

Porównanie stykowych i termowizyjnych metod pomiaru temperatury ostrza tokarskiego podczas skrawania

Comparison contact and thermal imaging methods measure the temperatures of the turning blades during cutting

KAROL GROCHALSKI
PIOTR JABŁOŃSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.41>

Przedstawiono dwie metody pomiaru temperatury podczas skrawania: metodę z wykorzystaniem termoelementu oraz termowizyjną. Opisano wpływ temperatury skrawania na intensywność zużycia narzędzi skrawających i ich trwałość. Zaprezentowano stanowisko pomiarowe, wykorzystane materiały i narzędzie skrawające. Zestawiono wyniki w postaci temperatury osiągniętej na ostrzu skrawającym przy zadanych parametrach obróbki podczas toczenia. Omówiono metody pomiaru temperatury ostrza za pomocą termoelementu oraz metodę radiacyjną – termowizję. Wyszczególniono zalety i wady każdej z metod.

SŁOWA KLUCZOWE: zużycie narzędzi, azotek boru, pomiar temperatury, temperatura skrawania, termoelement, termowizja, współczynnik emisyjności

The paper presents a method of measuring the temperature during cutting and its impact on the machining process. The influence of temperature on the intensity of the cutting tool wear cutting and durability. Shows the measuring position, the materials used and the cutting tool. We present the results of the processing parameters, during which the measurements are made. This paper presents methods for measuring the temperature of the blade using a thermocouple and methods of radiation. It lists the advantages and disadvantages of each method.

KEYWORDS: tool wear, boron nitride, temperature measurements, cutting temperature, thermocouple, thermography, emissivity

W związku ze zjawiskami towarzyszącymi oddzieleniu materiału w procesie skrawania wydziela się ciepło, które powoduje wzrost temperatury zarówno obrabianego materiału, jak i wióra oraz narzędzia skrawającego. Najbardziej niepożądany jest wzrost temperatury ostrza [1, 2]. W przypadku materiałów narzędziowych – np. stali szybkotnących, węglików spiekanych, ceramiki czy materiałów supertwardych (polikrystalicznego diamentu, azotku boru) – wzrost temperatury pracy w pewnych zakresach może mieć niekorzystny wpływ na trwałość narzędzi. Wiąże się on często z pogorszeniem właściwości mechanicznych materiału narzędziowego (spadkiem twardości) oraz z intensyfikacją niektórych zjawisk zużycia, np. adhezji oraz zużycia chemicznego [3, 4]. W ogólnym zużyciu narzędzi z materiałów o bardzo wysokiej twardości i odporności na zużycie ściernie (jak wspomniane materiały supertwarde: azotek boru – BN – *Boron Nitride*, i polikrystaliczny diament – PCD – *Polycrystalline Diamond*) często dużą rolę odgrywają procesy adhezyjne i chemiczne, których intensyfikacja może znacznie ograniczyć trwałość ostrza [4].

Zależności pomiędzy intensywnością zużywania się ostrza a temperaturą skrawania są bardzo złożone i nie zawsze ich przebieg jest monotoniczny.

Ze względu na ekonomikę obróbki i ochronę środowiska coraz większe zastosowanie znajduje obróbka bez udziału cieczy chłodząco-smarującej. W związku z tym prowadzone są badania nad narzędziami i materiałami narzędziowymi (oraz powłokami) mające na celu ograniczenie zużycia narzędzi związanego z podwyższoną temperaturą pracy [5].

Autorzy skupiają się na wyborze metody pomiaru temperatury skrawania podczas toczenia poprzecznego z pomocą specjalnego narzędzia z ostrzem skrawającym z nowoczesnego kompozytu sześciennego azotku boru oraz węgliku wolframu w osnowie z kobaltu (WCCo/cBN).

Cel badań

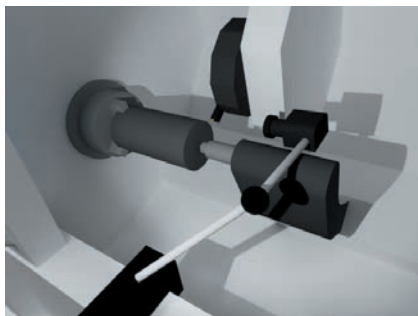
Celem badań było opracowanie najkorzystniejszego sposobu pomiaru temperatury skrawania podczas toczenia poprzecznego z wykorzystaniem narzędzia składanego z płytką skrawającą z kompozytu WCCo/cBN. Geometria płytki była zgodna z normą (oznaczenie 7 według ISO 243 lub NNPa-c według PN/M-58352). Obróbkę przeprowadzono bez udziału cieczy chłodząco-smarującej, na tokarce numerycznej DMG CTX 210. Tworzywem obrabianym było żeliwo sferoidalne GJL-250. Materiałem wejściowym był wałek żeliwny o średnicy początkowej 130 mm, zamocowany w hydraulicznym uchwycie trójściskowym. Zastosowano dodatkowe podparcie w kłie tokarskim. Badania przeprowadzono przy różnych prędkościach skrawania w zakresie od 125 do 250 m/min i posuwie wgłębnym o wartości 0,06 oraz 0,1 mm/obr.

Pomiar temperatury skrawania

Sformułowano potrzebę opracowania sposobu pomiaru temperatury narzędzia podczas obróbki. Metoda powinna w jak najmniejszym stopniu ingerować w proces skrawania, być szybka oraz oferować możliwość dokonywania pomiaru i akwizycji wyników w trybie online, bez przerywania obróbki. Ze względu na bezpieczeństwo operatora obrabiarki założono możliwość umieszczenia układu pomiarowego wewnątrz przestrzeni roboczej tokarki i zamknięcia osłony przestrzeni roboczej.

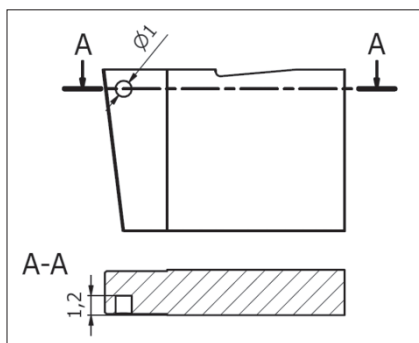
Zaproponowano dwie metody pomiaru temperatury. Pierwszą z nich była metoda termowizyjna, wykorzystująca kamerę FLIR T620 i oprogramowanie FLIR ReseachIR MAX [5]. Kamerę umieszczono w przestrzeni roboczej obrabiarki i skierowano na ostrze pod kątem pozwalającym na ciągłą obserwację pomocniczej powierzchni przyłożenia i części powierzchni natarcia [6]. Poglądowe ustawienie kamery termowizyjnej przedstawiono na rys. 1.

* Mgr inż. Karol Grochalski (karol.p.grochalski@doctorate.put.poznan.pl), mgr inż. Piotr Jabłoński (piotr.le.jablonski@doctorate.put.poznan.pl) – Instytut Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej



Rys. 1. Poglądowe umieszczenie kamery termowizyjnej w przestrzeni roboczej obrabiarki

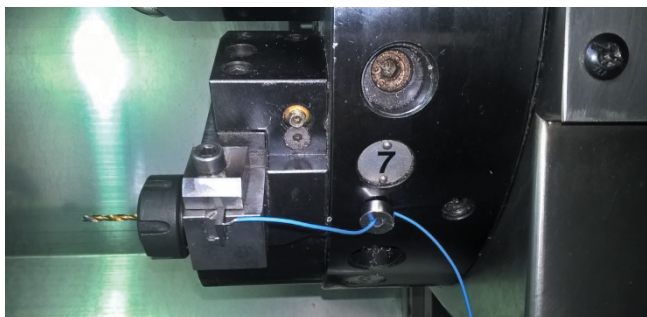
Druga z zaproponowanych metod – metoda kontaktowa – wykorzystuje skalibrowany termoelement typu K. Pełniła ona rolę referencyjną wobec metody wykorzystującej kamerę termowizyjną. Problemem związanym z pomiarem kontaktowym było umieszczenie sondy pomiarowej blisko strefy skrawania. W bocznej powierzchni ostrza wykonano otwór, w który wprowadzono spoinę pomiarową. Otwór wykonano za pomocą elektrodrążarki węglowej i miedzianej elektrody. Aby zapewnić dobrą przewodność cieplną pomiędzy materiałem narzędzia i termoelementem, przestrzeń otworu wypełniono pastą termoprzewodzącą. Otwór i jego umiejscowienie przedstawiono na rys. 2. Ze względu na zmniejszenie czynnego przekroju ostrza w krytycznym miejscu, gdzie wykonano otwór, trzeba było ograniczyć głębokość i wymiary drążonego otworu, co zwiększało ryzyko uszkodzenia narzędzia w wyniku działania sił skrawania.



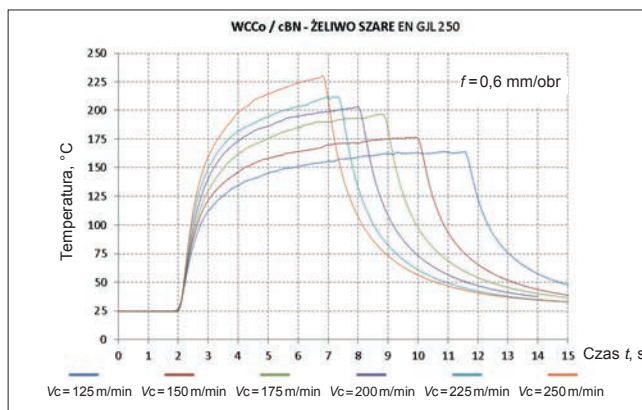
Rys. 2. Wymiary i położenie otworu pomiarowego w ostrzu

Kontaktowy pomiar temperatury skrawania

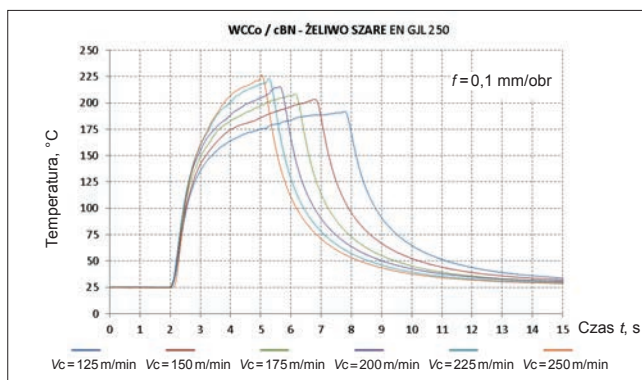
Pomiaru temperatury w procesie skrawania metodą kontaktową dokonano z wykorzystaniem termoelementu perełkowego typu K (NiCr-NiAl), przetwornika pomiarowego firmy National Instruments i oprogramowania LabVIEW. Sonda pomiarowa została umieszczona w otworze wykonanym w ostrzu skrawającym i pozostawała w styku z materiałem badanym za pośrednictwem pasty termoprzewodzącej (rys. 3). Wyniki badań



Rys. 3. Termoelement umieszczony w narzędziu – konieczność mocowania dodatkowych osłon sondy pomiarowej



Rys. 4. Przebieg temperatury w czasie w procesie skrawania przy posuwie $f = 0,06 \text{ mm/obr}$



Rys. 5. Przebieg temperatury w czasie w procesie skrawania przy posuwie $f = 0,1 \text{ mm/obr}$

przedstawiono w formie wykresów temperatury w czasie (rys. 4 i 5). Pomiar temperatury metodą kontaktową stanowił odniesienie dla pomiaru termowizyjnego.

Na wykresach (rys. 4 i 5) można zauważyć, że temperatura skrawania rośnie wraz z prędkością skrawania v_c i wartością posuwu f . Wartość posuwu f silniej wpływała na wartości temperatury niż prędkość skrawania v_c . Warunkuje to krótszy czas osiągnięcia ustalonej temperatury na mierzonej powierzchni.

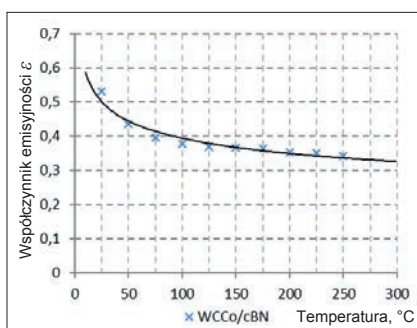
Termowizyjny pomiar temperatury skrawania

Cechą charakterystyczną kamer termowizyjnych jest pośredni pomiar temperatury na podstawie mocy promieniowania podczerwonego padającego na detektor i przekształcenie tego sygnału w torze pomiarowym kamery na będący nośnikiem informacji o temperaturze sygnał elektryczny. Aby pomiar z wykorzystaniem kamery termowizyjnej był prawidłowy, konieczna jest znajomość parametru opisującego właściwości termowizyjne obiektu – emisyjności efektywnej ϵ . Parametr emisyjności zależy od wielu czynników, takich jak: stan warstwy wierzchniej, właściwości refleksyjne czy temperatura. Do pomiaru temperatury ostrza podczas skrawania z użyciem kamery termowizyjnej konieczna była znajomość współczynnika emisyjności zastosowanego ostrza skrawającego. Ten parametr emisyjności wyznaczono w funkcji temperatury za pomocą nagrzewacza laboratoryjnego [7, 8], mającego rozgrzać próbkę i stabilnie utrzymać zadaną temperaturę na jej powierzchni (rys. 6). Temperaturę ostrza skrawającego zmierzono w tym samym punkcie narzędzia (w tej samej odległości od naroża ostrza) co w przypadku metody kontaktowej.



Rys. 6. Stanowisko do wyznaczania współczynnika emisyjności

Współczynnik emisyjności ε wprowadzony do układu kamery dla badanego ostrza odczytano i przyjęto z uzyskanej charakterystyki (rys. 7) w przedziale odpowiadającym pomiarom stykowym temperatury z wykorzystaniem termoelementu.

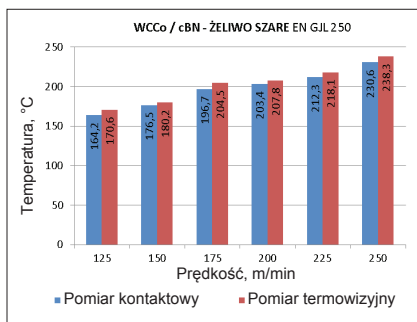


Rys. 7. Krzywa określająca współczynnik emisyjności w funkcji temperatury dla powierzchni ostrza wykonanego z WCCo/cBN

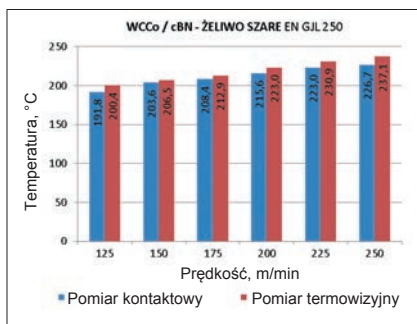
Analiza wyników – porównanie metod

Wyniki uzyskane metodą kontaktową (referencyjną) porównano z pomiarami radiacyjnymi. Zaprezentowano to w postaci wykresów (rys. 8 i 9).

Wartości temperatury zmierzonej metodą termowizyjną – podobnie jak metodą kontaktową – są ze sobą koherentne i rosną wraz ze wzrostem prędkości skrawania v_c i wartości posuwu f . Zaletą metody wykorzystującej kamerę termowizyjną jest możliwość obserwacji rozkładu ciepła na całej powierzchni mierzonego elementu, co nie



Rys. 8. Zestawienie porównawcze maksymalnej temperatury w czasie w procesie skrawania dla różnych parametrów prędkości skrawania v_c przy posuwie $f = 0,06$ mm/obr



Rys. 9. Zestawienie porównawcze maksymalnej temperatury w czasie w procesie skrawania dla różnych parametrów prędkości skrawania v_c przy posuwie $f = 0,1$ mm/obr

jest możliwe przy pomiarach kontaktowych. Pomiar termowizyjny eliminuje także zjawisko związane z konwekcją oraz pojemnością i bezwładnością cieplną czujników pomiarowych. Wadą metody termowizyjnej jest konieczność znajomości współczynnika emisyjności badanego materiału w zakresie temperatury, w jakim dokonywany będzie zasadniczy pomiar.

Dokładny pomiar temperatury z wykorzystaniem kamery termowizyjnej nie jest możliwy w przypadku materiałów refleksyjnych. Metoda ta jest wrażliwa na zakłócenia m.in. przez wióry dostające się w pole widzenia kamery. Pomiar z wykorzystaniem termoelementu cechuje się mniejszymi zakłóceniami. Sonda pomiarowa umieszczona jest wewnątrz badanego obiektu i jest odizolowana od zakłócających czynników zewnętrznych. Wadą tej metody jest możliwość pomiaru tylko w jednym punkcie oraz konieczność zapewnienia styku z elementem badanym [9].

Wnioski

Badania pozwoliły wyznaczyć temperaturę ostrza w punkcie pomiarowym w trakcie skrawania za pomocą dwóch niezależnych metod. Obiema metodami uzyskano zbieżne wartości temperatury, a największa różnica przy wyszczególnionych parametrach obróbki nie przekroczyła 11°C . Należy zwrócić uwagę, że metodą termowizyjną można uzyskać więcej danych pomiarowych, ale bardziej niż metoda kontaktowa jest ona wrażliwa na zakłócenia, przez co jej zastosowanie jest znacząco ograniczone.

Otrzymane wyniki mogą posłużyć do oceny temperatury, w której pracuje narzędzie podczas procesu skrawania przy różnych parametrach obróbki, i pomóc w optymalizacji procesu skrawania z jednoczesnym zachowaniem trwałości narzędzia. Przebieg temperatury skrawania podczas zagłębiania ostrza w materiał daje ważną informację dotyczącą szybkości nagrzewania i studzenia narzędzia oraz maksymalnej temperatury ostrza skrawającego występującej w punkcie pomiarowym w trakcie procesu obróbki. Korelacja temperatury z parametrami skrawania, połączona z kompleksowymi badaniami zużycia ostrza, może pozwolić wnioskować na temat procesów zużycia zachodzących podczas pracy i doboru optymalnych parametrów skrawania wydłużających czas pracy narzędzia wykonanego z materiałów kompozytowych.

LITERATURA

1. Ay H., Yang W.J. „Heat transfer and life of metal cutting tools in turning”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 41, 3 (1998): s. 613–623.
2. Ueda T., Al Huda M., Yamada K., Nakayama K., Kudo H. „Temperature measurement of CBN tool in turning of high hardness steel”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 48, 1 (1999): s. 63–66.
3. Huo J., Zhao N., Zhu S. „Influence of cutting speed on flank temperature during face milling of magnesium alloy”. *Materials and Manufacturing Processes*. 26, 8 (2010): s. 1059–1063.
4. Su Y., He N., Li L., Li X.L. „An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V”. *Wear*. 261, 7–8 (2006): s. 760–766.
5. <http://www.flir.com/instruments/display/?id=62960> (dostęp: 15.10.2016).
6. Wojciechowski S., Nowakowski Z., Talar R. „Ocena zjawisk fizycznych w procesie toczenia żeliwa sferoidalnego ostrzami z kompozytu WCCo/cBN”. *Mechanik*. 12 (2015): s. 916–919.
7. Walach T. „Emissivity measurements on electronic microcircuits”. *Measurement*. 41 (2008): s. 503–515.
8. Grochalski K. „Konstrukcja i sterowanie nagrzewacza laboratoryjnego do wyznaczania współczynnika emisyjności”. *Mechanik*. 11 (2016): s. 1582–1583.
9. Struzinkiewicz G. „Analiza poprawności pomiaru temperatury w strefie skrawania w procesie toczenia stali 4H13”. *Inżynieria Maszyn*. 18, 4 (2013).