

Dr hab. inż. Piotr NIEŚLONY, prof. PO (Politechnika Opolska);
Dr inż. Witold HABRAT (Politechnika Rzeszowska);
mgr inż. Piotr LASKOWSKI (Politechnika Rzeszowska);

METODYKA WYZNACZANIA TEMPERATURY W STREFIE SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA I FREZOWANIA STOPU Ti6Al4V

Streszczenie

Pomiar temperatury w procesach skrawania ma istotne znaczenie ze względu na możliwość wykorzystania tych informacji do analiz i symulacji. Przedstawiono potencjalne zastosowania metody termoelementu naturalnego w pomiarach temperatury skrawania podczas toczenia ostrzami węglukowymi. Opisano przykładowe stanowisko do wzorcowania termopary naturalnej. Omówiono możliwości zastosowania kamery termowizyjnej do pomiaru temperatury skrawania podczas frezowania walcowo-czołowego. Przedstawiono wyniki badań dotyczące analizowanych metod pomiaru temperatury.

Słowa kluczowe: *temperatura w procesie skrawania, metoda termoelementu naturalnego, kamera termowizyjna*

METHODOLOGY OF MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE IN THE CUTTING ZONE DURING TURNING AND MILLING OF TITANIUM ALLOY Ti6Al4V

Abstract

The temperature measurement in machining processes is an important problem due to the using this information for analysis and simulation. The possibilities of application of the natural thermocouple method for temperature measurement during turning with use of carbide insert were described. The exemplary system for calibrate a natural thermocouple was presented. The possibility of using the thermographic camera to measure the cutting temperature during end-milling was presented. The results of research in the field of analyzed methods of temperature measurement were showed.

Keywords: *temperature in cutting zone, natural thermocouple method, thermographic camera*

METODYKA WYZNACZANIA TEMPERATURY W STREFIE SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA I FREZOWANIA STOPU Ti6Al4V

Piotr NIESŁONY¹, Witold HABRAT², Piotr LASKOWSKI³

1. TEMPERATURA W PROCESIE SKRAWANIA

Istnieje wiele sposobów pomiaru temperatury w procesie skrawania. Nie ma jednak ustalonej jednej, optymalnej metody. W zależności od prowadzonych badań oczekuje się możliwości zmierzenia średniej, jak i maksymalnej temperatury na styku wiór-ostrze, jak również rozkładu temperatury na długości kontaktu lub w całym obszarze przepływu ciepła [6,9].

Zasadniczo do pomiaru temperatury w procesie skrawania używa się technik opartych na przewodzeniu, promieniowaniu ciepła i pomiarach metalograficznych.

W układach tych wykorzystuje się między innymi [10]:

- spreparowane, wydrążone ostrza z wkładką z termopary obcej w różnych odmiannach,
- metodę termoelementu naturalnego, gdzie w sposób naturalny powstaje różnica potencjałów na styku dwóch różnych materiałów wióra i ostrza [1,4],
- ostrza ze zintegrowanymi termoparami [2],
- pirometry i kamery termowizyjne [5],
- techniki metalograficzne oparte na znajomości temperatur topnienia cienkich powłok metalicznych nanoszonych na ostrze metodą PVD.

Szybki i wiarygodny pomiar temperatury skrawania nabiera istotnego znaczenia szczególnie w aspekcie wykorzystania tych informacji do monitorowania stanu ostrza.

¹ Politechnika Opolska, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 45-271 Opole, ul. Mikołajczyka 5

² Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji, ul. Powstańców Warszawy 12

³ Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego, ul. Powstańców Warszawy 12

Wymusza to opracowanie prostych i niezawodnych metod pomiaru, możliwych do zaimplementowania na obrabiarkach produkcyjnych. Przykład dwóch technik opartych o metody stykowe i bezstykowe przedstawiono w niniejszym artykule.

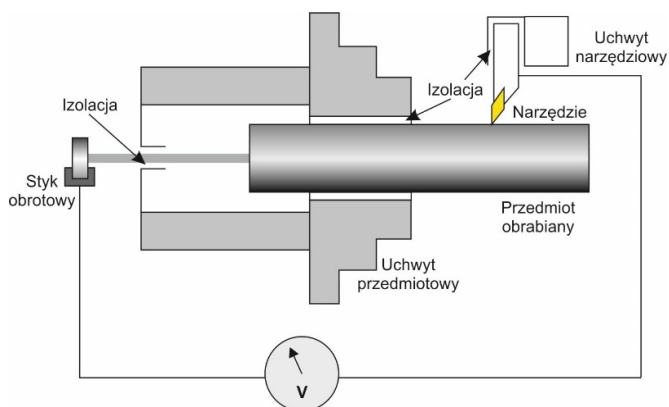
Generalnie metody stykowe pozwalają na wyznaczenie średnich wartości temperatury w strefie skrawania [2,3,10]. Metody bezstykowe oparte na zjawisku promieniowania ciepła pozwalają na wyznaczenie temperatury na powierzchniach przedmiotu, narzędzia i wióra. W tym też przypadku uzyskuje się bądź uśrednione wartości pola temperatury, bądź rozkład temperatury w analizowanym obszarze [7,8]. Z tego też względu coraz częściej w pracach badawczych wykorzystuje się kamery termowizyjne dostarczające termogramów strefy skrawania. Wadą tych metod jest, oprócz kosztownego oprzyrządowania, problem odpowiedniego przygotowania strefy pomiaru, umiejscowienia detektorów oraz konieczność uwzględnienia zmian emisyjności badanych materiałów. Te zagadnienia zostały poruszone w niniejszej publikacji.

2. METODYKA BADAŃ

2.1. POMIAR TEMPERATURY SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA OSTRZAMI WĘGLIKOWYMI

Do pomiaru temperatury w strefie skrawania na styku wiór-ostrze podczas toczenia ostrzami węglukowymi można zastosować stykową metodę termoelementu naturalnego. W metodzie tej termoelement stanowią narzędzie oraz przedmiot obrabiany (wiór). Spojenie gorące (styk) termoelementu naturalnego stanowi powierzchnia styku ostrza narzędzia z materiałem przedmiotu obrabianego. Powstający w tej strefie gradient temperatury sprawia, że całe gorące spojenie można uznać za zbiór niewielkich elementarnych spojeń, dla których występują różne temperatury. Pomiar będzie zatem pewną wypadkową wartością siły termoelektrycznej odpowiadającej temperaturze zawartej w przedziale pomiędzy minimalną i maksymalną temperaturą w obszarze styku narzędzia z przedmiotem obrabianym.

Metoda pomiaru z zastosowaniem termoelementu naturalnego w odniesieniu do obróbki stopu Ti6Al4V wydaje się względnie prosta i praktycznie wymagają tylko izolowania narzędzia (noża tokarskiego) od imaka nożowego oraz przedmiotu obrabianego od uchwytu. Pozostaje jednak kwestia wzorcowania układu pomiarowego, która w przypadku tak trudnych w obróbce materiałów stanowi pewne wyzwanie. W oparciu o powyższe założenia przygotowano stanowisko badawcze do pomiarów temperatury w procesie toczenia stopu Ti6Al4V z użyciem termoelementu naturalnego. Konfigurację toru pomiarowego do pomiaru średniej temperatury styku, bazującego na jednonożowej odmianie metody termoelementu naturalnego pokazano na rys. 1. Pomiary temperatury w toczeniu przeprowadzono na tokarce CNC NEF 600.



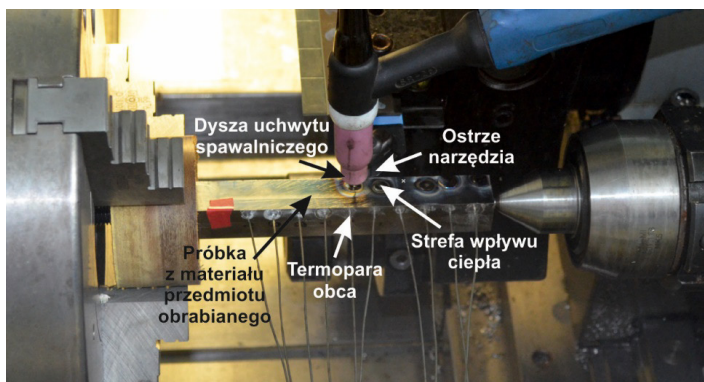
Rys. 1. Schemat stanowiska badań do pomiaru średniej temperatury skrawania metodą termoelementu naturalnego podczas toczenia

Metoda termoelementu naturalnego stwarza pewne trudności w zakresie wzorcowania, gdyż wnosi błędy w ocenie temperatury spowodowane różnicami się warunkami wzorcowania i pracy termoelementu naturalnego. Pomiar temperatury przeprowadza się zazwyczaj w warunkach wzajemnego ruchu i tarcia w miejscu gorącego spojenia (styku), a wzorcowanie odbywa się przy zetknięciu tych samych materiałów w stanie spoczynku. Utrudnieniem, w stosowaniu metody jednonarzędziowego termoelementu naturalnego, jest również konieczność każdorazowego wzorcowania tego układu przy zmianie gatunku lub stanu materiału obrabianego, względnie materiału narzędzia. Ze względu na specyfikę przyjętej metody pomiarowej konieczne było wzorcowanie toru pomiarowego dla każdej pary materiał obrabiany/materiał ostrza narzędzia. Przed przystąpieniem do pomiarów przeprowadzono wzorcowanie toru do pomiaru średniej temperatury kontaktu. Wzorcowanie termopar ostrze-materiał obrabiany przeprowadzono na tokarce, wykorzystując jako źródło ciepła łuk elektryczny generowany metodą TIG. Rysunek 2 przedstawia widok szczegółowy stanowiska do wzorcowania termopary naturalnej wraz z wyszczególnieniem strefy styku wzorowanych materiałów oraz usytuowania źródła ciepła i termopary obcej.

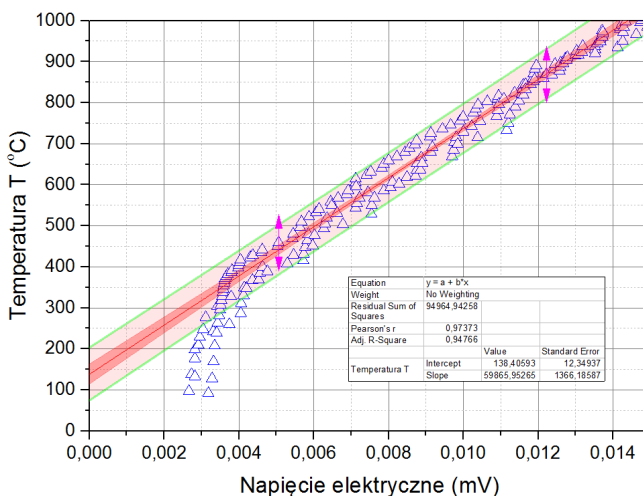
Przykładowo, na podstawie wyników z kilku przebiegów wzorcowania (rys. 3) wyznaczono metodą regresji liniowej współczynniki równania prostej dla analizowanej pary P20/TiAlN – stop Ti6Al4V. Uzyskano zależność liniową następującej postaci:

$$T = 59865,9 \cdot U_{STE} + 138,4 \quad (1)$$

gdzie: T - temperatura w strefie skrawania, °C, U_{STE} – zmierzona wartość siły termoelektrycznej ste w trakcie skrawania, mV.



Rys. 2. Widok szczegółowy stanowiska do wzorcowania termopary naturalnej typu ostrze-materiał obrabiany.

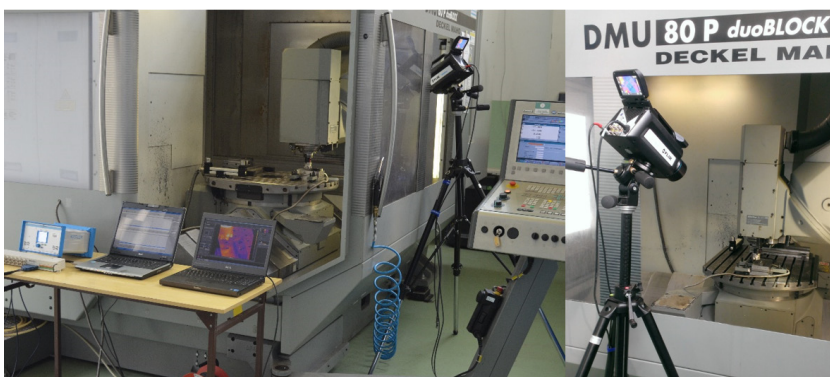


Rys. 3. Określenie zależności pomiędzy temperaturą a napięciem elektrycznym dla pary P20/TiAlN (wkładka CNMG 120412-UP KC5010) – stop Ti6Al4V

Uzyskana zależność pozwala na wyznaczenie wartości temperatury dla zadanych warunków procesu, na podstawie zmierzonej w trakcie pomiaru wartości *ste* (napięcia elektrycznego).

2.2. POMIAR TEMPERATURY SKRAWANIA PODCZAS FREZOWANIA WALCOWO-CZOŁOWEGO

Pomiary temperatury w procesie frezowania przeprowadzono na frezarce CNC DMU 80P duoBLOCK z zastosowaniem kamery termowizyjnej X6540sc firmy FLIR (rys. 4).



Rys. 4. Konfiguracja stanowiska do pomiaru pola temperatury w procesie frezowania z zastosowaniem kamery termowizyjnej X6540sc

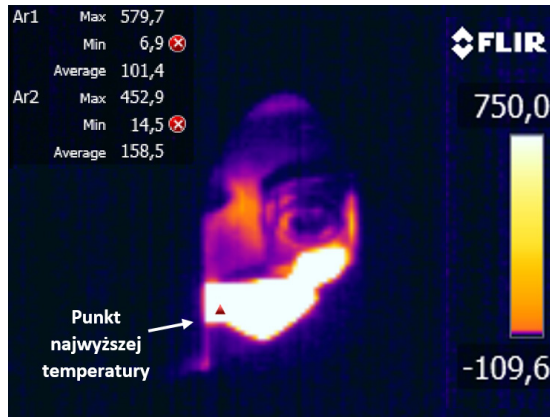
W pomiarach termowizyjnych dokładność pomiaru zależy ściśle od właściwego oszacowania współczynnika emisyjności badanej powierzchni. W literaturze spotkać można różne sposoby wzorcowania torów termowizyjnych [8,11]. W analizowanym przypadku, w celu uzyskania możliwości porównania wyników pomiaru termowizyjnego z pomiarem z zastosowaniem termopary naturalnej (pomiar podczas toczenia), współczynnik emisyjności określono w trakcie toczenia. W tym celu zbudowano układ, który umożliwiał realizację pomiaru metodą termoelementu naturalnego oraz rejestrację pola temperatury kamerą termowizyjną (rys. 5). Wyznaczony za jego pomocą współczynnik emisyjności dla stopu Ti6Al4V ustalono na poziomie 0,48.



Rys. 5. Konfiguracja stanowiska z pomiarem termowizyjnym podczas toczenia

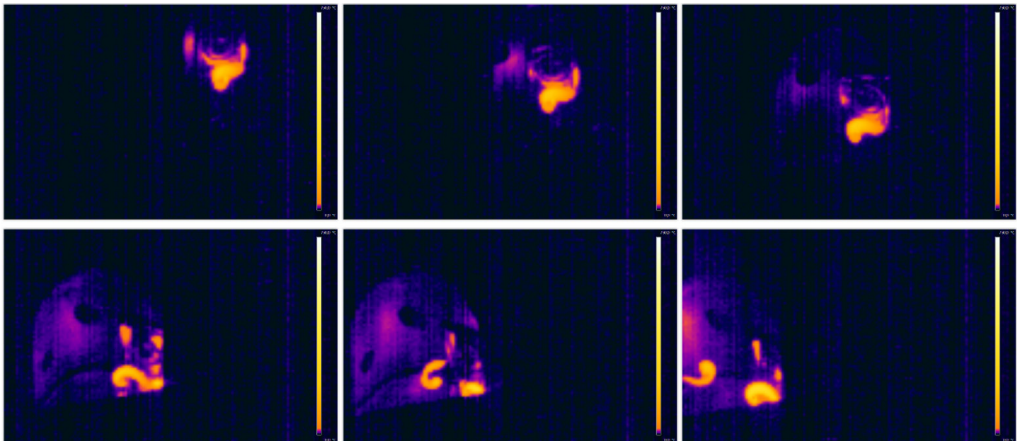
W opisany powyżej sposób zapewniono, w zakresie dokładności pomiaru, uzyskanie wspólnego punktu odniesienia dla pomiarów temperatury podczas toczenia i frezowania. Wiarygodny pomiar termowizyjny pola temperatury w strefie skrawania

wymaga rejestracji sekwencji klatek w trakcie przejścia narzędzia celem identyfikacji punktów o najwyższej temperaturze (rys. 6).



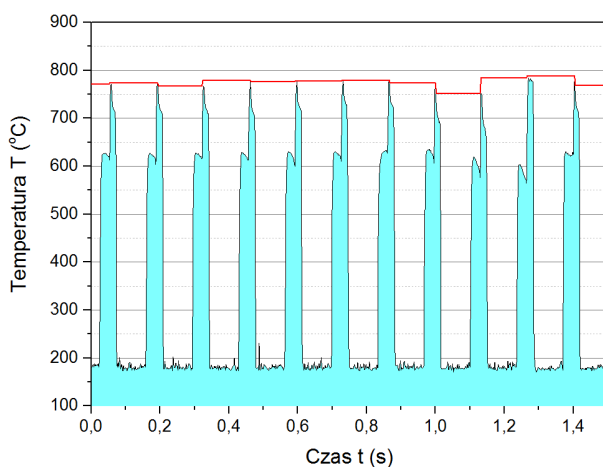
Rys. 6. Przykładowa sekwencja z punktem pomiaru temperatury

W przypadku frezowania konieczna jest analiza całego przedziału czasowego w trakcie jednego przejścia ostrza narzędzia w materiale (rys. 7).



Rys. 7. Wybrane sekwencje pojedynczego przejścia narzędzia w trakcie skrawania

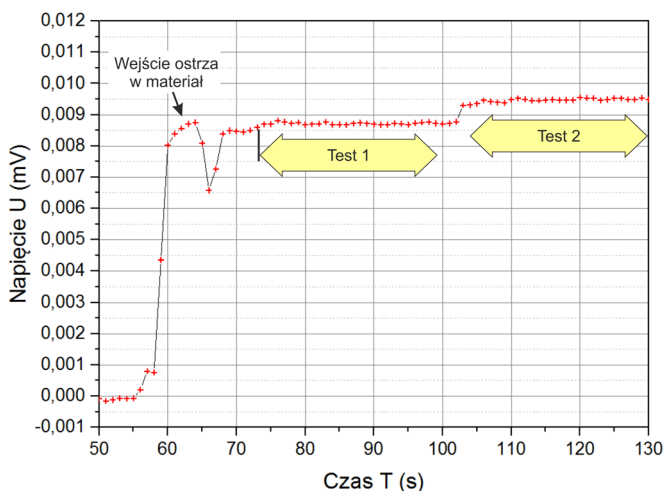
W trakcie pracy narzędzia analizowano temperatury maksymalne dla poszczególnych przejść uśredniając ich wartości. Przykład takiego przebiegu dla frezowania stopu tytanu przedstawiono na rys. 8. Rejestrowany sygnał charakteryzował się dużą powtarzalnością w zakresie wartości temperatur maksymalnych oraz charakteru ich zmian w czasie.



Rys. 8. Wykres charakterystyk zmian maksymalnych, uśrednionych wartości temperatury w strefie skrawania rejestrowanych za pomocą kamery termowizyjnej podczas frezowania stopu Ti6Al4V ($v_c=70$ m/min, $f=0,125$ mm/ostrze, $a_p=1,75$ mm).

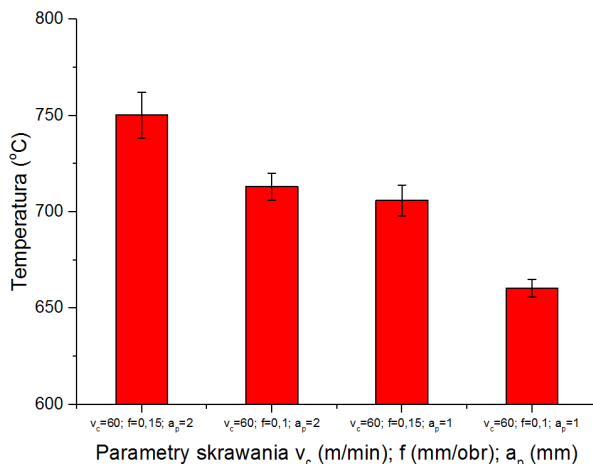
3. WYNIKI BADAŃ

Pomiar temperatury podczas toczenia stopu Ti6Al4V ostrzem węglkowym (przewodzącym sygnał elektryczny) realizowano metoda stykową w oparciu o termoelement naturalny. Podczas toczenia rejestrowano sygnał siły termoelektrycznej *ste*. Charakter zmian tego sygnału w funkcji czasu skrawania przedstawia rys. 9.



Rys. 9. Przebieg sygnału siły termoelektrycznej *ste* podczas toczenia stopu Ti6Al4V ostrzem węglkowym P20/TiAlN. Parametry obróbki: $v_c=60$ m/min, $a_p=1$ mm, Test 1 – $f=0,1$ mm/obr, Test 2 – $f=0,15$ mm/obr.

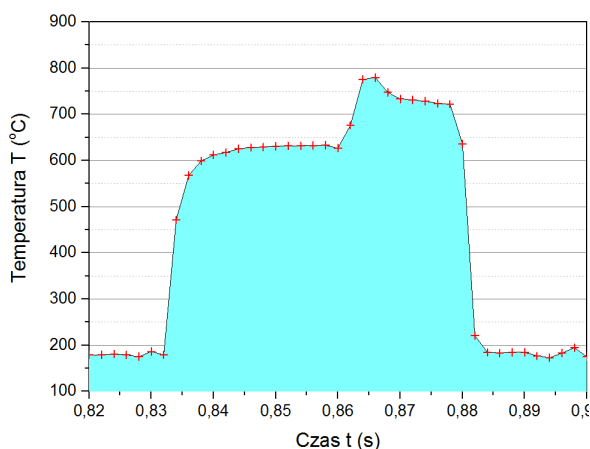
Zaobserwowano, że dla stałych parametrów toczenia uzyskano stabilny sygnał siły *ste*. Maksymalne wartości fluktuacji tego sygnału nie przekraczają 1 %, co przy przeliczeniu na temperaturę daje rozrzut rzędu +/- 4 °C. Dodatkowo czułość tej metody pomiaru temperatury w strefie skrawania w odniesieniu do parametrów obróbki jest bardzo wysoka. Nawet niewielka zmiana posuwu w trakcie procesu skrawania wyraźnie wpływa na przebieg rejestrowanego sygnału *ste*, co przedstawiono na rys. 9. Również inne parametry obróbki oddziałują na rejestrowane wartości temperatury. Ocenę ich wpływu dla przypadku toczenia stopu tytanu ostrzem węglkowym można przeprowadzić porównując wyniki przedstawione na rys. 10.



Rys. 10. Średnie wartości temperatury w strefie skrawania podczas toczenia wstępnego stopu Ti6Al4V przy zmiennym f i a_p .

Ze względu na specyfikę frezowania, głównie brak możliwości łatwego skonfigurowania układu pomiarowego do pomiarów stykowych temperatury skrawania, zaproponowano wykorzystanie odpowiednio skalibrowanej kamery termowizyjnej. Przykładowe termogramy otrzymane podczas frezowania walcowo-czołowego przedstawiono na rys. 8.

Dokonując automatycznej filtracji maksymalnych temperatur w strefie skrawania, a właściwie strefie rejestracji termogramu, otrzymano wartości temperatury dla poszczególnych ostrzy skrawających głowicy narzędziowej. W tym przypadku rodzaj materiału ostrza, a dokładniej jego przewodność elektryczna, nie ma znaczenia. Istotne jest jednak, aby proces odbywał się bez chłodzenia, a kąt ustawienia kamery był dobrany w sposób umożliwiający „patrzenie” na ostrze przy wyjściu z materiału obrabianego. Opracowany, na podstawie termogramów, zapis pojedynczego widma średniej temperatury maksymalnej dla frezowania stopu tytanu ostrzami węglkowymi przedstawia rys. 11.



Rys. 11. Widmo temperatury maksymalnej zarejestrowane kamerą termowizyjną podczas frezowania stopu tytanu ostrzem węglkowym (parametry jak dla rys.8).

Wysoka częstotliwość próbkowania w trakcie pomiaru termowizyjnego (rys. 11 - markery krzyżykowe) umożliwiła wyznaczenia termogramu strefy skrawania w trakcie obróbki pojedynczym ostrzem głowicy frezowej. Istotny wzrost temperatury w strefie przy wyjściu ostrza z materiału obrabianego może być wynikiem nagrzania ostrza podczas obróbki jak i wynikać z faktu zmniejszenia dystansu aktywnej strefy dekohezji do obiektywu (detektora) kamery termowizyjnej. To zjawisko ma powtarzalny charakter (rys. 8), co potwierdza konieczność jego uwzględnienia podczas oceny temperatury skrawania. Średnia różnica w temperaturze skrawania podczas obróbki stopu tytanu ostrzem węglkowym, dla skrajnych położenia ostrza głowicy, wyniosła w badanym przypadku prawie 100 °C. Wyznaczone odchylenie standardowe rejestrowanego sygnału temperatury w pomiarze termowizyjnym nie przekraczało 9 °C

Dodatkowo zaobserwowano, że średnie wartości temperatury skrawania dla toczenia jak i frezowania stopu tytanu, w zakresie odpowiednich paramentów technologicznych i tych samym materiałów ostrza, są porównywalne. Ten fakt może być potwierdzeniem poprawności wykonanych kalibracji torów pomiarowych.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy metodyka wyznaczania temperatury w strefie skrawania podczas toczenia i frezowania stopu Ti6Al4V ma uniwersalny charakter i nadaje się do zastosowania w badaniach laboratoryjnych obróbki skrawaniem innych stopów metali. Skojarzenie metody jednożowej, opartej na zasadzie termoelementu naturalnego, z bezstykowym pomiarem termowizyjnym, skalibrowanym dla ustalonych warunków obróbki, wydaje się dobrym rozwiązaniem. Konieczność dostosowania metody badawczej do warunków obróbki jest znanym faktem, jednak wykazana

zbieżność wyników tych dwóch metod pomiaru temperatury pozwala na porównywanie ich efektów, a tym samym ocenę zjawisk termicznych w badanych procesach obróbkowych.

Dodatkowo wykazano wysoką czułość torów pomiarowych na rejestrowane wartości temperatury dla zmiennych warunków obróbki. Ma to istotne znaczenie w aspekcie optymalizacji procesu obróbkowego. Aktualnie nawet drobne zmiany parametrów technologicznych pozwalają na racjonalizację procesu obróbkowego, a wykazanie ich wpływu na zmiany warunków cieplnych w strefie skrawania ma istotne znaczenie w ocenie termicznej wytrzymałości ostrza, czy ustaleniu oddziaływania ciepła na materiał obrabiany.

PODZIĘKOWANIA

Badania realizowano w ramach Projektu Programu Badań Stosowanych (edycja I), Nr PBS1-178595, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

- [1] BARTOSZUK M., NOWAK A., *Monitorowanie temperatury skrawania*. Pomiar Autom Kontrola, 2014, 16–19.
- [2] BASTI A., OBIKAWA T., SHINOZUKA J., *Tools with built-in thin film thermocouple sensors for monitoring cutting temperature*, 2005, Tehran Int. Congress Manuf. Eng., 1-8.
- [3] CHEN G., REN C., YANG X., *Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) based on ductile failure model*. Int J Adv Manuf Technol 56, 2011, 1027–1038.
- [4] GRZESIK W., *An integrated approach to evaluating the tribo-contact for coated cutting inserts*, Wear, 2000, vol. 240, 9 – 18.
- [5] JASPERS S.P.F.C., DAUTZENBERG J. H., TAMINIAU D. A., *Temperature Measurement in Orthogonal Metal Cutting*, 1998, Int. J Advanced Manufacturing Technology, vol.14, 7-12.
- [6] KHANNA N., GARAY A., IRIARTE LM., *Effect of heat Treatment Conditions on the Machinability of Ti64 and Ti54 M Alloys*. Procedia CIRP 1, 2012, 477–482.
- [7] KITAGAWA T., KUBO A., MAEKAWA K., *Temperature and wear of cutting tools in high speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn*, Wear, 1997, 142–148.
- [8] MÜLLER B., *Thermische analyse des Zerspanens metallischer Werkstoffe bei hohen Schnittgeschwindigkeiten*, 2004, Technische Hochschule Aachen.
- [9] NIEŚLONY P., GRZESIK W., LASKOWSKI P., HABRAT W., *FEM-Based Modelling of the Influence of Thermophysical Properties of Work and Cutting Tool Materials on the Process Performance*, Procedia CIRP 8, 2013, 3-8.
- [10] NIEŚLONY P., *Modelowanie przepływu ciepła i rozkładu temperatury w strefie skrawania dla ostrzy z twardymi powłokami ochronnymi*. Politechnika Opolska 2008, 259.
- [11] STEPHENSON D.A., ALI A., *Tool temperatures in interrupted metal cutting*, J. Eng. Ind., 1992, vol.114, 127–136.