

Otrzymano: 12 marca 2018 / Zaakceptowano: 20 kwietnia 2018 / Zamieszczono na WWW: 20 grudnia 2018

*monitorowanie procesu wiercenia,
pomiar temperatury,
pirometria, termowizja*

Krzysztof LIS^{1*}

IDENTYFIKACJA POLA TEMPERATUR W STREFIE SKRAWANIA PODCZAS WIERCENIA Z ZASTOSOWANIEM METOD PIROMETRYCZNYCH

Artykuł przedstawia koncepcję pomiarów oraz wyniki badań mających na celu identyfikację pola temperatur w strefie skrawania podczas procesu wiercenia, wykorzystując nowoczesne termowizyjne techniki pomiarów temperatury. Skupiono się na metodzie nieingerującej w proces skrawania, kierując się kryterium możliwości wykorzystania jej w systemie monitorowania temperatury procesu wiercenia.

1. WPROWADZENIE

Temperatura skrawania to bardzo ważny czynnik wpływający zarówno na właściwości fizyczne materiału skrawanego jak i materiału narzędzia. Zjawiska cieplne występujące w strefie skrawania, a przede wszystkim temperatura ostrza, wpływają zdecydowanie na trwałość narzędzia, a w efekcie na koszt i wydajność obróbki [1]. Rozwój techniki w dziedzinie pomiarów temperatury metodami bezkontaktowymi, które bazują na energii promieniowania cieplnego emitowanego przez wszystkie ciała o temperaturze wyższej od temperatury zera absolutnego [2], sugeruje możliwość stosowania tych metod do identyfikacji pola temperatur w procesie skrawania [1, 3].

Proces wiercenia ze względu na zjawiska występujące w strefie skrawania jest bardzo złożony. Brak bezpośredniego dostępu do strefy skrawania utrudnia realizowanie pomiaru temperatury. Cechy wynikające z charakterystyki metod pirometrycznych sugerują możliwość stosowania ich do monitorowania, a co za tym idzie również do nadzorowania procesu wiercenia. Ciepło skrawania stanowiło od dawna przedmiot badań naukowców. Analizowano jego bilans w odniesieniu do składników skrawania [2, 4], wpływ temperatury na trwałość ostrza [1], wpływ parametrów skrawania na temperaturę [5]. Pomijając eksperymentalne metody stykowe, pierwsze badania temperaturowe procesu skrawania stanowiące załączek obrazu termicznego bazowały na zastosowaniu farby termometrycznej, która zmieniała barwę pod wpływem temperatury [6, 7]. Informację o występującym rozkładzie temperatur uzyskiwano też na podstawie nadtopienia powłoki o znanej temperaturze topnienia [8].

¹ Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice,

* E-mail: krzysztof.lis@polsl.pl

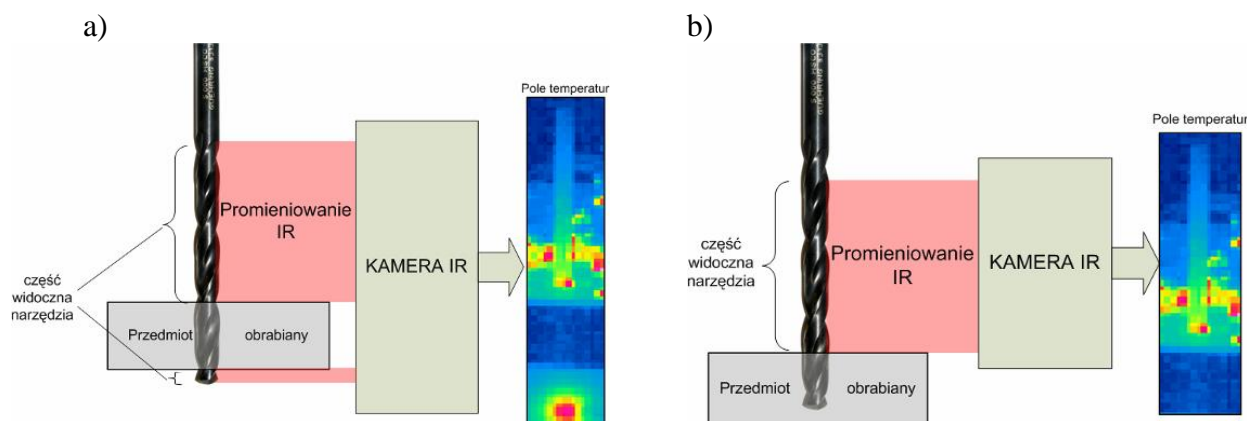
Badano również rozkład temperatury wzdłuż krawędzi skrawającej [9]. Metoda bazująca na pomiarze temperatury na podstawie promieniowania temperaturowego została po raz pierwszy opracowana przez Schwerda [10] i Kraemera [11]. Różne metody dążące do określenia temperatury składników procesu lub strefy ich kontaktu przedstawiono w [12–22]. Prekursorem stosowania fotografii IR do pomiarów temperatury strefy skrawania był Boothroyd [23, 24], a termowizji Dews i inni [25–29]. Były też próby zastosowania metod IR do pomiarów podczas wiercenia [27]. Przedstawiona w artykule koncepcja dotyczy natomiast systemu monitorowania bazującego na pomiarze IR metodą „in situ”, w trakcie naturalnie przebiegającego procesu, nie ingerując w jego mechanikę.

2. KONCEPCJA POMIARÓW ORAZ SYSTEMU MONITOROWANIA

Metoda monitorowania temperatury narzędzia w sposób nieingerujący w proces skrawania, w przypadku, gdy dostęp do strefy skrawania jest utrudniony (jak to jest w przypadku wiercenia) opiera się na wykorzystaniu poszczególnych składników procesu skrawania (narzędzia, przedmiotu obrabianego i wióra) jako czujnika. Ciepło to jest przyczyną powstawania w strefie skrawania określonego rozkładu temperatur.

System monitorowania nie powinien ingerować w sam proces skrawania. Ze względu na częstą wymianę narzędzia, implementowanie czujnika do narzędzia, z ekonomicznego punktu widzenia nie jest korzystne. Proponowana, więc koncepcja systemu monitorowania wykorzystuje pomiar bezstykowy temperatury.

Pomiarem temperatury przy pomocy urządzeń pirometrycznych objęty ma być obszar narzędzia, „widoczny” dla tych urządzeń. W przypadku wiercenia otworów przelotowych jest to ta część wiertła, która nie bierze w danej chwili udziału w procesie skrawania i przez to jest cały czas „widoczna” oraz wierzchołek wiertła, który jest „widziany” tylko w chwili wyjścia narzędzia z wywierconego otworu (rys. 1a). Podczas wiercenia otworów nieprzelotowych „widoczna” jest jedynie część wiertła niebiorąca udziału w procesie wiercenia (rys. 1b).

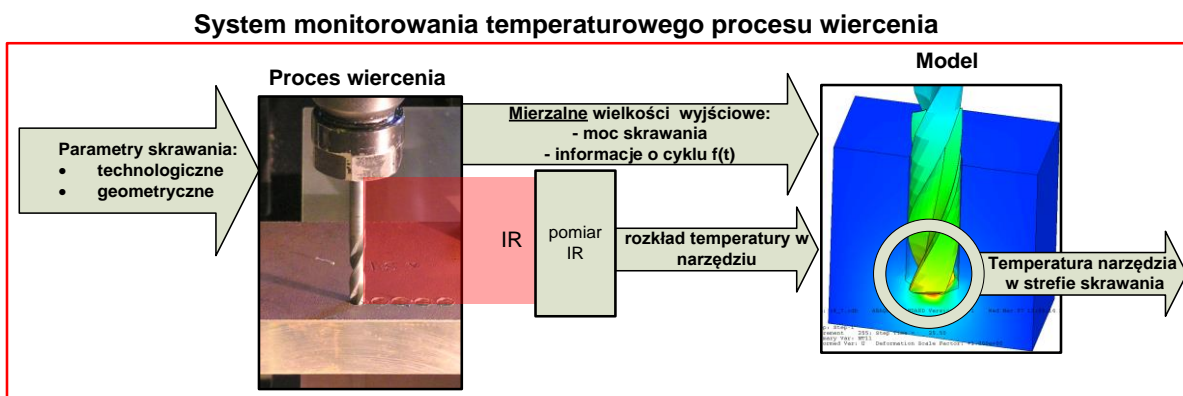


Rys. 1. Koncepcja pomiaru pirometrycznego temperatury narzędzia podczas wiercenia dla: a) wiercenia przelotowego, b) wiercenia nieprzelotowego

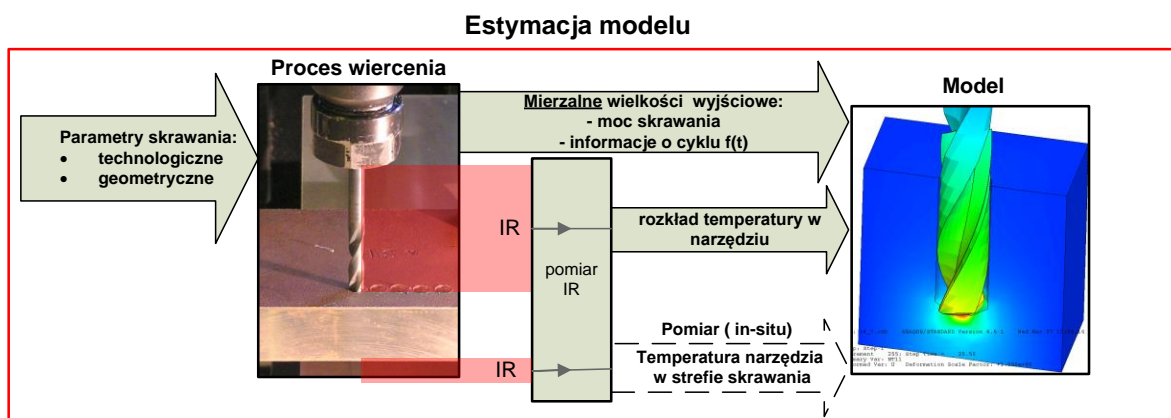
Fig. 1. Concept of tool temperature measuring using the pyrometric method for: a) through drilling, b) no through drilling

Identyfikacja temperatury w strefie skrawania odbywa się na podstawie modelu (off-line), wykorzystującego uzyskane z pomiarów pirometrycznych informacje o temperaturze w części narzędzia będącej poza strefą skrawania. W przedstawionej koncepcji systemu wykorzystano model MES rozptyłu ciepła w procesie skrawania.

Na rys. 2 przedstawiono schemat systemu monitorowania temperaturowego procesu wiercenia wyjaśniający przedstawioną koncepcję. Wartość temperatury w strefie skrawania jest obliczana na podstawie modelu, w tym przypadku jest to model nieustalonego rozptyłu ciepła w konwencji MES. Wielkościami wejściowymi (warunkami brzegowymi) symulacji są wartości temperatury narzędzia w części „widocznej” dla urządzeń pirometrycznych. Ponadto dodatkowymi informacjami są: informacja o cyklu pracy maszyny oraz moc skrawania określana na podstawie pomiaru oporów skrawania. Informacje o cyklu pracy maszyny dostępne są w postaci programu pracy obrabiarki sterowanej numerycznie. Informację o oporach skrawania, a w zasadzie o momencie skrawania, można uzyskać: w warunkach eksperymentalnych wykorzystując siłomierz wiertarski, a w warunkach aplikacji systemu, czyli normalnej pracy maszyny na przykład ze sterownika napędu głównego.



Rys. 2. Koncepcja systemu monitorowania temperaturowego procesu wiercenia
Fig. 2. Concept of temperature monitoring system during the drilling



Rys. 3. Koncepcja sposobu estymacji parametrów modelu wykorzystywanego w systemie
Fig. 3. Concept of model parameter estimation using in monitoring system

Należy zaznaczyć, iż w przedstawionej koncepcji systemu, pomiar pirometryczny może być realizowany w sposób punktowy, linowy lub dwuwymiarowy. Na schemacie z rys. 2 informacja z pomiaru pirometrycznego jest oznaczona jako „rozkład temperatury w narzędziu”.

Działanie systemu ma bazować na jednoczesnym pomiarze wspomnianych parametrów i prowadzeniu badań symulacyjnych modelowych. Połączenie tych dwóch narzędzi badawczych ma dać informację o temperaturze w strefie skrawania. Jednym z problemów jest model cieplny oraz identyfikacja jego parametrów. Rysunek 3 przedstawia sposób estymacji parametrów takiego modelu.

Pomiar temperatury narzędzia, w celu weryfikacji temperatury w strefie skrawania, przeprowadzono podczas wyjścia wiertła z otworu, przy założeniu, że otwory są wiercone przelotowo (pomiar „in-situ” na rys. 3). Dla maksymalnej temperatury uzyskanej z pomiaru „in-situ” przeprowadzono estymację parametrów modelu.

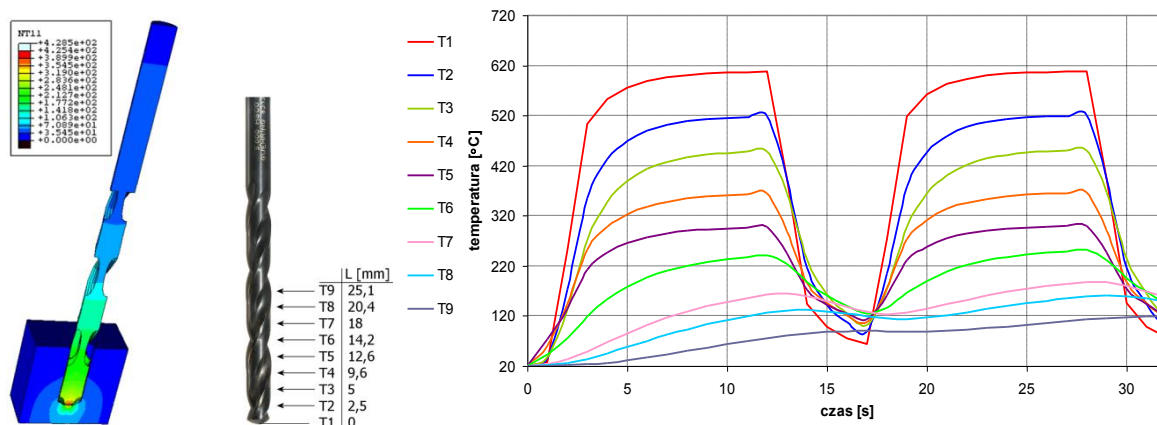
3. BADANIA MODELOWE

Założenia koncepcji z rys. 3 wymagają opracowania modelu numerycznego, który może bazować między innymi na metodach sztucznej inteligencji realizowanych w pracy [30] lub na metodzie elementów skończonych. Badania bazujące na mechanizmie tworzenia wióra realizowano między innymi w pracy [31] uzyskując dużą zgodność pomiędzy eksperymentem a modelem numerycznym. Takie rozwiązanie nie nadaje się jednak do symulowania w czasie rzeczywistym, dlatego w dalszej części artykułu przedstawiono metodykę badań rozplywu ciepła w stanie nieustalonym w środowisku MES ABAQUS przy użyciu modułu STANDARD. Nie skupiano się na mechanice procesu skrawania, a ilość ciepła wynikała jedynie z mocy skrawania, którą szacowano na podstawie badań eksperymentalnych. Wykorzystywano do tego celu piezoelektryczny siłomierz wiertarski siły osiowej i momentu firmy Kistler. Badania modelowe przeprowadzono wykorzystując sparametryzowany model opracowany dla wiertel o średnicach 5 mm, 8 mm, 10 mm, 13,5 mm.

Wymuszenie cieplne zadawano w cyklach czasowych odpowiadających wierceniu poszczególnych otworów zgodnie z cyklogramem wykorzystanym w badaniach przeprowadzanych na obrabiarce CNC. Konwekcyjne warunki brzegowe zmieniały się w funkcji różnicy temperatur pomiędzy temperaturą otoczenia i temperaturą powierzchni wiertła. Wyznaczono je na podstawie zależności empirycznych [32]. Ciepłe warunki brzegowe odpowiadające składnikom procesu skrawania (wiór, przedmiotem obrabiany i narzędzie) opisano przy pomocy odpowiadających im współczynników przejmowania ciepła na drodze konwekcji i radiacji. W miejscach kontaktu poszczególnych elementów, czyli w miejscach opisanych przez warunki brzegowe IV rodzaju posłużono się kontaktowymi współczynnikami wnikania ciepła. Na powierzchniach bocznych przedmiotu obrabianego przyjęto warunki brzegowe I rodzaju w postaci stałej temperatury równej uśrednionej temperaturze powierzchni bocznych przedmiotu obrabianego wyznaczonej podczas prób eksperymentalnych. Na powierzchnie górną i dolną materiału nałożono

warunki brzegowe III rodzaju w postaci konwekcji swobodnej zależnej od różnicy temperatur: powierzchni i otoczenia.

Wyniki badań symulacyjnych w postaci przebiegów temperatury poszczególnych punktów narzędzia przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Wyniki badań symulacyjnych rozkładu temperatury uzyskanych w badaniach symulacyjnych dla wiertła o średnicy 5 mm oraz parametrów: $V_c=23$ m/min i $f=0,1$ mm/obr w kilku charakterystycznych punktach narzędzia, znajdujących się w jego osi dla różnych odległości L od wierzchołka wiertła.

Fig. 4. Time curve of the temperature measured for several points located on the tool's axis.

4. WERYFIKACYJNE BADANIA EKSPERYMENTALNE

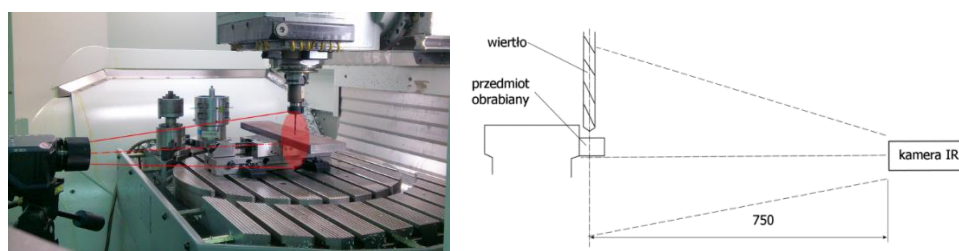
Aby ocenić jakość modelu numerycznego przedstawionego wcześniej, przeprowadzono badania eksperymentalne skupiając się na temperaturze występującej na wylocie wiertła z otworu, przy założeniu, że otwory są wiercone przelotowo (pomiar „in-situ” rys. 3).

Istotnym jest fakt, że eksploatacyjne stosowanie systemu (rys. 3) nie wymaga wiercenia otworów przelotowych. Taki sposób wiercenia konieczny jest jedynie na etapie estymacji parametrów modelu oraz weryfikacji działania systemu, co wykorzystano w niniejszych badaniach. Sparametryzowane zostały warunki brzegowe odnoszące się do mocy skrawania. Zmiennymi były również warunki przeprowadzenia symulacji bazujące na cyklach pracy. Dobierano je na podstawie poszczególnych cyklogramów czasowych pracy obrabiarki.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na frezarce DMU 60 monoBLOCK. W badaniach do realizacji pomiarów termowizyjnych użyto kamery termowizyjnej dalekiej podczerwieni V50 firmy Vigo. Konfigurację stanowiska przedstawiono na rys. 5.

Badania przeprowadzono w oparciu o plan zdeterminowany obejmujący cztery parametry: posuw, prędkość skrawania, średnicę wiertła i pokrycie narzędzi. Celem przyjęcia takiego typu planu badań było wykazanie wpływu poszczególnych parametrów na pole temperatur, a szczególnie temperaturę maksymalną narzędzia w procesie skrawania. Na podstawie katalogu producenta zastosowanych narzędzi [33] oraz wstępnych prób

przeprowadzonych dla zastosowanych wiertel zastosowano prędkości 16 i 28 m/min dla zakresu posuwów nr 4 i nr 5 [33].

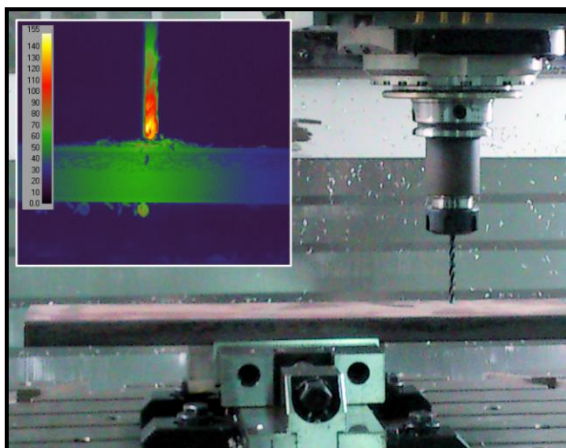


Rys. 5. Widok oraz schemat stanowiska do pomiarów termowizyjnych w procesie wiercenia
Fig. 5. The diagram and the view of the work stand

W tabeli 1, zawierającej wyniki badań, przedstawiony jest również plan badań eksperymentalnych. Zestawienie obrazu w zakresie widzialnym i zakresie podczerwieni dla wiertła o średnicy 5 mm po wywierceniu jednego otworu przedstawiono na rys. 6. Rejestracja sekwencji odbywała się dla kompensatora emisyjności równej 1. Korekcje emisyjności realizowano – programowo – podczas analizy wyników w opracowanym w środowisku LabVIEW przedstawionym w [34].

Tabela 1. Wyniki pomiarów T_r
Table 1. Measuring results T_r

Typ pokrycia wiertła	Śred. wiertła D [mm]	Prędkość posuwu f [mm/obr]	Prędkość skrawania V_c [m/min]	T_r dla poszczególnych otworów [°C]					T_r śred. [°C]	STD T_r [°C]	$T_{rEO,965}$ śred. [°C]	STD $T_{rEO,965}$ [°C]
				1	2	3	4	5				
Kod posuwu numer 4			V_c 23 m/min									
czernione	5	0,08	28	301,3	296,3	288,7	307,2	306,0	299,9	7,6	307,6	7,8
czernione	8	0,125	28	326,8	364,5	345,2	358,1	346,1	348,1	14,5	357,2	14,9
czernione	10	0,16	28	396,0	435,0	442,7	441,4	444,0	431,8	20,3	443,2	20,9
czernione	13	0,16	28	364,0	383,5	399,9	397,3	449,7	398,9	31,8	409,4	32,7
Kod posuwu numer 5												
czernione	5	0,1	28	317,3	306,4	339,9	340,9	333,9	327,7	15,2	336,2	15,6
czernione	8	0,16	28	404,5	374,0	391,9	394,6	397,7	392,5	11,4	402,9	11,7
czernione	10	0,2	28	432,1	454,4	466,3	468,2	469,5	458,1	15,7	470,3	16,2
czernione	13	0,2	28	395,7	407,6	393,9	398,3	413,0	401,7	8,2	412,3	8,4
Kod posuwu numer 4			V_c 16 m/min									
czernione	5	0,08	16	240,9	249,5	234,8	288,8	267,8	256,4	22,0	262,9	22,6
czernione	8	0,125	16	269,4	288,6	294,0	310,3	312,1	294,9	17,5	302,5	18,0
czernione	10	0,16	16	311,9	362,5	237,3	349,8	348,1	321,9	50,9	330,3	52,4
czernione	13	0,16	16	373,5	358,9	387,9	391,3	387,3	379,8	13,5	389,8	13,9
Kod posuwu numer 5												
czernione	5	0,1	16	285,6	294,5	303,8	285,1	317,3	297,2	13,5	304,9	13,9
czernione	8	0,16	16	318,2	342,2	358,9	352,6	358,9	346,2	17,0	355,2	17,5
czernione	10	0,2	16	350,7	378,1	352,4	298,4	386,2	353,2	34,3	362,4	35,3
czernione	13	0,2	16	391,3	396,2	250,1	420,4	423,8	376,4	72,0	386,2	74,0

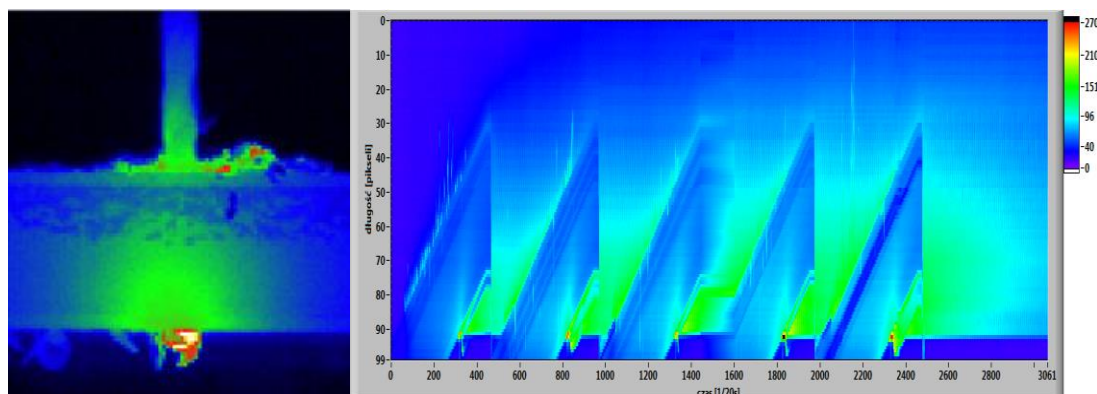


Rys. 6. Zestawienie obrazu w zakresie widzialnym i zakresie podczerwieni dla wiertła o średnicy $D = 5$ mm po wywierceniu jednego otworu

Fig. 6. Image within the visible range and infra-red range for a frame obtained during the research

Obrazy termograficzne zapisane zostały w postaci macierzy dwuwymiarowych, zawierających wartości temperatur dla poszczególnych punktów. Poszczególne macierze odpowiadają sekwencjom czasowym o okresie próbkowania 50 ms (częstotliwość pracy kamery wynosiła 20 Hz). Następnie przekształcono je w termogramy 1D przedstawiające zmianę temperatury wzdłuż osi wiertła w czasie (rys. 7).

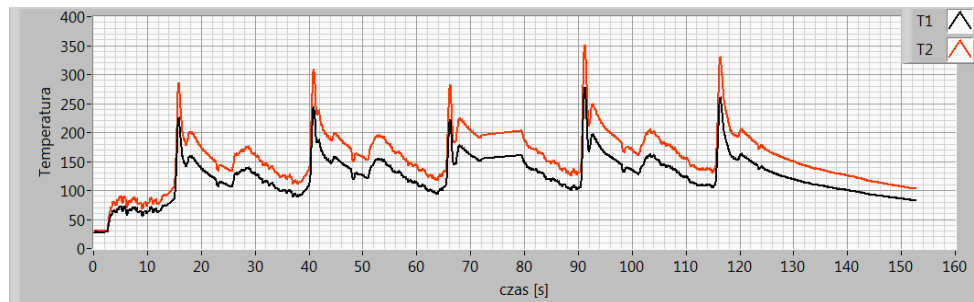
Aby uzyskać rzeczywistą wartość temperatury poszczególnych jednorodnych obszarów cechujących się jednorodną emisyjnością, zrealizowano programową korekcję emisyjności, przyjmując zmierzoną podczas badań temperaturę otoczenia równą 21°C oraz emisyjność nastawioną podczas pomiaru $\varepsilon = 1$. Emisyjność rzeczywistą przyjęto jako emisyjność wiertła wyznaczoną w osobnych badaniach. Analizowano maksymalne wartości temperatury T_r z obszaru znajdującego się pod przedmiotem obrabianym i przedstawiono je w funkcji czasu $T_r = f(t)$ (rys. 8).



Rys. 7. Rozkład temperatur 2D oraz 1D wzdłuż osi wiertła w czasie analizowanej macierzy temperatur dla wiertła o średnicy $D = 5$ mm i parametrów $V_c = 16\text{m/min}$ oraz posuwu nr 4 ($f = 0,1$ mm/obr)

Fig. 7. Within the visible range and within IR range of the drill while it is getting through the workpiece and the linear distribution of the temperature of the drill's axis as presented in the time function

Wyniki pomiarów T_r dla poszczególnych otworów i różnych parametrów skrawania przedstawiono w tabeli 1. Zamieszczono w niej również podstawowe statystyki pomiarów. Tabela zawiera wyniki pomiarów temperatury T_r nieskorygowanej (dla $\varepsilon = 1$) i skorygowanej $T_{rE0,965}$ (dla $\varepsilon = 0,965$), oraz ich wartości średnie. Dokonano porównania badań modelowych i symulacyjnych. Temperatury odnoszą się do chwili wyjścia narzędzia z przedmiotu obrabianego.



Rys. 8. Zależność temperatury T_r w funkcji czasu dla wiertła o średnicy $D = 5$ mm i parametrów $V_c = 16$ m/min oraz posuwu nr 4 ($f = 0,1$ mm/obr); T2 – temperatura dla $\varepsilon = 1$; T1 – temperatura dla emisyjności skorygowanej $\varepsilon = 0,68$
Fig. 8. Temperature curves in the time function $T_r = f(t)$ during the drilling two holes: T1 – temperature for $\varepsilon = 1$, T2 – temperature for $\varepsilon = 0,68$

Tabela 2. Porównanie badań modelowych z badaniami eksperymentalnymi
Table 2. FEM and experimental research result comparison

Typ pokrycia wiertła	Średnica wiertła D [mm]	Posuw f [mm/obr]	Prędkość skrawania V_c [m/min]	$T_{rE0,965}$ [°C]	T_{MES} [°C]	błąd ΔT [K]	błąd $\Delta T\%$ %	
Kod posuwu wg Guhring'a: numer 4								
czernione	5	0,08	28	299,9	432,9	103,2	34,4	
czernione	8	0,125	28	348,1	412,6	12,3	3,5	
czernione	10	0,16	28	431,8	483,2	0,3	0,1	
czernione	13	0,16	28	398,9	416,2	2,0	0,5	
Kod posuwu wg Guhring'a: numer 5								
czernione	5	0,1	28	327,7	400,2	87,7	26,8	
czernione	8	0,16	28	392,5	352,1	16,7	4,3	
czernione	10	0,2	28	458,1	354,4	46,8	10,2	
czernione	13	0,2	28	401,7	482,6	83,2	20,7	
Kod posuwu wg Guhring'a: numer 4								
czernione	5	0,08	16	256,4	453,0	146,0	57,0	
czernione	8	0,125	16	294,9	401,8	45,3	15,3	
czernione	10	0,16	16	321,9	374,6	21,2	6,6	
czernione	13	0,16	16	379,8	450,8	22,2	5,8	
Kod posuwu wg Guhring'a: numer 5								
czernione	5	0,1	16	297,2	288,2	5,9	2,0	
czernione	8	0,16	16	346,2	381,0	66,7	19,3	
czernione	10	0,2	16	353,2	371,2	17,9	5,1	
czernione	13	0,2	16	376,4	432,8	42,9	11,4	

Wartość błędu wyrażono procentowo w odniesieniu do wartości uzyskanej z eksperymentu. Oceniając wartość błędu, w 4 przypadkach na 16 analizowanych, przekroczył on poziom 20%. Przeważnie błąd jest większy w przypadkach stosowania wiertel o mniejszej średnicy. Szczegółowe zestawienie błędów przedstawiono w tabeli 2.

5. PODSUMOWANIE

Podsumowując – uzyskany błąd zależny jest od wielu czynników. Na dokładność pomiarów uzyskaną w badaniach eksperymentalnych, wpływ mają: błąd określania współczynnika emisyjności powierzchni i absorpcyjności ścieżki, zakłócenia pomiaru spowodowane procesem skrawania oraz czynnikami zewnętrznymi itp. Ponadto rozbieżności mogą wynikać również z uproszczeń modelowych. W związku z powyższym, błąd na poziomie 20% można traktować jako umiarkowany. Przedstawiona analiza wyników badań wykazała, że korzystniejsze z punktu widzenia zastosowanej metody pomiarów pirometrycznych jest stosowanie wiertel o wysokim współczynniku emisyjności (wiertła czernione), co wpływa na zwiększenie wartości sygnału pomiarowego. Nie jest koniecznym wówczas wzmacnianie sygnału przy pomocy kompensatora emisyjności, a jak wiadomo, każde wzmocnienie sygnału powoduje również wzmocnienie zakłóceń. Większy współczynnik emisyjności powoduje również zmniejszenie współczynnika refleksyjności, a w konsekwencji zmniejszenie zakłóceń pomiaru wywołanych otoczeniem i wiórami.

LITERATURA

- [1] GRZESIK W., 1998, *Podstawy skrawania materiałów metalowych*, WNT, Warszawa.
- [2] MICHALSKI L., ECKENS DORF K., 1986, *Pomiary temperatury*, WNT, Warszawa.
- [3] KOSMOL J., 1996, *Automatyzacja wytwarzania, Monitorowanie ostrza skrawającego*, WNT, Warszawa.
- [4] RJEZNIKOW A.N., 1969, *Tjepłofizika rjezanija – Izdatjelstwo Maszinstrojenije*, Moskwa.
- [5] DMOCHOWSKI J., 1978, *Podstawy obróbki skrawaniem*, WNT, Warszawa.
- [6] BICKEL E., WIDMER W., 1954, *Die Temperaturen an der Werkzeugschneide*, Zurich, Switzerland, Industrielle Organization.
- [7] KATO S., YAMAGUCHI K., WATANABE Y., HIRAIWA Y., 1976, *Measurement of temperature distribution within tool using powders of constant melting point*, Trans. ASME, J. of Engg. for Ind., 108, 607–13.
- [8] WRIGHT P.K., TRENT E.M., 1973, *Metallographic methods of determining temperature gradients in cutting tools*, J. Iron and Steel Inst., 211, 364–88.
- [9] BIERNAWSKI W., 1956, *Teoria obróbki metali skrawaniem*, PWN, Warszawa.
- [10] SCHWERD F., 1933, *Über die Bestimmung des Temperaturfades beim Spanablauf*, Z. VDI 9.
- [11] KRAEMER G., 1936, *Neitrag zur Erkenntnis der beim Drehen auftretenden Temperaturen und deren Messung mit einem Gesamtstrahlungsempfänger*, Dissertation, Hannover.
- [12] REICHENBACH G.S., 1958, *Experimental measurement of metal cutting temperature distribution*, Trans. ASME, 80, 525.
- [13] CHAO B.T., LI H.L., TRIGGER K.J., 1961, *An experimental measurement of metal cutting temperature distribution*, Trans. ASME, 83, 496–504.
- [14] BORNHOEFER R., PAHLITZSCH G., 1965, *Feindrehen von Unlegierten Kohlenstoffstählen mit Keramik Und Hartmetall-Werkzeugen*, Fortschrittberichte VDI Zeitschrift Reihe, 2/4.
- [15] LENZ E., 1963, *Der Einfluss der Schnitttempertur auf die standzeit der keramischen Schneidstoffen*, Maschinenmarkt, 28, 30.

- [16] LENZ E., 1964, *Die Temperaturverteilung an der Spanunterseite in der Kontaktzone Span-Werkzeug*, *Werkstattstechnik*, 54, 60.
- [17] LENZ E., 1966, *Die Temperaturen in der Kontaktzone Span-Werkzeug beim Drehvorgang*, *Annals of CIRP*, 13.
- [18] LENZ E., 1966, *Die Temperaturverteilung in der Kontaktzone Span-Werkzeug beim Drehen von Stahl mit Hartmetall-Werkzeugen*, *Annals of CIRP*, 14.
- [19] FRIEDMAN M.Y., LENZ E., 1971, *Determination of temperature field on upper chip surface*, *Annals of CIRP*, 19, 395–398.
- [20] LENZ E., 1971, *What temperatures do we get*, *SME/CCPA Conference*, MR71-905.
- [21] PRINS O.D., 1971, *The Influence of Wear the Temperature Distribution at the Rake Face*, *Annals of CIRP*, 19, 579–584.
- [22] UEDA T., SATO M., NAKAYAMA K., 1998, *The temperature of a single crystal diamond tool in turning*, *Annals of CIRP*, 47/1, 41–44.
- [23] BOOTHROYD G., 1961, *Photographic techniques for the determination of metal cutting temperatures*, *Brit. J. of Appl. Physics*, 12, 238–242.
- [24] BOOTHROYD G., 1963, *Temperatures in orthogonal metal cutting*, *Proc. I. Mech. E. (Lon)*, 177, 789–810.
- [25] DEWES R.C., NG E., CHUA K.S., NEWTON P.G., ASPINWALL D.K., 1999, *Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel*, *J. Mat. Process. Tech.*, 92–93, 293–301.
- [26] SCHMIDT J., 1999, *Mechanische und thermische Wirkungen beim Drehen gehärteter Stähle*, Dr.-Ing. Dissertation Universität Hannover.
- [27] MERTENS Th., 2002, (DaimlerChrysler Research Centre Ulm, Germany); *Presentation of Experimental Results*; *Materials Week Munich*, Oct. Proceedings.
- [28] DORR J., 2003, *In-situ temperature measurement to determine the machining potential of different tool coatings*, *Surface and Coatings Technology*, 174–175, 389–392.
- [29] SCHMIDT A.O., ROUBIK J.R., 1949, *Distribution of heat generated in drilling*, *Trans. ASME*, 71, 242–245.
- [30] LIS K., CZYSZPAK T., 2012, *Wykorzystanie logiki rozmytej do modelowania temperatury w strefie skrawania podczas wiercenia*; *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn*, 1, Gliwice.
- [31] MIESZCZAK W., LIS K., 2010, *FEM Temperature Modelling in Drilling Process*, *Proceedings of the 14th International Research/Expert Conference – Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, 33–36.
- [32] JUNGnickel G., BUCHMAN K., 1978, *Przekazywanie ciepła w urządzeniach wytwórczych*. WPW, Wrocław.
- [33] Katalog wyrobów firmy GUHRING, 1996, *Precision Cutting Tools*, Standard Ganges 6th Edition.
- [34] LIS K., 2006, *Problem emisyjności w pomiarach pirometrycznych temperatury*, *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn*, Gliwice, 2, 201–212.

FIELD OF TEMPERATURE IN THE CUTTING ZONE IDENTIFICATION DURING THE DRILLING PROCESS USING PYROMETRIC METHOD

The main goal of that article is to show the research result of identification of temperature field in the cutting zone during the drilling process, using a modern thermovision technique. During the research the attention was focused on a method, which directly does not interfere the cutting process. The main criterion of the analysis was the possibility of the utilization of the method in temperature monitoring system of the drilling process.

Keywords: *monitoring of drilling process, temperature measurement, pyrometric metod, thermovision*