

# Pomiar rozkładu temperatury w strefie skrawania za pomocą kamery termowizyjnej

Analysis of temperature distribution layout within the cutting zone by means of an infrared camera

PIOTR KISZKA  
WIT GRZESIK  
JÖEL RECH\*

Przedstawiono wyniki pomiaru rozkładu temperatury w strefie skrawania uzyskane za pomocą kamery termowizyjnej podczas toczenia ortogonalnego żeliwa sferoidalnego (perlityczno-ferrytycznego) ostrzami z ceramiki azotkowej i CBN. Program eksperymentu obejmował pomiar średniej i maksymalnej temperatury kontaktowej oraz uzyskanie kolorowych termogramów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** kamera termowizyjna, obróbka skrawaniem, żeliwo sferoidalne

*Reported are the results of temperature distribution measurements in the cutting zone carried out by means of a thermal image camera during orthogonal turning of the pearlitic-ferritic (PF) spheroidal cast iron (EN-GJS-500-7 grade) using CBN and nitride ceramic tools. The experiment consisted of measurements of the average and the maximum cutting contact temperatures and color thermal photographs.*

**KEYWORDS:** infrared camera, machining, spheroidal cast iron

W badaniach doświadczalnych procesu skrawania bardzo istotne miejsce zajmują pomiary temperatury. Na ich podstawie dobiera się warunki obróbki w taki sposób, by zachować właściwości skrawnego materiału narzędziowego i osiągnąć określoną dokładność obróbki oraz przewidzieć zużycie ostrza [1]. Zjawiska cieplne, które występują w strefie skrawania, a przede wszystkim temperatura ostrza, mają duży wpływ na trwałość narzędzia, a w konsekwencji – na koszty i wydajność obróbki [2].

Dzięki postępowi w dziedzinie bezkontaktowych pomiarów temperatury, które bazują na rejestracji energii cieplnej emitowanej przez badany obiekt (o temperaturze wyższej od zera absolutnego), stało się możliwe zastosowanie tych metod do identyfikacji pola temperatury w procesie skrawania [2], a tym samym wyznaczenia średniej i maksymalnej temperatury skrawania. Technika wykorzystująca zjawisko promieniowania podczerwonego jest prawdopodobnie drugą najczęściej używaną metodą pomiaru temperatury w procesie skrawania [3]. Pozwala ona na określenie wartości temperatury nawet w trudnych warunkach.

Budowa stanowiska badawczego wykorzystującego radiacyjne metody pomiaru naraża jednak wiele problemów, takich jak [4]:

- konieczność wzorcowania układu, aby określić emisyjność materiału obrabianego lub narzędzia skrawającego,
- określenie i udostępnienie miejsca pomiarów.

Wskazaniem do przeprowadzenia pomiarów temperatury kontaktowej za pomocą kamery termowizyjnej było zastosowanie do badań narzędzi z  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – w ich przypadku nie sprawdzają się bowiem techniki pomiaru oparte na przewodzeniu. Za cel badań przyjęto zmierzenie średniej i maksy-

malnej temperatury kontaktowej podczas skrawania ortogonalnego żeliwa sferoidalnego siedmioma narzędziami z ceramiki azotkowej i CBN.

Badania eksperymentalne zrealizowano w Laboratorium Tribologii i Dynamiki Systemów (LTDS) należącym do Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne (ENISE).

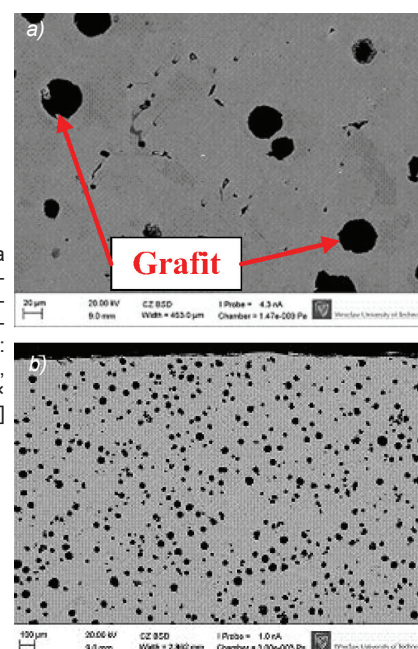
## Warunki i metodyka badań doświadczalnych

■ **Właściwości i mikrostruktura żeliwa.** Badania doświadczalne przeprowadzono na próbkach z żeliwa sferoidalnego perlityczno-ferrytycznego o symbolu EN-GJS-500-7 zawierającego ok. 50% perlitu, 40% ferrytu i 10% grafitu. Skład chemiczny obrabianego materiału przedstawiono w tabl. I. Średnia twardość badanego materiału wynosiła ok. 180 HB.

**TABLICA I.** Skład chemiczny żeliwa sferoidalnego [5]

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

Rys. 1. Zdjęcia skaningowe mikrostruktury żeliwa sferoidalnego perlityczno-ferrytycznego: a) powiększenie 633×, b) powiększenie 100× [6]



Obraz mikrostruktury żeliwa sferoidalnego (rys. 1) wykonano na mikroskopie skaningowym ZEISS EVO MA25. Zdjęcie skaningowe żeliwa EN-GJS-500-7 potwierdza obecność kulistego grafitu.

■ **Narzędzia skrawające i warunki skrawania.** W badaniach posługiwano się narzędziami z CBN (BL), powlekanej ceramiki azotkowej (CC) i niepowlekanej ceramiki azotkowej (CN). Producentem wszystkich testowanych narzędzi była firma Sandvik Coromant.

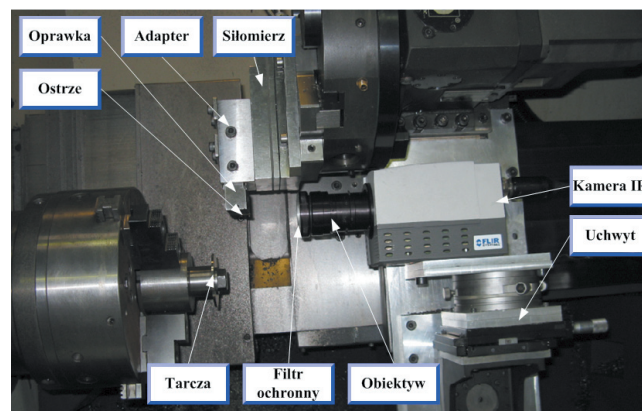
\* Dr inż. Piotr Kiszka (peter.kiszka@gmail.com) – RAFAKO S.A., prof. dr hab. inż. Wit Grzesik (w.grzesik@po.opole.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Opolskiej, prof. Dr Sc. Jöel Rech (joel.rech@enise.fr) – ENISE Saint-Etienne, Labs for Tribology and Systems Dynamics

Podczas prób toczenia ortogonalnego użyto ostrzy o dwóch różnych geometriach. W przypadku narzędzia z CBN (CB7015) wybrano ostrze o oznaczeniu N123H1 040004 S01025 (rys. 2a), a dla ostrzy z ceramiki azotkowej (GC1690 i CC6090 – rys. 2b i c) – płytki trójkątne o geometrii TNGA 160408 T02520.

W tabl. II przedstawiono dodatkowe informacje o mikrogeometrii krawędzi skrawającej ostrzy. W trakcie badań toczenia ortogonalnego zastosowano dwie oprawki nożowe:

- LF 123H25–2020BM do narzędzia z CBN,
- PTFNL 2020K16 w przypadku płytek ceramicznych (TNGA).

Badania doświadczalne toczenia ortogonalnego przeprowadzono w dwóch etapach. Najpierw zmiennym parametrem technologicznym była prędkość skrawania  $v_c = 100\div 400$  m/min, a w drugim etapie zmiennym parametrem był posuw  $f = 0,04\div 0,24$  mm/obr. Głębokość skrawania w obydwu przypadkach wynosiła  $a_p = 3,3$  mm. W tabl. III zestawiono wartości parametrów skrawania.



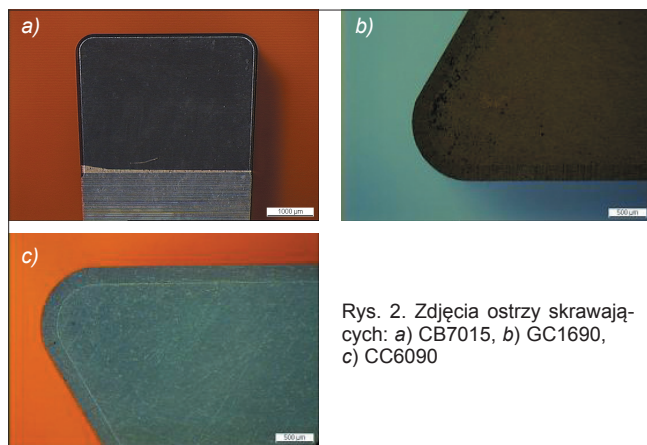
Rys. 3. Stanowisko do prowadzenia prób skrawania [8]

TABLICA II. Charakterystyka krawędzi skrawającej i ścinu technologicznego wg [7]

ISO	TNGA 160408 T02520	Szerokość ścinu $b_{\gamma n}$	Kąt ścinu $\gamma_n$
TNGA 160408 T02520	Ścin o ujemnym kącie natarcia	0,25 mm	20°
N123H1 40004 S01025	Ścin o ujemnym kącie natarcia i zaokrąglonej krawędzi skrawającej	0,10 mm	25°

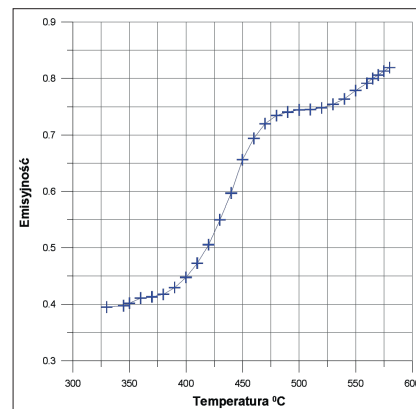
TABLICA III. Parametry obróbki

Etap I	Etap II
$v_c = 100, 160, 240, 280, 320, 400$ m/min $f = 0,12$ mm/obr $a_p = 3,3$ mm	$v_c = 240$ m/min $f = 0,04; 0,08; 0,12; 0,16; 0,2; 0,24$ mm/obr $a_p = 3,3$ mm



Rys. 2. Zdjęcia ostrzy skrawających: a) CB7015, b) GC1690, c) CC6090

Rys. 4. Emisyjność żeliwa sferoidalnego EN-GJS-500-7 w funkcji temperatury [10]



mowizyjna ThermaCAM™ Phoenix firmy FLIR System. Według producenta [9] kamera ta jest powszechnie stosowana w różnych gałęziach przemysłu oraz w badaniach naukowych. Charakteryzuje się dużą częstotliwością zapisu i daje możliwość rejestracji obrazów o rozdzielczości  $320 \times 255$  pikseli. Dzięki temu można uzyskać czytelny obraz rozkładu temperatury w strefie skrawania.

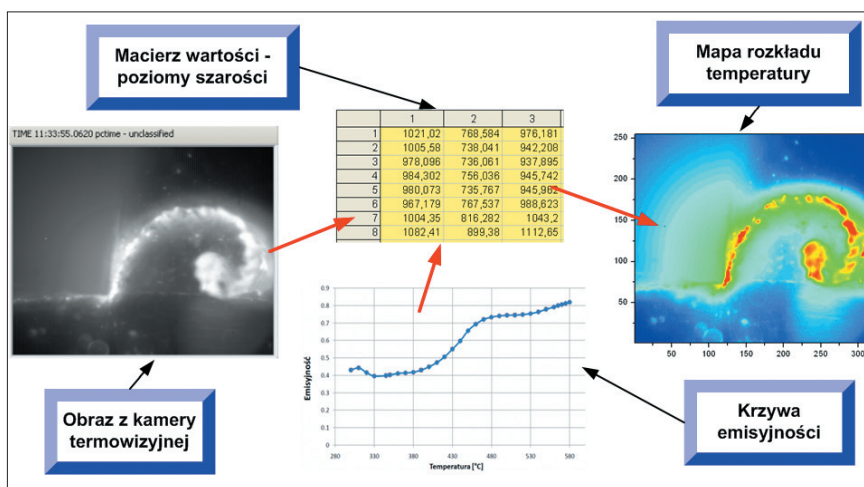
Do poprawnego wyznaczenia temperatury kontaktowej wykorzystano zmianę emisyjności żeliwa sferoidalnego w funkcji temperatury wyznaczoną w [10]. Na podstawie analizy tej pracy stwierdzono, że najbardziej istotny zakres zmian emisyjności będzie obejmował temperatury  $320\div 580$  °C (rys. 4).

Do rejestracji obrazu podczas skrawania zastosowano program ThermaCAM™ RDAS. Sama analiza otrzymanego obrazu odbywała się za pomocą narzędzia ThermaCAM™ RTools. W efekcie otrzymano czarno-biały obraz rozkładu temperatury oraz macierz ze stopniami szarości (grey levels).

## Techniki pomiarowe

Badania temperatury skrawania przeprowadzono na tokarce sterowanej numerycznie CNC Transmab 450 TD firmy SOMAB. Widok przestrzeni roboczej tokarki CNC z kamerą termowizyjną przedstawiono na rys. 3. Kamerę termowizyjną zamontowano na uchwycie w odległości ok. 60 mm od ostrza skrawającego. Zastosowany uchwyt gwarantował bardzo dużą sztywność układu kamera–głowica, a dzięki dodatkowej regulacji była możliwość dokładnego ustawienia kamery względem narzędzia.

Do rejestracji rozkładu temperatury w strefie skrawania podczas toczenia ortogonalnego posłużyła kamera ter-



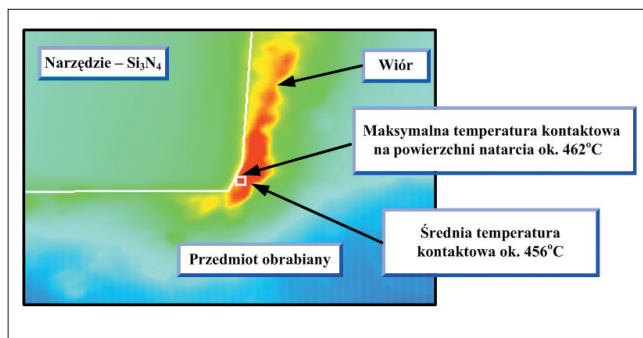
Rys. 5. Etapy uzyskania kolorowej mapy rozkładu temperatury – termogramu [11]



Na rys. 5 przedstawiono kolejne etapy uzyskania kolorowej mapy rozkładu temperatury (termogramu) w strefie skrawania.

Z mapy rozkładu temperatury wydzielono obszar  $2 \times 2$  piksele (rys. 6) zlokalizowany powyżej krawędzi skrawającej, w pewnej odległości od niej. Dla tego obszaru wyliczono średnią oraz maksymalną temperaturę kontaktową. Dla pojedynczego pomiaru (np. dla  $v_c = 400$  m/min,  $f = 0,12$  mm/obr,  $a_p = 3,3$  mm) wygenerowano pięć map rozkładu temperatury. Na ich podstawie wyznaczono wartości średniej i maksymalnej temperatury kontaktowej w strefie skrawania. Do badań rozkładu temperatury przygotowano specjalne tarcze (rys. 3), których chropowatość powierzchni wynosiła  $Ra = 0,64 \mu\text{m}$  i była taka sama jak chropowatość próbki użytej podczas kalibracji kamery termowizyjnej.

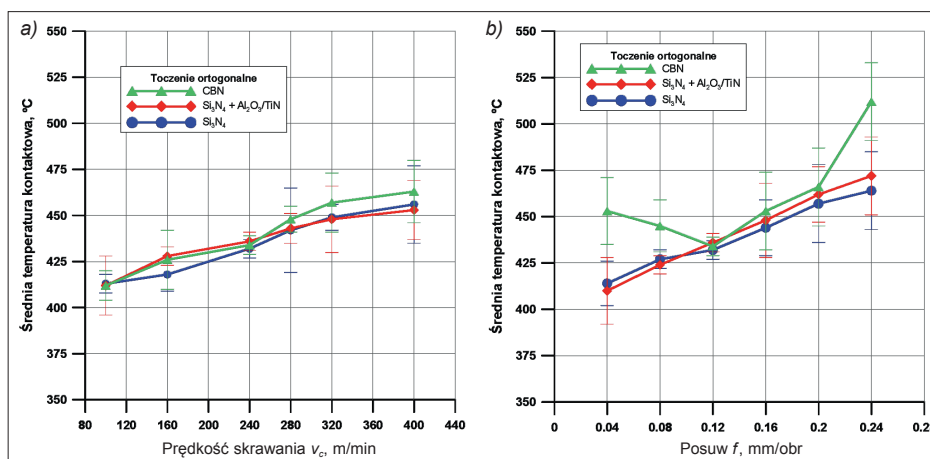
Należy doprecyzować pojęcie „średniej temperatury kontaktowej”, pod którym wprowadza się umowne pojęcie „temperatury skrawania” – wynika to z trudności technicznych w identyfikacji złożonych pól temperaturowych w strefie skrawania [1].



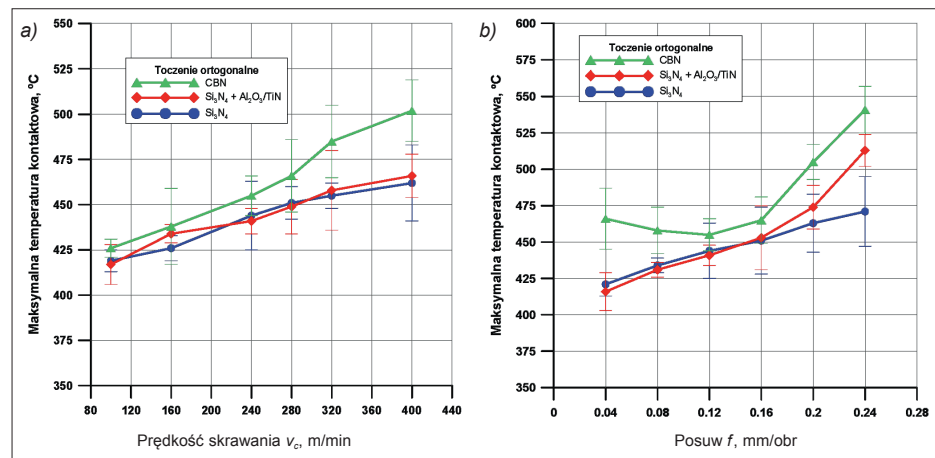
Rys. 6. Obszar pomiaru temperatury uzyskany z kamery termowizyjnej [11] dla:  $v_c = 400$  m/min,  $f = 0,12$  mm/obr,  $a_p = 3,3$  mm

## Wyniki badań i dyskusja

■ **Wpływ parametrów obróbki na średnią temperaturę kontaktową.** Na rys. 7a i b przedstawiono zmiany średniej wartości temperatury kontaktowej w funkcji prędkości skrawania i posuwu. W przeprowadzonych testach toczenia ortogonalnego średnia temperatura kontaktowa zmieniała się



Rys. 7. Wpływ prędkości skrawania (a) i posuwu (b) na średnią temperaturę kontaktową [11]



Rys. 8. Wpływ prędkości skrawania (a) i posuwu (b) na maksymalną temperaturę kontaktową [11]

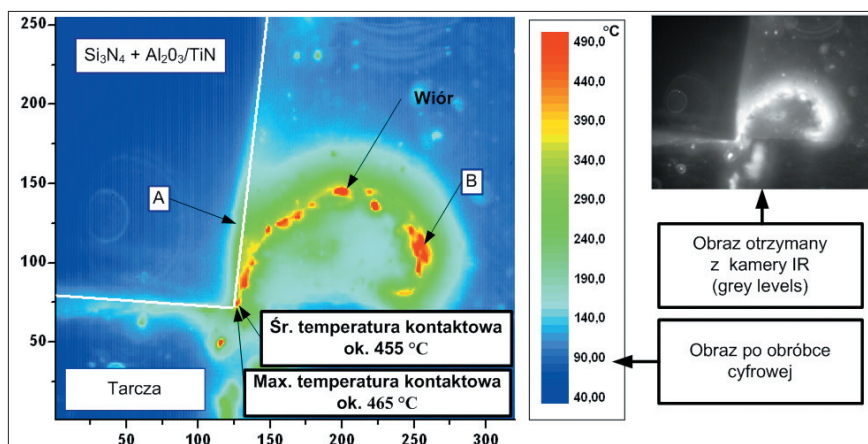
w zakresie od ok.  $410^\circ\text{C}$  do ok.  $510^\circ\text{C}$ , w zależności od przyjętych parametrów procesu.

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania  $v_c$  od 100 do 400 m/min (rys. 7a) przyrost średniej temperatury kontaktowej jest rzędu ok.  $50^\circ\text{C}$ . 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. 7b), gdyż w zakresie posuwu  $f = 0,04-0,08$  mm/obr zarejestrowano znacznie większe wartości średniej temperatury kontaktowej w porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej [11]. Może to wynikać z faktu, że w przypadku bardzo małej grubości warstwy skrawanej materiał trudniej się oddziela, ponieważ opór właściwy skrawania jest znacząco większy z uwagi na ugniatające działanie krawędzi skrawającej (ostrza z CBN) o dużym promieniu zaokrąglenia (tabl. II). Skutkiem tego otrzymuje się większe wartości średniej i maksymalnej temperatury kontaktowej.

■ **Wpływ parametrów obróbki na maksymalną temperaturę kontaktową.** Na rys. 8a i b przedstawiono zmiany maksymalnej wartości temperatury kontaktowej w zależności od prędkości skrawania i posuwu. Maksymalna temperatura kontaktowa zmieniała się w zakresie od ok.  $420^\circ\text{C}$  do ok.  $540^\circ\text{C}$  w zależności od parametrów skrawania. Zaobserwowano, że największą różnicę (ok.  $40^\circ\text{C}$ ) pomiędzy średnią a maksymalną temperaturą kontaktową uzyskano dla ostrza z CBN, gdy skrawano z prędkością  $v_c = 400$  m/min. Małe różnice między średnią a maksymalną temperaturą kontaktową w skrawaniu żeliwa są następstwem zmniejszenia długości/pola styku i koncentracji ciepła w niewielkim obszarze w porównaniu ze skrawaniem stali [10]. W przeprowadzonych badaniach doświadczalnych wyznaczono również większą wartość maksymalnej temperatury kontaktowej dla ostrza z CBN w porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej. Na ten fakt może mieć wpływ zużycie ostrza z CBN (choć było ono nieznaczne), ponieważ wykonano nim kilka krótkich prób.

■ **Rozkład temperatury w strefie skrawania.** Na rys. 9 przedstawiono przykładowy termogram uzyskany podczas skrawania żeliwa sferoidalnego narzędziem z powlekanej ceramiki azotkowej. Na obrazie naniesiono zarys ostrza skrawającego, a także zaznaczono średnią i maksymalną temperaturę kontaktową. Zamieszczono również czarno-biały obraz otrzymany bezpośrednio z kamery termowizyjnej bez obróbki cyfrowej.



Rys. 9. Mapa rozkładu temperatury w strefie skrawania z użyciem ostrza z powlekanej ceramiki azotkowej ( $v_c = 400$  m/min,  $f = 0,12$  mm/obr,  $a_p = 3,3$  mm) [11]

### Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań wysunięto następujące wnioski:

- Dla zastosowanych parametrów skrawania średnia temperatura kontaktowa zmieniała się w zakresie od ok.  $410^\circ\text{C}$  do ok.  $510^\circ\text{C}$ . Otrzymane wartości średniej temperatury kontaktowej są zdecydowanie niższe od średniej temperatury skrawania stali niestopowej, np. C45.
- Odmienne charakterystyki zmian średniej temperatury kontaktowej w funkcji posuwu ( $f = 0,04 \pm 0,08$  mm/obr) dla ostrza z CBN wynika z faktu, że przy bardzo małej grubości warstwy skrawanej materiał trudniej się oddziela z uwagi na ugniatające działanie krawędzi skrawającej o dużym promieniu zaokrąglenia.
- Otrzymanie wyższych wartości maksymalnej temperatury kontaktowej dla ostrzy z CBN w porównaniu z ostrzami z ceramiki azotkowej może być spowodowane niewielkim zużyciem ostrza.

### LITERATURA

1. Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów metalowych”. Warszawa: WNT, 2010.
2. Lis K. „Możliwości stosowania metod pirometrycznych do identyfikacji pola temperatury w strefie skrawania podczas wiercenia”. *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn*. Nr 4 (2005): s. 91÷116.
3. Dinca C., Lazoglu I., Serpenguzel A. „Analysis of thermal fields in orthogonal machining with infrared imaging”. *Journal of Materials Processing Technology*. No. 198 (2008): pp. 147÷154.
4. Niesłony P. „Modelowanie przepływu ciepła i rozkładu temperatury w strefie skrawania dla ostrzy z twardymi powłokami ochronnymi”. Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2008.
5. Małecka J., Grzesik W., Kowalczyk D., Kiszka P. „Analiza obrazowa stanu zużycia ostrza z ceramiki azotkowej po skrawaniu żeliwa sferoidalnego”. *Tribologia*. Nr 22 (2011): s. 71÷84.
6. Żak K., Kiszka P., Grzesik W., Kowalczyk D. „Skrawanie żeliwa sferoidalnego narzędziami z ceramiki azotkowej i CBN”. *Mechanik*. Nr 8–9 (2013): s. 634÷642.
7. „Poradnik obróbki skrawaniem”, Sandvik Coromant, 2010.
8. Kiszka P., Kowalczyk D., Grzesik W. „Wysokowydajne skrawanie żeliwa sferoidalnego z użyciem narzędzi CBN”. *Innowacyjne Technologie Wytwarzania*. Kraków, 2011, s. 15÷24.
9. <http://www.flir.com.pl>
10. 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*. No 49 (2009): pp. 125÷133.
11. Kiszka P. „Badanie mechanicznych i termicznych oddziaływań w skrawaniu żeliwa sferoidalnego ostrzami z ceramiki azotkowej i CBN”. Rozprawa doktorska. Opole, 2014. ■