

Marian BARTOSZUK, Andrzej NOWAK

POLITECHNIKA OPOLSKA, KATEDRA TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI PRODUKCJI
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

Monitorowanie temperatury skrawania**Dr inż. Marian BARTOSZUK**

Adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej. Autor i współautor blisko 30 publikacji w czasopiśmie branżowych oraz w materiałach konferencyjnych. Współautor książki na temat programowania obrabiarek NC/CNC. Główne kierunki działalności naukowej to: symulacje komputerowe oddziaływań termicznych w strefie skrawania, programowanie maszyn CNC.



e-mail: m.bartoszuk@po.opole.pl

Dr inż. Andrzej NOWAK

Emerytowany adiunkt Katedry Metaloznawstwa i Technologii Bezwiórowych Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmował się spawalnictwem i regeneracją odlewów, a także badaniami strefy wpływu ciepła, w tym wpływem energii liniowej na rozkład temperatury w złączu spawanym. Autor i współautor kilkudziesięciu publikacji, członek założyciel Polskiego Towarzystwa Spawalniczego, członek Komisji Odlewnictwa PAN o. Katowice oraz Komitetu Metalurgii PAN.



e-mail: nowak.andrzej@o2.pl

Streszczenie

Artykuł niniejszy omawia przykłady praktyczne różnych sposobów monitorowania temperatury skrawania. Omawiane metody badawcze zilustrowano w oparciu o przypadek toczenia ortogonalnego na sucho stali austenitycznej AISI 321 ostrzami węglowymi H10F bez- i z powłokami ochronnymi o różnej konfiguracji warstw. W artykule szczególną uwagę poświęcono metodzie termoelementu naturalnego w odmianie jednożyłowej oraz pomiarom termowizyjnym. W podsumowaniu pokazano zalety i wady omawianych metod pomiaru temperatury skrawania.

Słowa kluczowe: temperatura skrawania, strefa kontaktu, źródło ciepła.

Monitoring of the cutting temperature**Abstract**

The paper discusses practical examples of different ways of monitoring the cutting temperature. These test methods are illustrated based on the case of dry orthogonal turning of AISI 321 austenitic stainless steel by cemented carbide inserts H10F with and without protective coatings of varied layer configurations. In this paper particular attention is paid to the natural thermocouple in single-point cutting. Examples of application of the test method (Figs. 2 and 4) are shown, and measurement chain calibration is discussed (Figs. 5 and 6). Table 3 shows the results of the calibration, i.e. the contact temperature as a function of the thermoelectrical force for selected tribological pairs of the tool-workpiece material. Moreover, the paper deals in detail with the methodology of the infrared imaging of the temperature distribution in the cutting zone. The considerations are based on the temperature distribution analysis on the top of the chip, which is directly in contact with the atmosphere (Fig. 10). Based on the literature data [2, 8] and the results of own research [3] an original method of calibrating the thermal imaging measurement chain was proposed (Fig. 7). This allowed determining the emissivity of the chip surface in settings similar to cutting conditions. In conclusion, there are presented the advantages and disadvantages of the discussed cutting temperature measurement methods by referring them to the literature results and the results of own research.

Keywords: cutting temperature, cutting zone, heat source.

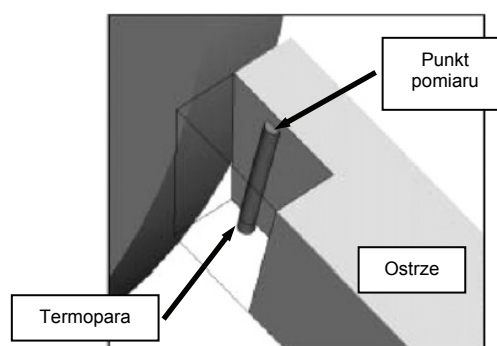
1. Wprowadzenie

Wiele ośrodków naukowych na całym świecie zajmuje się badaniami procesu skrawania. Palcówki te we własnym zakresie badają nowe materiały narzędziowe, wpływ powłok na proces skrawania, proces tworzenia wióra, rozływ ciepła w strefie skrawania czy też skupiają swoje wysiłki na poznaniu zjawisk tribologicznych na długości kontaktu wiór-powierzchnia natarcia. W badaniach szczególnie wiele uwagi poświęca się monitorowaniu temperatury skrawania. Dzieje się tak na skutek tego, że to właśnie temperaturę uważa się za jeden z głównych czynników determinujących zużywanie się ostrza skrawającego.

Koncepcja napisania niniejszego artykułu powstała wskutek doświadczeń uzyskanych po blisko dwudziestoletniej pracy nad badaniami i modelowaniem rozpyłu temperatury podczas skrawania materiałów metalowych.

Powszechnie wiadomo, że ze względu na charakter strefy skrawania, a przede wszystkim małe wymiary i brak możliwości swobodnego dostępu do obszaru kontaktu, pomiar temperatury w najbardziej interesującym dla badaczy obszarze jest bardzo utrudniony. Powoduje to konieczność wyznaczania temperatury skrawania w sposób pośredni, czyli na podstawie zjawisk towarzyszących procesowi skrawania, bezpośrednio związanych ze zjawiskiem generowania i rozpyłu ciepła. Obecnie jako najczęściej stosowane metody pomiaru temperatury w strefie skrawania wymienić należy metodę termo-elementu naturalnego, termoelementu półobcego lub obcego. Metody te zaliczane są do metod opartych na przewodzenia ciepła. Równie chętnie stosowane są techniki bezstykowe, oparte na pomiarze promieniowania podczerwonego [1, 5, 6, 9].

Zastosowanie w badaniach termoelementu obcego lub półobcego umożliwia pomiar niemal punktowy na powierzchniach jak i wewnątrz strefy skrawania. W ostatnim przypadku konieczne jest wykonanie specjalnych otworów technologicznych umożliwiających pomiar temperatury w wybranym punkcie ostrza czy materiału obrabianego (rys. 1) [16, 17, 18].

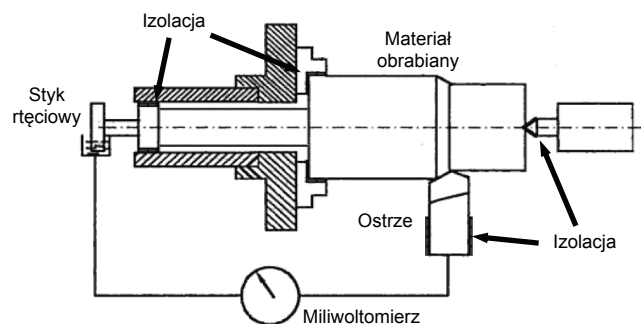


Rys. 1. Przykład umiejscowienia termopary obcej wewnątrz narzędzia, pod powierzchnią natarcia [16]

Fig. 1. An example of the natural thermocouple location inside a tool, beneath the rake face [16]

W praktyce bardzo często stosowana jest jednak metoda termoelementu naturalnego ostrze-materiał obrabiany. O popularności tej metody przesądza jej prostota i skuteczność. Poważną niedogodnością tej metody jest konieczność wzorcowania toru pomiarowego dla każdego zestawu badanych materiałów – materiał obrabiany/ostrze narzędzia. Stanowisko do pomiaru średniej temperatury styku bazujące na jednożyłowej odmianie metody termoelementu naturalnego pokazano na rysunku 2.

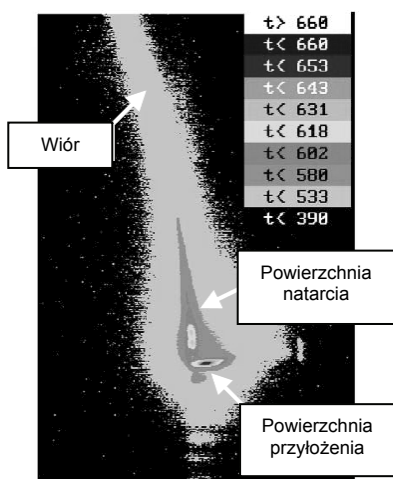
W ostatnich latach w obróbce skrawaniem coraz większą popularność zyskują metody oparte na pomiarze promieniowania podczerwonego. Zauważyć należy, że kiedyś często stosowane pomiary pirometryczne obecnie są w odwrocie. Stało się tak dlatego, że pirometr umożliwia pomiar na pewnym obszarze badanej powierzchni, uśredniając jej wartość [4].



Rys. 2. Schemat stanowiska do pomiaru średniej temperatury skrawania metodą termoelementu naturalnego [14]

Fig. 2. Scheme of the station for measurements of the average cutting temperature by the natural thermocouple method [14]

Ponadto na dokładność pomiaru istotny wpływ wywiera właściwe oszacowanie współczynnika emisyjności powierzchni. Obserwowany w ostatnich latach dynamiczny rozwój optoelektroniki spowodował pojawienie się na rynku kamer termowizyjnych o rozdzielczości spełniającej wymagania związane z pomiarami temperatury w strefie skrawania [7, 8]. Jednak i w tym przypadku dokładność pomiarów uzależniona jest w dużej mierze od prawidłowego oszacowania współczynnika emisyjności badanej powierzchni [7, 8]. Przykładowy obraz termograficzny bocznej powierzchni ostrza i skrawanego ortogonalnie dysku pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Mapa rozkładu temperatury w strefie skrawania wg Rech'a [15]

Fig. 3. Temperature field in the cutting zone by Rech [15]

W pracy została przedstawiona koncepcja prowadzenia pomiarów średniej temperatury kontaktu wiór/powierzchnia natarcia metodą termoelementu naturalnego w odmianie jednożądowej oraz rozkładu temperatury wierzchniej strony wióra za pomocą pomiarów termowizyjnych. W badaniach szczególną uwagę zwrócono na możliwe przyczyny powstawania błędów i niedokładności pomiarów.

2. Metodyka badań

Do badań wybrano przypadek skrawania ortogonalnego na sucho stali austenicznej AISI 321 ostrzem węglkowym o płaskiej powierzchni natarcia, typu TNMA 160408. Ortogonalne ustawienie ostrza skrawającego zapewniła oprawka nożowa PTG NR 2020-16 (tab. 1). W badaniach testowano niepowlekane ostrza gatunku H10F, oraz ostrza z powłokami ochronnymi o różnej konfiguracji warstw (tab. 2).

Do rejestracji badanych sygnałów (siły termoelektrycznej oraz wartości składowych głównej siły skrawania) wykorzystano kartę pomiarową Natiolal Instruments NI 9237 oraz oprogramowanie LabVIEW.

Tab. 1. Specyfikacja kątów ostrza skrawającego [10]

Tab. 1. Specification of the cutting tool angles [10]

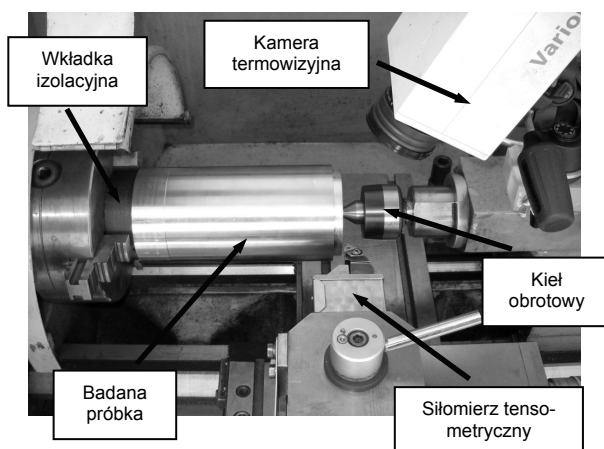
Kąt	Oznaczenie	Wartość
natarcia	γ_n	-5°
przyłożenia	α_n	5°
przystawienia główny	κ_r	90°
przystawienia pomocniczy	κ_r'	–
pochylenia krawędzi skrawającej	λ_s	-6°

Tab. 2. Zestawienie powłok ochronnych wybranych do badań [11]

Tab. 2. Listing of coatings selected for the study [11]

Oznaczenie powłoki wg. Oerlicon Balzers	Rodzaj powłoki	Struktura powłoki
BALINIT A	TiN	monowarstwowa
BALINIT B	TiCN	gradientowa
BALINIT FUTURA NANO	TiAlN	nanowarstwowa
BALINIT X.CEED	AlTiN	monowarstwowa
BALINIT HELICA	AlCrN	wielowarstwowa

Do zbierania obrazów termowizyjnych wykorzystano kamerę VarioCAM firmy JENOPTIK wraz z oprogramowaniem IRBIS 3 dedykowanym do archiwizacji i obróbki obrazów termograficznych. Badania prowadzono na stanowisku badawczym zbudowanym na bazie zmodernizowanej tokarki TUM-D1 (rys. 4).



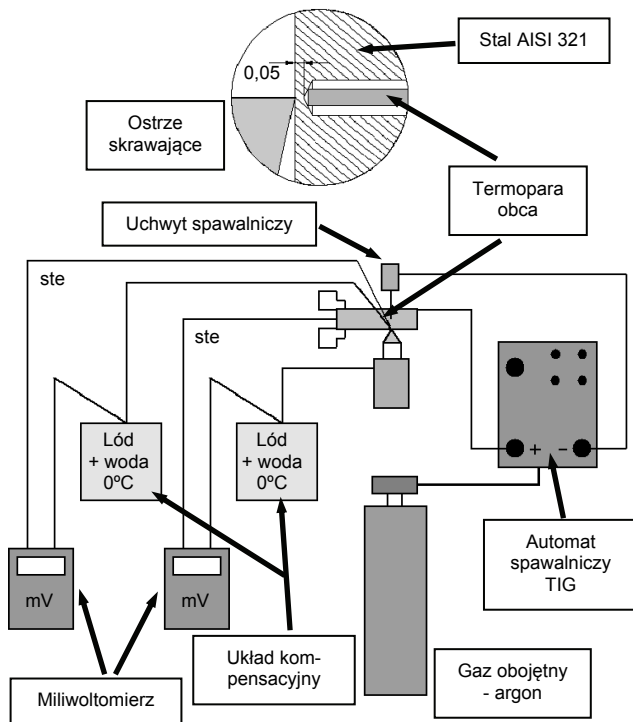
Rys. 4. Widok próbki w przestrzeni obróbkowej obrabiarki

Fig. 4. View of the sample in the machining area of the machine

3. Wzorcowanie torów pomiarowych

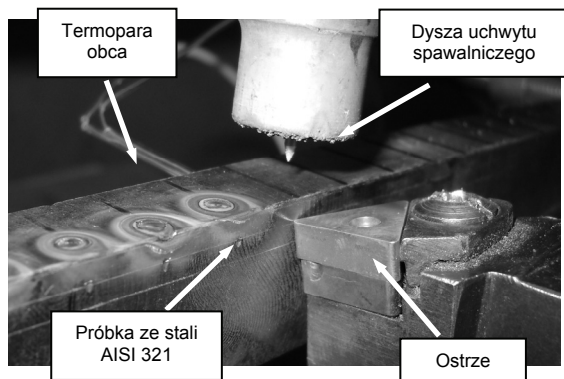
Opierając się na danych literaturowych [12, 13, 14] oraz wynikach badań własnych przed przystąpieniem do pomiarów przeprowadzono wzorcowanie toru do pomiaru średniej temperatury kontaktu. Wzorcowanie termopar ostrze-materiał obrabiany przeprowadzono na tokarce, wykorzystując jako źródło ciepła łuk elektryczny automatu spawalniczego TIG. Schemat stanowiska do wzorcowania badanych par ostrze-materiał obrabiany pokazano na rysunku 5 [13]. Rysunek 6 pokazuje strefę styku wzorowanych materiałów, oraz usytuowanie źródła ciepła i termopary obcej. Charakterystyki $t=f(ste)$ dla wszystkich badanych par substrat/powłoka-materiał obrabiany, wyznaczone w przedziale temperatury od 20 do 900 °C pokazano w tabeli 3.

W pomiarach termowizyjnych dokładność pomiaru zależy ściśle do właściwego oszacowania współczynnika emisyjności badanej powierzchni [2, 3, 8]. W literaturze spotkać można różne sposoby wzorcowania torów termowizyjnych. Zazwyczaj wzorcowanie wykonuje się o oparciu o ciało o znanej emisyjności umieszczone w specjalnej komorze. Jednak takie warunki często są dalekie od warunków rzeczywistych, panujących w strefie skrawania [2, 3, 8]. Przykładowo, Jaspers [2] termowizyjny tor pomiarowy do wyznaczania rozkładu temperatury wierzchniej strony wióra wzorcował używając wióra umieszczonego w zamkniętej komorze.



Rys. 5. Schemat stanowiska do wzorcowania toru pomiarowego średniej temperatury kontaktu wiór-ostrze [13]

Fig. 5. Scheme of the station for calibration of the measurement chain of the tool-chip average contact temperature [13]



Rys. 6. Stanowisko do wzorcowania badanych termopar ostrze-materiał obrabiany

Fig. 6. The station for calibration of tested tool-workpiece material thermocouple

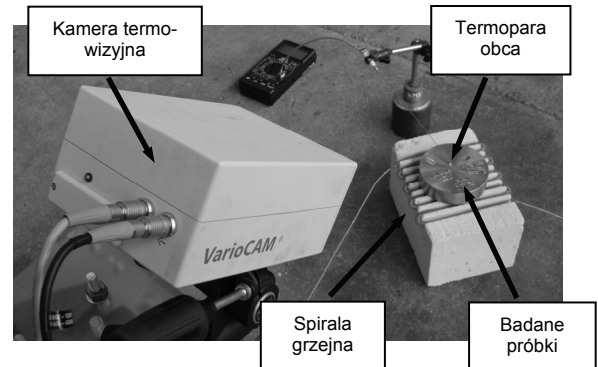
Tab. 3. Zależność $t=f(ste)$ dla stosowanych w badaniach termopar naturalnych materiał ostrza – materiał obrabiany

Tab. 3. The relationship $t=f(ste)$ of the tool-workpiece material natural thermocouples used in the tests

Rodzaj termopary naturalnej	Zależność $t=f(ste)$ $t=f(x)$	Wsp. korelacji
AISI 321 – H10F	$Y = 48,1507753 * X + 198.2808622$	0.845
AISI 321 – TiN	$Y = 47,9902004 * X + 166.4624132$	0.853
AISI 321 – TiCN	$Y = 51,2631135 * X + 123.8113567$	0.856
AISI 321 – TiAlN	$Y = 52,9955850 * X + 148.0219748$	0.794
AISI 321 – AlTiN	$Y = 43,2034305 * X + 235.4921735$	0.774
AISI 321 – AlCrN	$Y = 47,4675349 * X + 173.3499134$	0.818

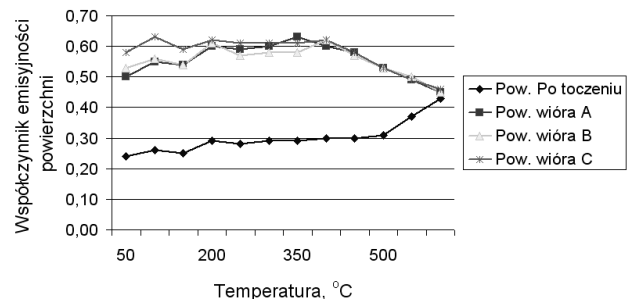
Jako źródło ciepła wykorzystano przepływ prądu o znanym natężeniu. Wzorując się na przytoczonym rozwiązaniu w niniejszych badaniach zaproponowano układ pomiarowy w którym jako źródło ciepła wykorzystano spirale grzejne. Spirale podgrzewały płytę pośredniczącą wykonaną z badanej stali oraz przyklejone do niej ceramicznym klejem termoprzewodzącym wióry. W ten sposób uzyskano możliwość wyznaczenia emisyjności dla wierzchniej strony wiórów oraz dla toczonej powierzchni płyty z tego samego materiału co wióry. Ogólny wygląd stanowiska do

wzorcowania termowizyjnego toru pomiarowego pokazano na rysunku 7. Zmiany współczynnika emisyjności badanych powierzchni, w funkcji temperatury, pokazano na rysunku 8. Badane wióry uzyskano przy prędkości skrawania $v_c=100\text{m/min}$ oraz posuwie wynoszącym odpowiednio 0,04 mm/obr (wiór A), 0,10 mm/obr (wiór B) oraz 0,16 mm/obr (wiór C).



Rys. 7. Stanowisko do wzorcowania kamery termowizyjnej [3]

The station for calibration of the infrared camera [3]

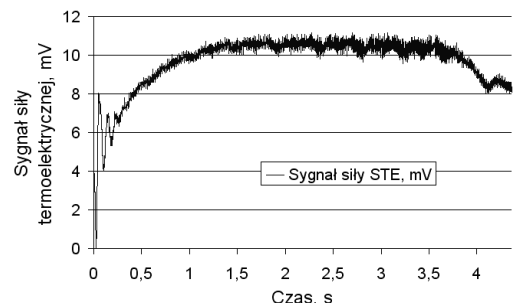


Rys. 8. Przebieg zmian współczynnika emisyjności wierzchniej strony wiórów oraz stali AISI 321 po toczeniu

Fig. 8. Changes of the emissivity of the chip surface and the steel AISI 321 after turning

4. Pomiary eksperymentalne

W trakcie badań jednocześnie zbierano sygnał siły termoelektrycznej, obrazy termowizyjne strefy skrawania oraz wartości składowych głównej siły skrawania. Przykładowy przebieg zmian siły termoelektrycznej uzyskany dla ostrza z powłoką Balinit B (TiCN) pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Przebieg zmian średniej temperatury skrawania dla ostrza z powłoką Balinit B (TiCN), parametry procesu: $v_c=100\text{ m/min}$, $f=0,2\text{ mm/obr}$

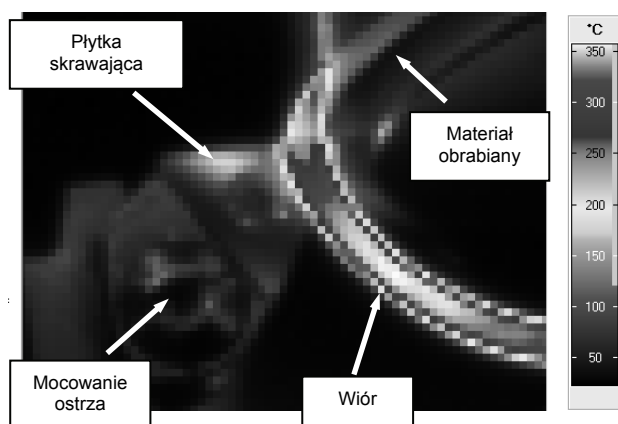
Fig. 9. Changes of the average temperature for cutting insert with BALINIT B (TiCN) coating, the parameters of the process: $v_c=100\text{ m/min}$, $f=0,2\text{ mm/obr}$

Próby trwające około 3-4 sekundy prowadzono na ostrzach nowych, zatem na prezentowanym wykresie nie widać wpływu zużycia ostrza. Natomiast doskonale widoczny jest etap narastania i stabilizowania się temperatury styku. Tak krótki czas skrawania powodował rozgrzanie ostrza tylko w bezpośredniej okolicy pola kontaktu wiór-powierzchnia natarcia. W tym samym czasie styk

ostrza węglkowego z płytką podporową czy materiałem oprawki nożowej nie zmieniał swojej temperatury, co potwierdzono obserwując obrazy termograficzne strefy skrawania (rys. 10).

Założono zatem, że ewentualny wpływ termopary tworzącej się na styku badanego ostrza z systemem mocowania oprawki nożowej jest pomijalnie mały.

W czasie pomiarów termowizyjnych kamera skierowana była na powierzchnię natarcia ostrza, umożliwiając obserwację wierzchniej strony wióra, ostrza i fragmentu obrabianego przedmiotu. Przykładowy obraz termowizyjny strefy skrawania uzyskany dla ostrza z powłoką Balinit HELICA (AlCrN) pokazano na rysunku 10. Analiza rozkładów temperatury wierzchniej strony wióra wskazuje, że jej wartość maksymalna wynosi około połowy wartości średniej temperatury kontaktu. Nadmienić należy, że lokalizacja obszaru występowania temperatury maksymalnej na powierzchni wióra silnie uzależniona jest od parametrów obróbki, a głównie prędkości skrawania. Równie istotną rolę odgrywa przewodność cieplna materiału obrabianego, determinując prędkość rozchodzenia się ciepła w badanym obszarze.



Rys. 10. Termograficzny obraz strefy skrawania dla ostrza z powłoką Balinit HELICA (AlCrN), parametry procesu $v_c=100$ m/min, $f=0,2$ mm/obr
Fig. 10. Thermographic image of the cutting zone for cutting insert with Balinit HELICA (AlCrN) coating, the process parameters: $v_c=100$ m/min, $f=0,2$ mm/obr

Wyniki badań eksperymentalnych zrealizowanych dla stałej prędkości skrawania $v_c=100$ m/min oraz posuwu $f=0,2$ mm/obr zbiorczo pokazano w tabeli 4. Poza wartościami temperatury w tabeli ujęto wartość przyjętego w analizie współczynnika emisyjności wierzchniej strony wióra.

Tab. 4. Zestawienie wyników badań
Tab. 4. Results of the experiment

Rodzaj powłoki	Średnia temp. kontaktu, [°C]	Maksymalna temp. wióra, [°C]	Wsp. emisyjności powierzchni
-	766,2	371,6	0,59
TiN	737,2	357,5	0,61
TiCN	681,8	334,1	0,60
TiAlN	684,3	335,3	0,60
AlTiN	800,8	388,4	0,59
AlCrN	711,9	345,3	0,61

5. Podsumowanie

Ogólnie wiadomo, że nie ma jednej, uniwersalnej metody badawczej pozwalającej bezbłędnie oszacować temperaturę skrawania. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzić można, że metoda termoelementu naturalnego doskonale sprawdza się w przypadku ostrzy niepowlekanych. Należy jednak przypuszczać, że jej dokładność jest wątpliwa dla ostrzy z powłokami ochronnymi. Za takim stwierdzeniem przemawia fakt zużywania się warstw ochronnych, co zmienia charakterystykę styku ostrze-materiał obrabiany. Równie ważnym zagadnieniem są zakłócenia elektromagnetyczne pochodzące od maszyn pracujących w pobliżu. Często są one trudne do oszacowania i kłopotliwe w kompen-

sacji. Pomiar termowizyjny ostatnio coraz chętniej stosowane, pozwalają na oszacowanie temperatury na dostępnych powierzchniach strefy skrawania. Jednak w tym przypadku niezwykle ważna jest umiejętność prawidłowego wyznaczenia wartości współczynnika emisyjności badanych powierzchni. Wspomnieć należy o podatności tej metody na zakłócenia pochodzące od odbitego przez obiekt promieniowania otoczenia. Jednak w tym przypadku zakłócenia te są prostsze do usunięcia.

Obie metody pomiarowe dostarczają szeregu danych zbieżnych z danymi literaturowymi. Jednocześnie mogą stanowić cenne źródło informacji do budowy modeli symulacyjnych, oraz do weryfikacji wyników obliczeń numerycznych.

Praca naukowa finansowana przez MNiSW ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy habilitacyjny pt.: „Modelowanie przepływu ciepła i rozkładu temperatury w strefie skrawania dla ostrzy węglkowych z powłokami ochronnymi”. Numer projektu: N N503 157738.

6. Literatura

- [1] Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów metalowych, WNT, Warszawa, 1998.
- [2] Jaspers S.P.F.C., Dautzenberg J.H.: Material Behaviour in metal cutting: strains, strain rates and temperatures in chip formation, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 121, 2002, s. 123-135.
- [3] Bartoszek M.: Badania oddziaływań termicznych w strefie skrawania dla stali AISI 321, VI Konf. Nauk. Szkoła Obróbki Skrawaniem – Efektywne Wytwarzanie, Łądek Zdrój, 2012, s. 167-174.
- [4] Michalski L., Eckersdorf K.: Pomiar temperatury, WNT, Warszawa, 1986.
- [5] Komanduri R., Hou Z.B.: A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology, Tribology International, Vol. 34, 2001, s. 653-682.
- [6] Silva M.B., Wallbank J.: Cutting temperature: prediction and measurement methods a review, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 88, 1999, s. 195-202.
- [7] Zębala W.: Analityczna i eksperymentalna identyfikacja stanu strefy obróbki w procesie skrawania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2004.
- [8] Minkina W.A., Rutkowski P., Wild W.A.: Podstawy pomiarów termowizyjnych, Część II – Współczesne rozwiązania systemów termowizyjnych, Nr 1, 2000, s. 11-14.
- [9] Jankowiak M., Twardowski P.: Przydatność różnych metod pomiaru temperatury ostrza skrawającego, Archiwum Technologii Maszyn I Atomizacji, Vol. 21, Nr 2, 2001, s. 95-102.
- [10] Noże tokarskie składane, Katalog produktów firmy PAFANA, 2011.
- [11] Obróbka skrawaniem. Produkty i usługi. Katalog firmy Oerlicon Balzers, 2011.
- [12] Leshock C.E., Shin Y.C.: Investigation on cutting temperature in turning by a tool-work thermocouple technique, Transaction of the ASME, Vol. 119, 1997, s. 502-508.
- [13] Grzesik W.: Experimental investigations of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, 1999, s.355-369.
- [14] Abhang L.B., Hameedullah M.: Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2/4, 2010, s. 382-393.
- [15] Rech J.: Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool-chip interface in orthogonal dry turning, Surface & Coatings Technology, Vol. 200, 2006, s. 5132-5139.
- [16] Filice L., Micari F., Settineri L., Umbrello D.: Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools, Wear, Vol. 262, 2007, s. 545-554.
- [17] Yvonnet J., Umbrello D., Chinesta F., Micari F.: A simple inverse procedure to determine heat flux on the tool in orthogonal cutting, Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, 2006, s. 820-827.
- [18] Aneiro F.M., Coelho R.T., Brandão L.C.: Turning Hardened Steel Using Coated Carbide at High Cutting Speeds, J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng., Vol XXX/2, 2008, s. 104-109.