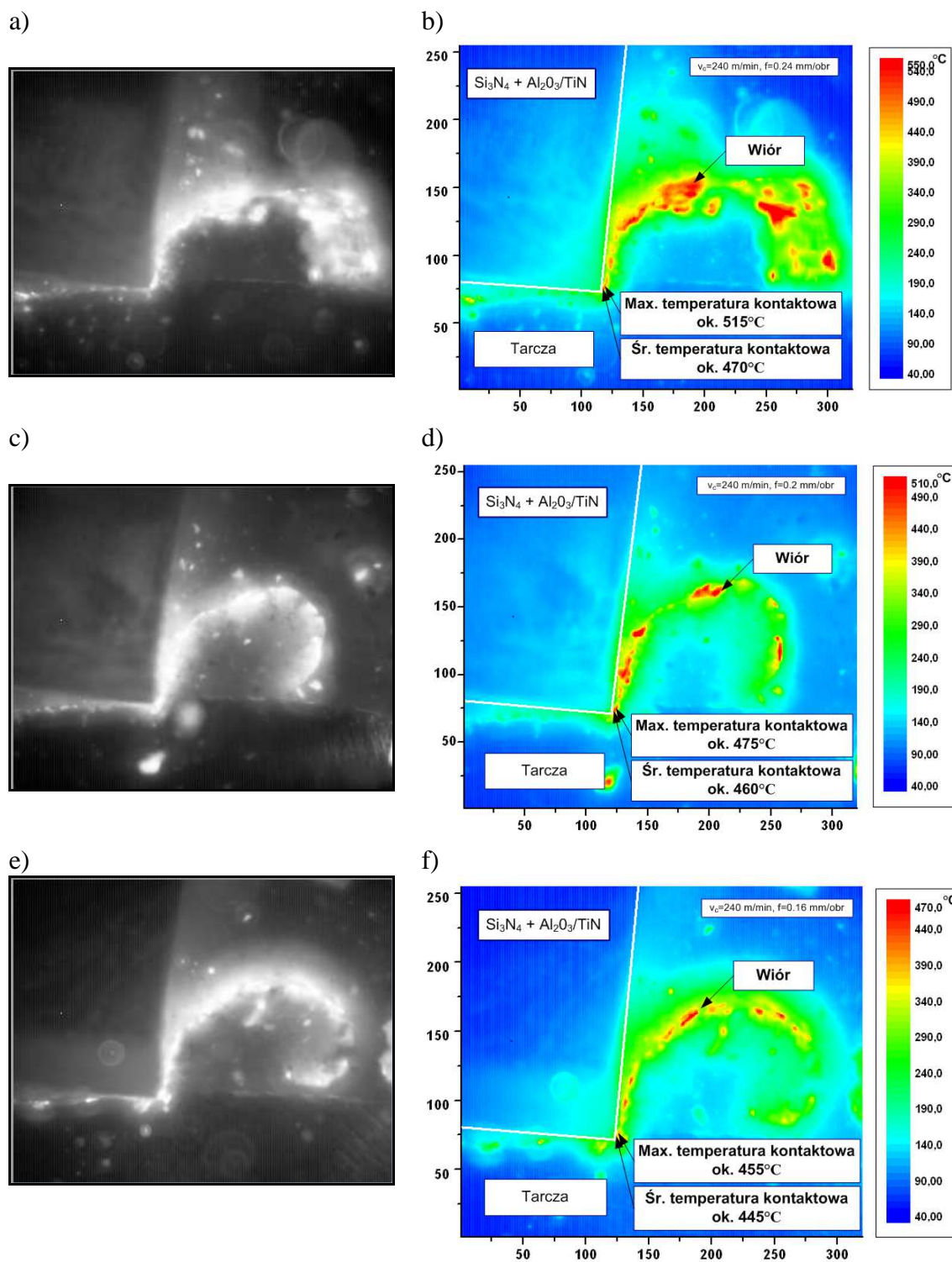
Rys. 8.4. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z CBN ($v_c=240$ m/min, $f=0,12\div 0,04$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



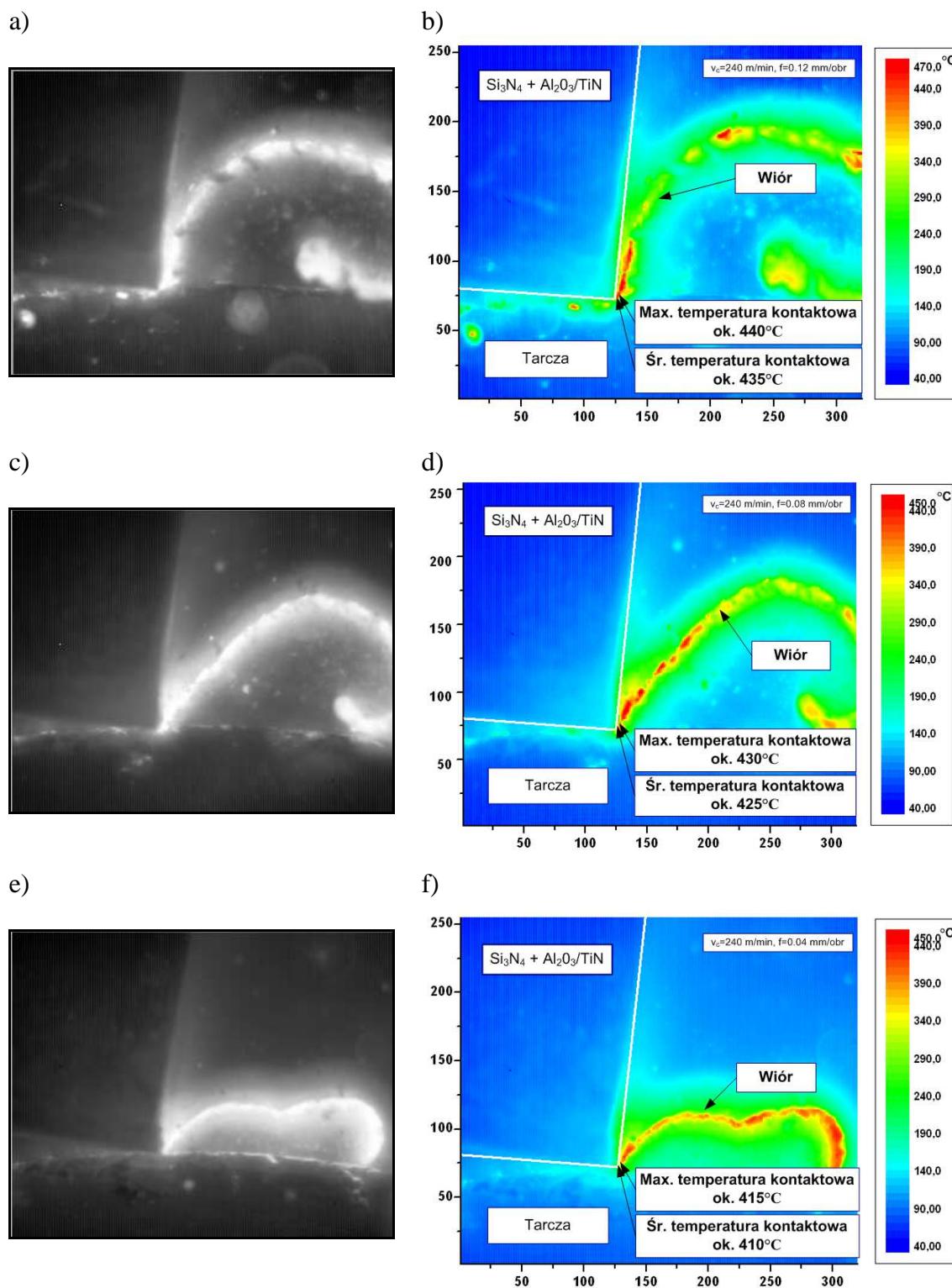
Rys. 8.5. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z pokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=400\div 280$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



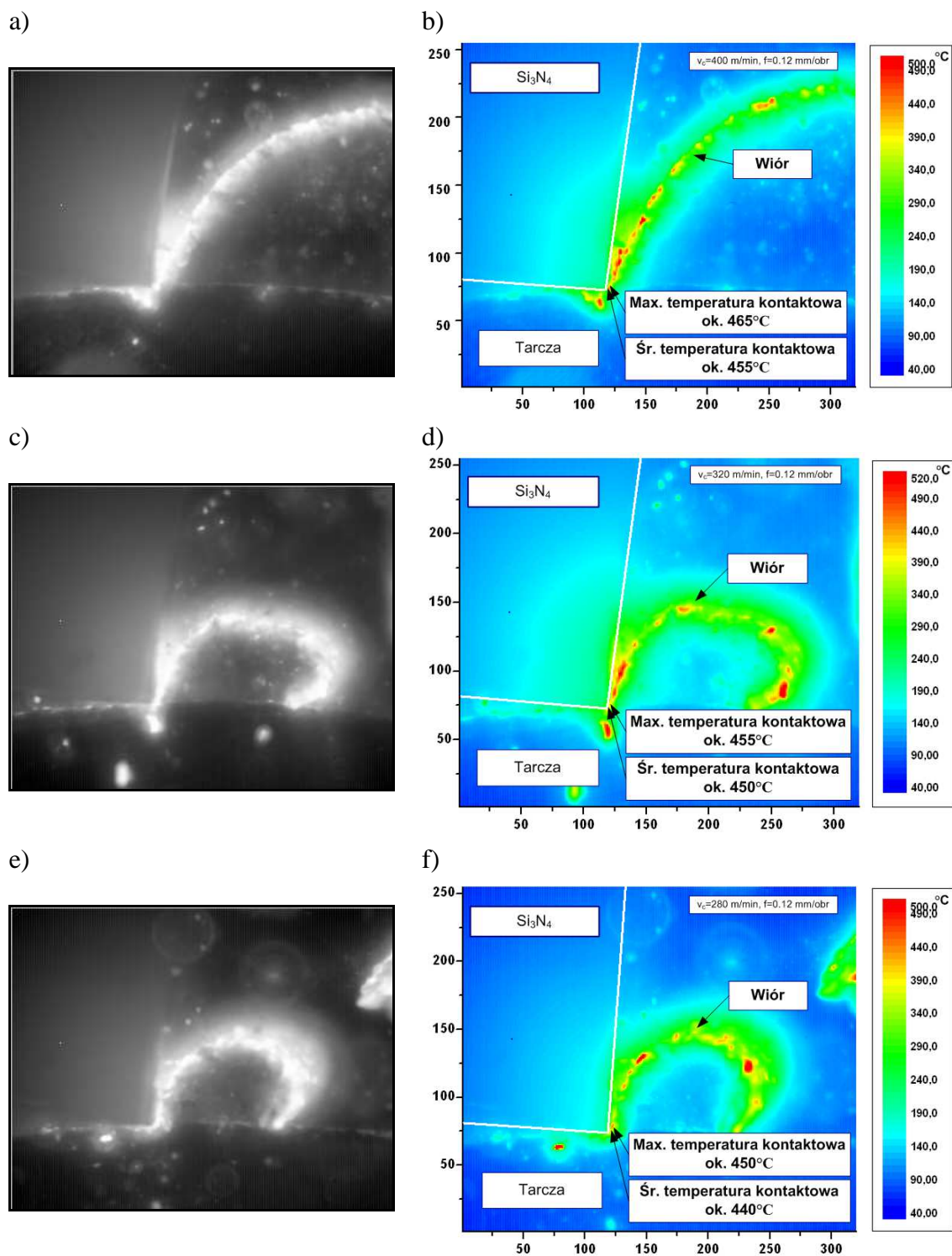
Rys. 8.6. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z pokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=240\div 100$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



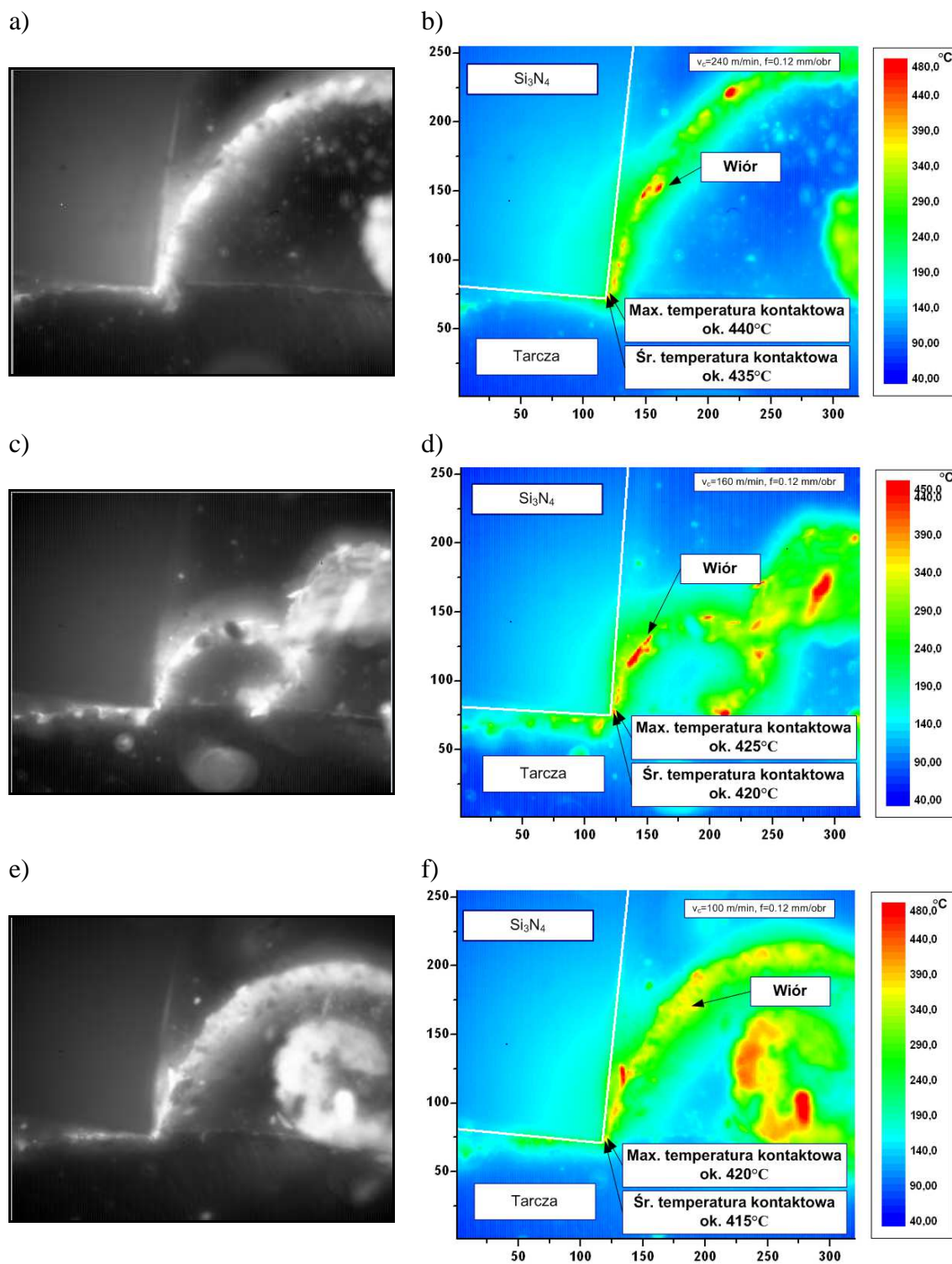
Rys. 8.7. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z pokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=240$ m/min, $f=0,24\div 0,16$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



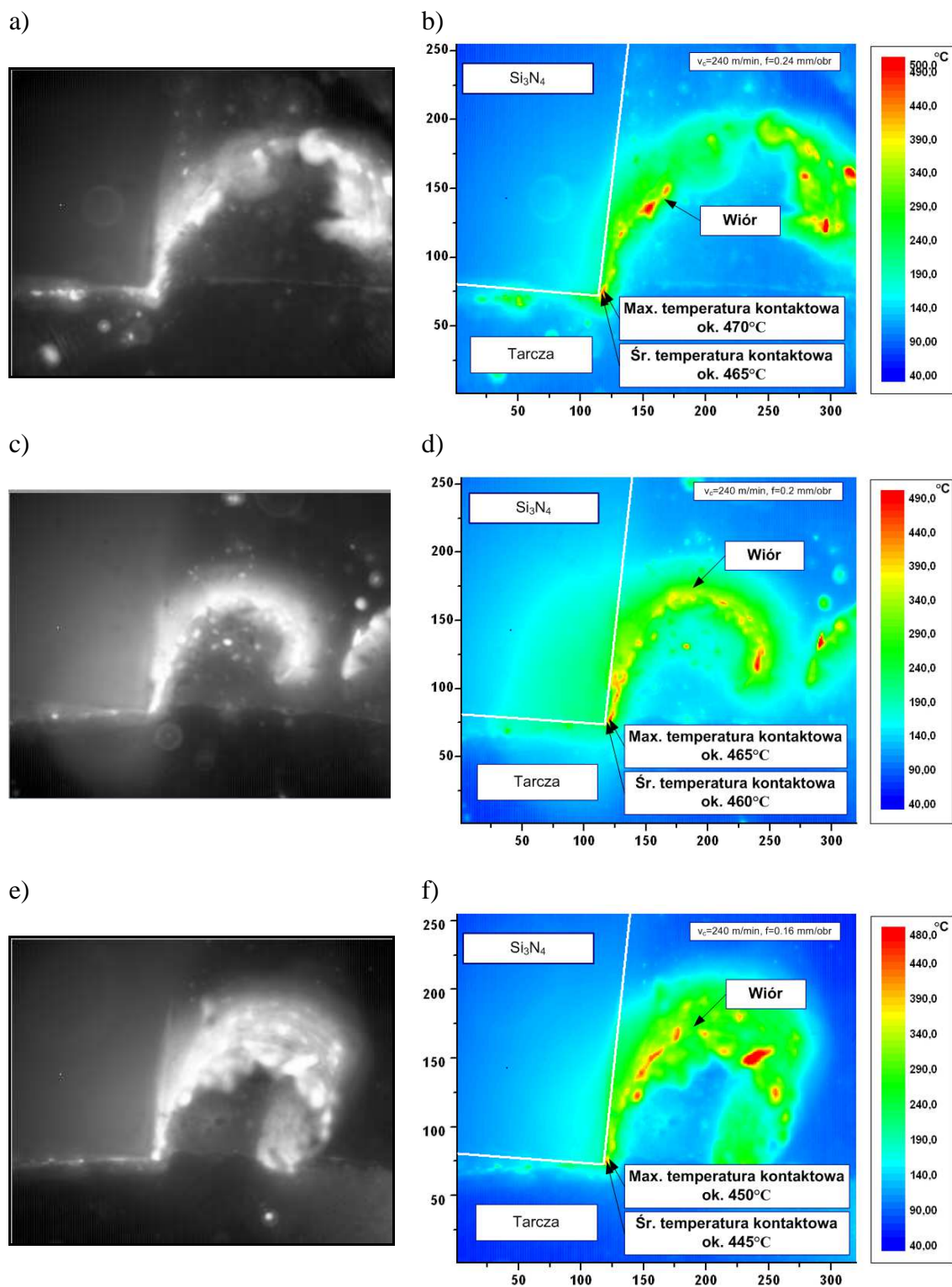
Rys. 8.8. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z pokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=240$ m/min, $f=0,12\div 0,04$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



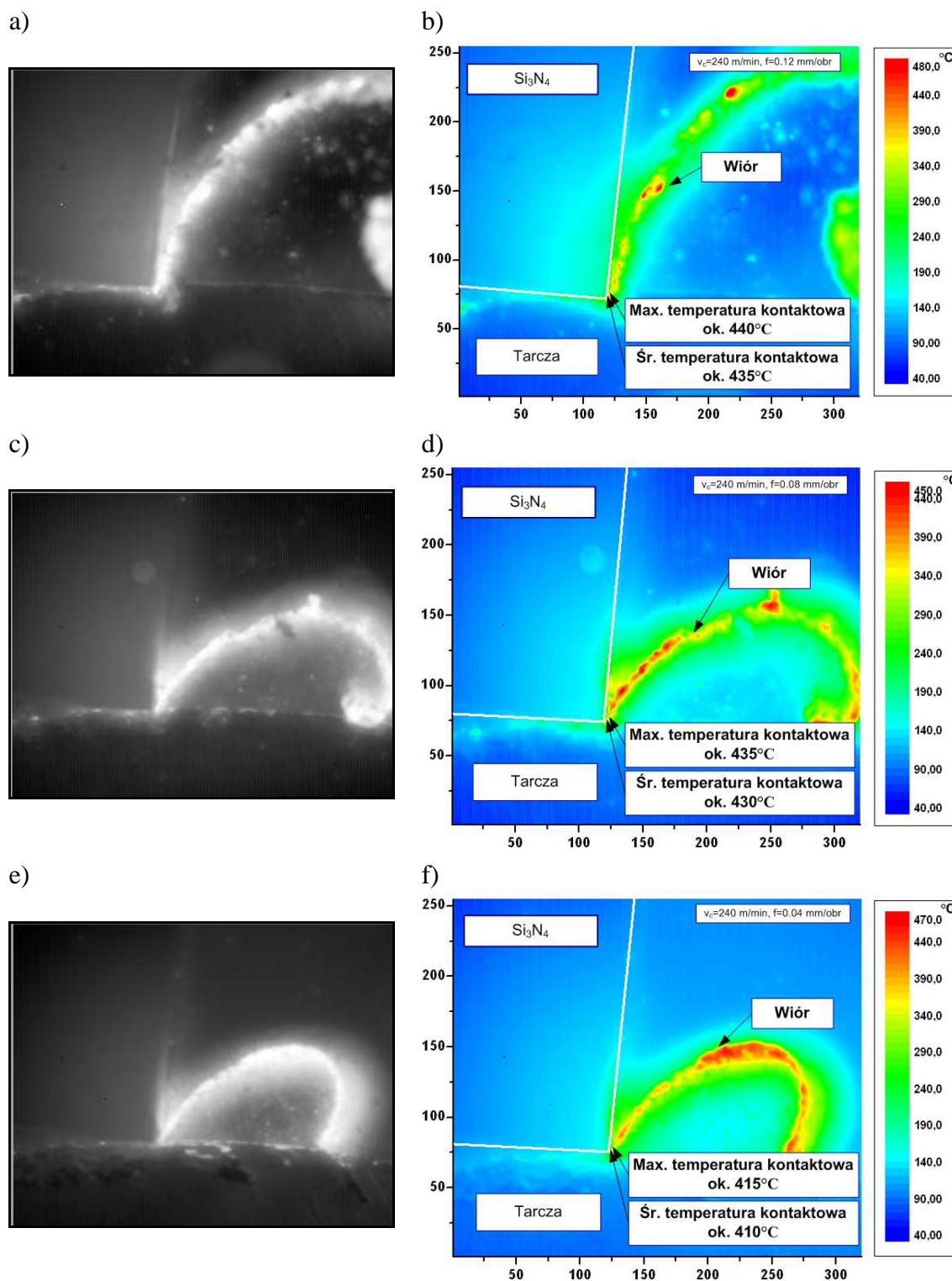
Rys. 8.9. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z niepokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=400\div 280$ m/min, $f=0.12$ mm/obr, $a_p=3.3$ mm)



Rys. 8.10. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z niepokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=240\div 100$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



Rys. 8.11. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z niepokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=240$ m/min, $f=0,24\div 0,16$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)



Rys. 8.12. Mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane podczas toczenia ortogonalnego ostrzem z niepokrywanej ceramiki azotkowej ($v_c=240$ m/min, $f=0,12\div 0,04$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

8.2. ZAŁĄCZNIK B – TABELĘ WYNIKÓW

W tabelach 8.1÷4 przedstawiono stabelaryzowane wyniki badań.

Tabela 8.1

Zestawienie wyników badań ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

CBN													
Lp.	v_c m/min	F_c N	F_f N	t_{sr} °C	t_{max} °C	l_{nc} mm	k_c MPa	k_F N/mm	Pe	F_γ N	μ	τ_k MPa	σ_k MPa
1	100	852	616	412	426	-	2152	-	-	616	0,72	-	-
2	160	803	608	426	438	-	2028	-	-	608	0,76	-	-
3	240	798	602	434	455	-	2015	-	-	602	0,75	-	-
4	280	757	516	448	466	-	1912	-	-	516	0,68	-	-
5	320	760	507	457	485	-	1919	-	-	507	0,67	-	-
6	400	752	504	463	502	-	1899	-	-	504	0,67	-	-
Si ₃ N ₄ + Al ₂ O ₃ /TiN													
Lp.	v_c m/min	F_c N	F_f N	t_{sr} °C	t_{max} °C	l_{nc} mm	k_c MPa	k_F N/mm	Pe	F_γ N	μ	τ_k MPa	σ_k MPa
1	100	926	779	412	417	0,48	2338	1936	67	678	0,68	435	643
2	160	859	700	428	434	0,46	2169	1876	103	606	0,65	421	644
3	240	803	635	436	441	0,36	2028	2206	123	548	0,63	444	702
4	280	806	643	443	449	0,34	2035	2399	132	555	0,64	481	753
5	320	812	649	448	458	0,32	2051	2538	144	561	0,64	520	812
6	400	776	604	453	466	0,28	1960	2791	157	520	0,62	515	828
Si ₃ N ₄													
Lp.	v_c m/min	F_c N	F_f N	t_{sr} °C	t_{max} °C	l_{nc} mm	k_c MPa	k_F N/mm	Pe	F_γ N	μ	τ_k MPa	σ_k MPa
1	100	913	746	413	419	0,54	2306	1691	76	646	0,66	373	569
2	160	851	664	418	426	0,49	2149	1723	111	571	0,62	345	552
3	240	853	668	432	444	0,39	2154	2198	131	575	0,63	409	652
4	280	842	663	442	451	0,36	2126	2326	143	571	0,63	449	713
5	320	841	664	449	455	0,31	2124	2696	141	572	0,63	441	698
6	400	796	647	456	462	0,30	2010	2689	167	560	0,65	502	770

Tabela 8.2

Zestawienie wyników badań ($v_c=240$ m/min, $f=0,04\div 0,24$ mm/obr, $a_p=3,3$ mm)

CBN													
Lp.	f mm/obr	F_c N	F_f N	t_{sr} °C	t_{max} °C	l_{nc} mm	k_c MPa	k_F N/mm	Pe	F_γ N	μ	τ_k MPa	σ_k MPa
1	0.04	545	535	453	466	-	4129	-	-	535	0,98	-	-
2	0.08	714	610	445	458	-	2705	-	-	610	0,85	-	-
3	0.12	798	602	434	455	-	2015	-	-	602	0,75	-	-
4	0.16	891	651	453	465	-	1688	-	-	651	0,73	-	-
5	0.2	1051	717	466	505	-	1592	-	-	717	0,68	-	-
6	0.24	1247	784	512	541	-	1574	-	-	784	0,63	-	-
Si ₃ N ₄ + Al ₂ O ₃ /TiN													
Lp.	f mm/obr	F_c N	F_f N	t_{sr} °C	t_{max} °C	l_{nc} mm	k_c MPa	k_F N/mm	Pe	F_γ N	μ	τ_k MPa	σ_k MPa
1	0.04	418	405	410	416	0,16	3167	2549	55	359	0,78	514	656
2	0.08	633	555	424	431	0,25	2398	2573	83	486	0,71	529	749
3	0.12	803	635	436	441	0,36	2028	2206	123	548	0,63	444	702
4	0.16	979	710	448	453	0,43	1854	2298	144	604	0,58	424	736
5	0.2	1125	771	462	474	0,47	1705	2383	159	649	0,54	391	723
6	0.24	1281	820	472	513	0,52	1617	2473	175	682	0,50	375	748
Si ₃ N ₄													
Lp.	f mm/obr	F_c N	F_f N	t_{sr} °C	t_{max} °C	l_{nc} mm	k_c MPa	k_F N/mm	Pe	F_γ N	μ	τ_k MPa	σ_k MPa
1	0.04	451	437	414	421	0,18	3417	2478	61	387	0,78	534	681
2	0.08	678	601	427	434	0,29	2568	2338	98	527	0,71	470	657
3	0.12	853	668	432	444	0,39	2154	2198	131	575	0,63	409	652
4	0.16	1017	745	444	451	0,47	1926	2173	158	635	0,58	374	642
5	0.2	1171	795	457	463	0,51	1774	2287	173	668	0,54	372	695
6	0.24	1321	852	464	471	0,55	1668	2411	185	709	0,51	371	734

Tabela 8.3

Zestawienie wyników badań ($v_c=100\div 400$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

CBN												
Lp.	v_c m/min	Ra μm	Rz μm	Rp μm	Rv μm	R Δ q °	RSm mm	Rsk	Rku	Rpk	Rk	Rvk
1	100	1,32	9,76	3,32	6,44	8,58	0,14	-0,91	4,79	1	3,18	4,42
2	160	1,1	8,58	2,73	5,85	7,15	0,15	-0,98	5,62	0,87	2,6	3,44
3	240	0,91	7,38	2,55	4,83	6,38	0,13	-0,76	5,58	0,82	2,46	4,24
4	280	0,83	6,9	2,85	4,05	5,63	0,13	-0,27	5,94	1,03	2,35	3,15
5	320	0,82	6,77	2,47	4,3	5,69	0,13	-0,63	5,35	0,93	2,29	3,02
6	400	0,8	6,13	2,07	4,06	6,11	0,12	-0,68	5,91	0,64	2,31	3,1
Si ₃ N ₄ + Al ₂ O ₃ /TiN												
Lp.	v_c m/min	Ra μm	Rz μm	Rp μm	Rv μm	R Δ q °	RSm mm	Rsk	Rku	Rpk	Rk	Rvk
1	100	1,65	10,5	4,9	5,62	8,2	0,12	-0,01	3,24	1,69	4,87	5,98
2	160	1,20	8,04	3,69	4,35	7,17	0,12	-0,15	3,31	1,17	4,08	1,81
3	240	0,92	6,47	2,82	3,65	5,37	0,12	-0,31	4,15	1,07	2,81	2,17
4	280	0,81	6,35	2,96	3,39	6,83	0,11	-0,24	5,05	1,05	2,41	2,14
5	320	0,66	6,12	2,11	4,01	5,83	0,11	-0,84	7,12	0,87	1,98	1,9
6	400	0,64	5,36	1,76	3,6	5,72	0,1	-0,94	5,58	0,53	1,66	2,02
Si ₃ N ₄												
Lp.	v_c m/min	Ra μm	Rz μm	Rp μm	Rv μm	R Δ q °	RSm mm	Rsk	Rku	Rpk	Rk	Rvk
1	100	1,77	11	5,32	5,65	9,32	0,11	-0,04	3,19	2,25	5,15	3,26
2	160	1,45	8,84	3,93	4,91	7,69	0,12	-0,22	3,25	1,43	4,35	4,81
3	240	1,32	7,97	3,66	4,31	7,06	0,11	-0,1	2,78	1,17	4,52	2,38
4	280	1,11	7,42	3,1	4,32	6,3	0,11	-0,41	4,15	0,91	3,66	3,37
5	320	0,94	6,7	2,78	3,92	5,53	0,12	-0,35	4,31	1,01	2,98	2,99
6	400	0,92	7,03	2,74	4,29	6,01	0,11	-0,64	5,39	0,67	2,6	3,44

Tabela 8.4

Zestawienie wyników badań ($v_c=320$ m/min, $f=0,04\div 0,2$ mm/obr, $a_p=0,8$ mm)

CBN												
Lp.	f mm/obr	Ra μm	Rz μm	Rp μm	Rv μm	R Δ q °	RSm mm	Rsk	Rku	Rpk	Rk	Rvk
1	0,04	0,41	3,53	1,23	2,3	4	0,14	-0,82	6,99	0,49	1,12	1,25
2	0,08	0,53	4,16	1,55	2,61	4,17	0,1	-0,49	5,46	0,61	1,47	1,75
3	0,12	0,82	6,77	2,47	4,3	5,69	0,13	-0,63	5,35	0,93	2,29	3,02
4	0,16	1,43	9,62	4,15	5,47	7,17	0,17	-0,34	3,81	1,62	3,81	6,17
5	0,2	1,82	11,1	5,1	6,01	7,87	0,19	0,11	3,2	1,99	3,2	6,4
Si ₃ N ₄ + Al ₂ O ₃ /TiN												
Lp.	f mm/obr	Ra μm	Rz μm	Rp μm	Rv μm	R Δ q °	RSm mm	Rsk	Rku	Rpk	Rk	Rvk
1	0,04	0,55	5,23	1,78	3,45	5,69	0,12	-1,33	6,87	0,56	1,32	2,06
2	0,08	0,60	5,1	1,78	3,32	6,46	0,07	-0,74	6,17	0,55	1,83	1,64
3	0,12	0,66	6,12	2,11	4,01	5,83	0,11	-0,84	7,12	0,77	1,98	1,9
4	0,16	1,52	10,3	5,07	5,22	8,07	0,15	0,21	3,48	2,36	4,24	3,47
5	0,2	2,05	12,5	5,53	6,93	8,82	0,17	-0,15	3,48	1,95	6,1	5,84
Si ₃ N ₄												
Lp.	f mm/obr	Ra μm	Rz μm	Rp μm	Rv μm	R Δ q °	RSm mm	Rsk	Rku	Rpk	Rk	Rvk
1	0,04	0,56	4,22	1,75	2,47	3,93	0,16	-0,25	4,18	1,06	1,61	1,3
2	0,08	0,71	6,04	2,14	3,9	5,76	0,11	-0,79	5,91	0,9	2,16	1,72
3	0,12	0,94	6,7	2,78	3,92	5,53	0,14	-0,35	4,31	1,04	2,98	2,99
4	0,16	1,5	11,3	3,81	7,46	7,13	0,17	-0,84	5,85	1,13	3,3	7,36
5	0,2	1,77	13	4,55	8,44	8,51	0,17	-0,65	4,34	1,63	4,95	8,57