

Dr hab. inż. Marian BARTOSZUK (Politechnika Opolska):

ANALIZA ODWROTNA ZAGADNIENIA ROZPŁYWU CIEPŁA NA STYKU OSTRZA I MATERIAŁU OBRABIANEGO

Streszczenie

Ciepło generowane podczas skrawania w większości unoszone jest wraz z wiórem, a po części przepływa do ostrza skrawającego i obrabianego materiału. Jednak prawa rządzące przepływem ciepła pomiędzy wiórem, ostrzem i materiałem obrabianym nie do końca są poznane. W artykule przedstawiono metodę wyznaczania nowego współczynnika podziału ciepła pomiędzy wiór i ostrze narzędzia. Jak się wydaje, ten współczynnik lepiej koresponduje ze współczesnymi materiałami (narzędziowymi i obrabianymi) oraz stosowanymi obecnie parametrami obróbki.

Słowa kluczowe: *strefa skrawania, rozpliw ciepła, współczynnik partycji ciepła*

ANALYSIS OF REVERSE PROBLEM OF HEAT DISTRIBUTION AT THE INTERFACE BETWEEN THE TOOL AND THE CUTTING MATERIAL

Abstract

It is well known that the heat generating during cutting is lead out mostly with the chip, and in part flows to the cutting tool and the workpiece. However, the principles governing the heat flow between the chip, tool and workpiece material are not fully understood. This article presents a methodology for determining the new heat partition coefficient between the chip and cutting tools, which appears to correspond better with modern materials of tools and workpieces and works better with the currently used machining parameters.

Keywords: *cutting zone, heat distribution, heat partition coefficient*

ANALIZA ODWROTNA ZAGADNIENIA ROZPŁYWU CIEPŁA NA STYKU OSTRZA I MATERIAŁU OBRABIANEGO

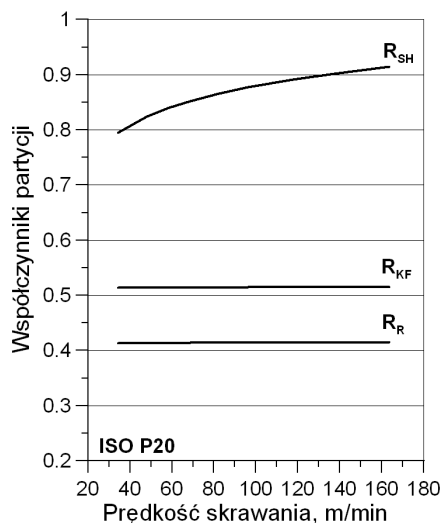
Marian BARTOSZUK¹

1. WPROWADZIENIE

W badaniach procesu skrawania znajomość podziału generowanych strumieni ciepłych pomiędzy wiór ostrze i materiał obrabiany dostarcza szeregu ważnych informacji o samym procesie. Podział strumieni ciepłych zależy zarówno od parametrów obróbki jak i od wzajemnego stosunku właściwości termofizycznych obu materiałów – narzędziowego i obrabianego. Na podstawie danych literaturowych [2, 5, 9, 13] oraz wyników przeprowadzonych obliczeń stwierdzić można, że materiał obrabiany przechodząc przez strefę skrawania większość ciepła zyskuje w strefie pierwotnych odkształceń plastycznych. W strefie wtórnych odkształceń plastycznych sumaryczna ilość ciepła zwiększana jest jedynie o ciepło tarcia o powierzchnię natarcia ostrza. Ciepło powstające na skutek tarcia powierzchni przyłożenia o materiał obrabiany pomija się z uwagi na znikome znaczenie. Ilość ciepła wytworzona w materiale obrabianym, a następnie skumulowana we wiórze, niemal w całości unoszona jest wraz z wiórem. Część jego jednak wraca do ostrza narzędzia poprzez pole kontaktu, łącząc się z ciepłem tarcia wióra o powierzchnię natarcia ostrza. W praktyce, ilość ciepła wpływającego tą drogą do narzędzia można obliczyć analitycznie posługując się współczynnikiem partycji ciepła wg Reznikova, Kato-Fujii lub Shawa [9, 11, 13, 14, 15]. Wcześniej prowadzone badania symulacyjne procesu skrawania [4] wskazują, że powszechnie znane współczynniki partycji ciepła dają wyraźne niedoszacowanie sumarycznego strumienia ciepła wpływającego do ostrza narzędzia. Do podobnych wniosków na podstawie własnych badań doszedł Niesłony [13]. Porównanie wartości współczynników partycji ciepła (R_{SH} – Shawa, R_{KF} – Kato-Fujii, R_R – Reznikova) w funkcji prędkości skrawania pokazano na rysunku 1 [13]. Zauważyć można, że

¹ Politechnika Opolska, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, 45-758 Opole, ul. Prószkowska 76

wraz ze wzrostem prędkości skrawania tylko nieznacznie wzrasta wartość wszystkich współczynników partycji, co dowodzić może, że tak samo nieznacznie zwiększa się ilość ciepła unoszonego wraz z wiórem.



Rys. 1. Przebieg zmian różnych współczynników partycji ciepła dla pary stal 1H18N9T-węglik P20 [13] dla danych termofizycznych wg Jawahira [10]

Mając na uwadze stały postęp w obróbce skrawaniem oraz ciągłą intensyfikację procesów obróbczych nie trudno odnieść wrażenie, że opracowane przed kilkudziesięciu laty formuły obliczeniowe współczynników partycji ciepła ogły stracić na aktualności. Istnieje zatem potrzeba wyznaczenia poprawnych, dobrze korespondujących z aktualnie stosowanymi parametrami obróbki, współczynników partycji ciepła. Możliwość taka zaczyna się pojawiać, gdy problem rozdziału ciepła w strefie skrawania zdefiniujemy, jako zagadnienie odwrotne [16].

2. METODYKA BADAŃ

W pracy skupiono się na przypadku skrawania ortogonalnego na sucho stali austenitycznej AISI 321 ostrzami węglowymi H10F bez powłok ochronnych. W pierwszym etapie przeprowadzono badania eksperymentalne procesu skrawania w trakcie których zgromadzono szereg danych wykorzystywanych potem do budowy modeli symulacyjnych oraz do weryfikacji wyników uzyskiwanych na drodze obliczeń numerycznych. Badania doświadczalne zrealizowano z użyciem oprawki nożowej PTNGR 2020-16 zapewniającej ortogonalne ustawienie ostrza TNMA 160408 o płaskiej powierzchni natarcia. Parametry obróbki przyjęte do testów wynosiły odpowiednio: prędkość skrawania $v_c = 66,67, 83,33, 100,00, 116,67, 133,33, 150,00$

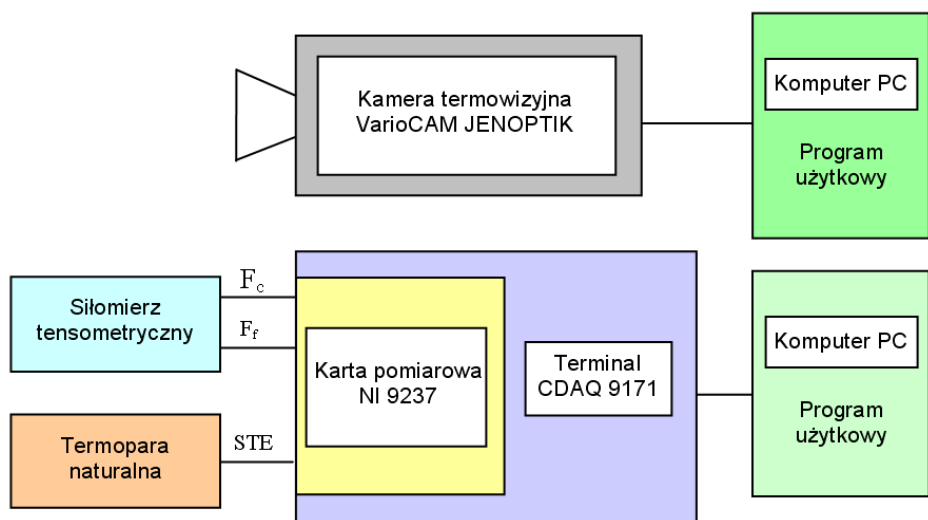
m/min, posuw $f = 0,20$ mm/obr oraz głębokość skrawania (szerokość warstwy skrawanej) $a_p = 2$ mm.

Drugi etap stanowiły obliczenia symulacyjne rozptyłu ciepła w strefie skrawania zrealizowane dla modelu składającego się z ostrza i wióra, w rezultacie których otrzymano mapy rozkładu temperatury w strefie skrawania. W celu ustalenie rzeczywistej ilości ciepła wnikałej do ostrza przez długość kontaktu przeprowadzono również obliczenia odwrotne rozptyłu ciepła dla modelu składającego się tylko z obszaru ostrza. W ich rezultacie możliwe było oszacowanie nowej wartości współczynnika partycji ciepła lepiej opisującego zjawisko podziału ciepła pomiędzy wiór i ostrze skrawające. Badania symulacyjne zrealizowano z wykorzystaniem kalkulatoryjnej metody rozwiązywania równań różniczkowych KM3R.

2.1. BADANIA EKSPERYMENTALNE PROCESU SKRAWANIA

W pracy badania doświadczalne prowadzono na stanowisku zbudowanym na bazie tokarki kłowej TUM-35D1 wyposażonej w siłomierz, układ do pomiaru siły termoelektrycznej generowanej na styku ostrza i materiału obrabianego oraz kamerę termowizyjną VarioCAM firmy JENOPTIK. W trakcie badań mierzono wartości składowych całkowitej siły skrawania, temperaturę kontaktową oraz rejestrowano obrazy termograficzne strefy skrawania. Do badania sił wykorzystywano naprzemiennie dwa siłomierze: siłomierz tensometryczny konstrukcji Katedry Technologii Maszyn Politechniki Opolskiej oraz siłomierz firmy KISTLER 9257B wraz z odpowiednim torem pomiarowym (wzmacniacz ładunku KISTLER 5019B i karta pomiarowa NI6062E firmy National Instruments) [7, 8, 12]. Średnią temperaturę kontaktu mierzono metodą termoelementu naturalnego w odmianie jednonożowej [1, 6, 17]. Obrazy termograficzne całej strefy skrawania zbierano używając kamery termowizyjnej VarioCAM firmy JENOPTIK zaopatrzonej w oprogramowanie IRBIS 3 dedykowane do archiwizacji i obróbki obrazów termograficznych [3]. Schemat torów pomiarowych pokazano na rysunku 2.

Badania doświadczalne procesu skrawania wykonywano na próbkach w formie walca z podcięciem tworzącym krótką rurę o grubości ścianki 2 mm. Wymóg elektrycznego odizolowania próbki od mechanizmów obrabiarki uzyskano stosując specjalne wkładki izolacyjne z materiałów dielektrycznych. Natomiast do rejestracji badanych sygnałów wykorzystano kartę pomiarową firmy National Instruments NI 9237 oraz oprogramowanie LabVIEW.



Rys. 2. Schemat ideowy stanowiska do prób toczenia

2.2. OBLICZENIA NUMERYCZNE ROZPŁYWU CIEPŁA W STREFIE SKRAWANIA

Do obliczeń numerycznych rozptywu ciepła w strefie skrawania wykorzystano modelowanie MRS w odmianie KM3R. W metodzie tej symulacje rozptywu prowadzone są na podstawie wielu danych o samym procesie, ale niejako w oderwaniu od mechaniki i tribologii procesu. Analizowane są tylko zjawiska cieplne zachodzące w czasie skrawania. Zaznaczyć należy, że w czasie obliczeń numerycznych prowadzonych dla pełnego modelu strefy skrawania (ostrze + wiór) podział ciepła pomiędzy wiór i ostrze narzędzia ustala się samoistnie. Odtwarzając ten proces, ale bez udziału wióra uzyskamy wyniki zbieżne z wynikami obliczeń dla modelu z wiórem tylko wtedy, gdy wprowadzimy do ostrza narzędzia równoważną ilość ciepła. Wykorzystując tę właściwość modelu i łatwość ingerencji w procedurę obliczeń KM3R przeprowadzono szereg obliczeń numerycznych których algorytm przedstawić można w postaci następującej:

- opracowanie pełnych modeli strefy skrawania (wiór + ostrze) z założeniem źródeł ciepła w SPOP i SWOP. Tarciove źródła ciepła przyjęto po stronie wióra,
- realizacja obliczeń symulacyjnych dla pełnych modeli strefy skrawania,
- zbudowanie modelu obliczeniowego samego ostrza, gdzie źródło ciepła definiowane jest jako źródło zewnętrzne, dostarczające ciepło tylko przez długość kontaktu l_{nc} ,
- dobór kształtu źródła ciepła, który daje rozkład izoterm w ostrzu narzędzia podobny, jak w przypadku pełnego modelu obliczeniowego,

- realizacja obliczeń metodą kolejnych przybliżeń, aż do uzyskania zadowalającej zbieżności wyników.

Poniżej, w tabeli 1 pokazano porównanie wartości średniej temperatury kontaktu, uzyskanych dla pełnego modelu strefy skrawania oraz dla modelu samego ostrza, bez wióra, gdzie ilość ciepła wnikać do narzędzia definiowano ręcznie. Zauważyć można, że największe rozbieżności wyników odnotowano dla małych prędkości skrawania, odpowiednio -5.0% dla $v_c = 83.33$ m/min i -11.31% dla $v_c = 66.67$ m/min. Zjawisko to wynika z uproszczeń modelu obliczeniowego, zwłaszcza z przyjętego do obliczeń kształtu źródła ciepła zdefiniowanego ma płaszczyźnie poślizgu i na długości kontaktu [2, 5]. Zakładając jednak, że uzyskane rozbieżności wyników są akceptowalne, symulacje rozptyłu ciepła dla samego ostrza narzędzia (dla modelu uproszczonego) prowadzono tak, aby maksymalnie zbliżyć się do wyników uzyskanych w pierwszej turze symulacji (dla modelu z wiórem). Porównanie obu tych wartości pokazano w tabeli 2 oraz na rysunku 3.

Tabela 1.

Zestawienie wyników symulacji rozptyłu ciepła w strefie styku dla ostrza H10F bez powłok dla zmiennej prędkości skrawania i posuwu wynoszącego 0.2 mm/obr

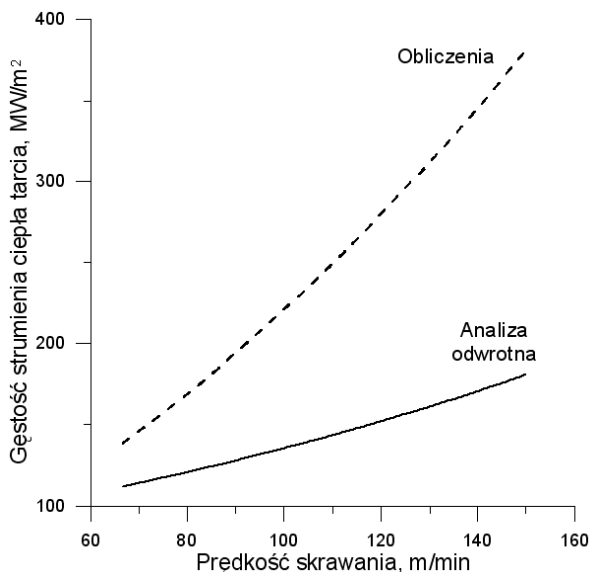
v_{cs} m/min	t_k , °C	t_k , °C	Odchyłka, %	t_k , °C	Odchyłka, %
	Eksperyment	Symulacja – model pełny		Symulacja – model uproszczony	
66.67	880.0	780.50	-11.31	780.80	-11.27
83.33	912.4	862.50	-5.00	861.64	-5.10
100.00	931.0	924.85	-0.66	925.02	-0.64
116.67	949.4	970.33	2.20	970.50	2.22
133.33	963.1	1010.39	4.91	1012.31	5.11
150.00	972.0	1032.13	6.19	1030.12	5.98

Tabela 2.

Zestawienie wartości strumienia ciepła tarcia dla modelu pełnego i uproszczonego, dla ostrza H10F bez powłok; parametry procesu: $v_c = \text{vario}$, $f = 0.2$ mm/obr

v_{cs} m/min	q_n , MW/m ²	q_n , MW/m ²	$q_n / q_t = R_B$
	Symulacja – model pełny	Symulacja – model uproszczony	
66.67	137.694	104.796	0.761076
83.33	178.315	130.477	0.731726
100.00	221.789	137.144	0.618352
116.67	269.060	151.603	0.563453
133.33	321.581	163.797	0.509350
150.00	381.783	176.664	0.462733

Wartość gęstości strumienia ciepła tarcia przyjmowana do symulacji w modelu uproszczonym, z racji faktu, że w obliczeniach nie bierze udziału wiór, pomniejszona jest o ilość ciepła unoszoną wraz z wiórem. Uwzględnia tylko i wyłącznie ilość ciepła wpływającego do ostrza narzędzia poprzez kontakt wiór-powierzchnia natarcia.

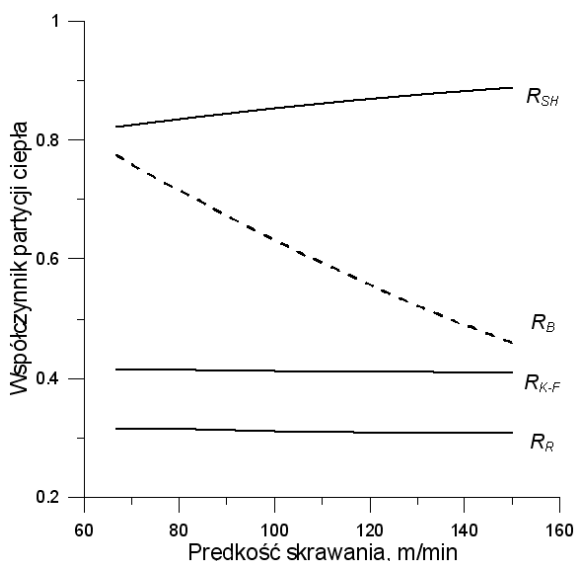


Rys. 3. Wpływ prędkości skrawania na zmiany gęstości strumienia ciepła tarcia, parametry procesu: $v_c = \text{vario}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0.2 \text{ mm/obr}$

3. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Graficzne porównanie zmian intensywności strumienia ciepła tarcia oraz strumienia ciepła wnikającego bezpośrednio do ostrza narzędzia przez długość kontaktu (rys. 3) wskazuje, że rzeczywista wartość strumienia ciepła wpływającego do ostrza przez powierzchnię kontaktu jest mniejsza od strumienia ciepła tarcia o około 25 % dla małych prędkości skrawania oraz około 55 % dla prędkości dużych. Zjawisko to wyjaśnić można po części stosunkiem właściwości termofizycznych materiału obrabianego i materiału ostrza, a po części wpływem prędkości skrawania na podział strumieni ciepłych w strefie skrawania, gdyż wraz ze wzrostem prędkości skrawania rośnie strumień ciepła tarcia i ciepła odkształceń plastycznych. Jednocześnie maleje długość kontaktu i wzrasta prędkość spływu wióra. W efekcie czas oddziaływania strumieni ciepłych na ostrze gwałtownie się skraca. Zatem sumaryczna ilość ciepła wpływającego do ostrza narzędzia znacząco zmniejsza się. Co więcej, zauważyć można, że stosunek wartości rzeczywistego strumienia ciepła wpływającego do narzędzia q_n do wartości strumienia ciepła tarcia q_t stanowi nową wyliczoną wartość współ-

czynnika partycji ciepła R_B . Tak wyliczone wartości współczynnika partycji ciepła pokazano w tabeli 2. Przebieg zmian nowego współczynnika partycji ciepła R_B w odniesieniu do przebiegu znanych współczynników partycji wg Reznikova, Kato-Fujii oraz Shawa pokazano na rysunku 4. Wartość współczynnika R_B zmienia się monotonicznie od 0.76 dla prędkości $v_c = 66$ m/min do wartości 0.46 dla prędkości skrawania wynoszącej 150 m/min. Charakter tych zmian jest zupełnie inny, niż dla pozostałych współczynników partycji ciepła.



Rys. 4. Przebieg zmian różnych współczynników partycji ciepła dla pary stal AISI321 -węgiel niepowlekany, parametry obróbki: $v_c = \text{vario}$, $a_p = 2$ mm, $f = 0.2$ mm/obr

Przypuszczać można, że tak specyficzny przebieg nowego współczynnika partycji ciepła wynika z sumarycznego oddziaływania wzajemnego stosunku właściwości termofizycznych obu materiałów oraz wpływu parametrów procesu skrawania na zmniejszenie ilości ciepła wnikającego do ostrza.

4. PODSUMOWANIE

Dla naukowców zajmujących się badaniem oddziaływań cieplnych w strefie skrawania ważne jest posiadanie możliwie kompletnej informacji o rozkładzie temperatury w strefie skrawania. Dotyczy to również współczynnika podziału ciepła pomiędzy wiór i ostrze, gdyż jego znajomość pozwala na lepsze odwzorowanie warunków wymiany ciepła w przypadku modelowania numerycznego oraz umożliwia szerszą analizę rozprzyszczenia ciepła w całej strefie skrawania.

Przedstawiona w artykule metodyka badań przybliżyła nas do takiego stanu wiedzy. W analizie uzyskanych wyników wyznaczono nowy współczynnik partycji ciepła R_B lepiej opisujący podział strumieni cieplnych niż stosowane dotychczas współczynniki. Badania przeprowadzono w oparciu o dane zgromadzone tylko dla stali AISI 321, jednak przypuszczać można, że zaproponowany współczynnik będzie posiadał podobny przebieg dla innych materiałów. W celu precyzyjnego określenia jego formuły nowego współczynnika partycji ciepła R_B konieczne jest przeprowadzenie dalszych badań dla materiałów o różnej skrawalności oraz powtórna weryfikacja przyjętych założeń.

LITERATURA

- [1] ABHANG L.B., HAMEEDULLAH M., *Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process*, Int. Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2/4, 2010, pp. 382-393.
- [2] BARTOSZUK M., GRZESIK W., *Numerical prediction of the interface temperature using updated Finite Difference Approach*, 13th CIRP International Workshop on modeling of machining operations, 2011, pp. 231-239.
- [3] BARTOSZUK M., *Badania oddziaływań termicznych w strefie skrawania dla stali AISI 321*, VI Konf. Nauk. Szkoła Obróbki Skrawaniem – Efektywne Wytwarzanie, Łądek Zdrój, 2012, pp. 167-174.
- [4] BARTOSZUK M., *Badanie wpływu powlekania ostrza skrawającego na temperaturę i rozprzyszczenie ciepła w strefie kontaktu*, Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, 2003.
- [5] BARTOSZUK M.: *Symulacja oddziaływań termicznych w strefie skrawania*, V Konf. Nauk. Szkoła Obróbki Skrawaniem – Nauka a Przemysł, Opole 2011, pp. 202-209.
- [6] GRZESIK W., *An integrated approach to evaluating the tribo-contact for coated cutting inserts*, Wear, Vol. 240, 2000, pp. 9-18.
- [7] GRZESIK W., *An investigation of the thermal effects in orthogonal cutting associated with multilayer coatings*, Annals of the CIRP, Vol. 50/1, 2001, pp. 53-56.
- [8] GRZESIK W., *Friction behaviour of heat isolating coatings in machining: mechanical, thermal and energy-based considerations*, Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, 2003, pp. 145-150.
- [9] GRZESIK W., *Podstawy skrawania materiałów metalowych*, WNT Warszawa, 2010.
- [10] JAWAHIR I.S., LUTTERVELT VAN C.A., *Recent developments in chip control, research and application*, Keynote Paper, Annals of the CIRP, 1993, vol. 42 (2), pp. 659-693.
- [11] KATO T., FUJII H., *Energy partition in conventional surface grinding*, ASME J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 121, 1999, pp. 393-398.
- [12] NIEŚLONY P., LASKOWSKI P., *Modelowanie MES wpływu własności termofizycznych materiałów obrabianych i narzędziowych na zmiany charakterystyk procesu skrawania*, VI Konf. Nauk. Szkoła Obróbki Skrawaniem – Efektywne Wytwarzanie, Łądek Zdrój, 2012, pp. 207-216.
- [13] NIEŚLONY P., *Modelowanie przepływu ciepła i rozkładu temperatury w strefie skrawania dla ostrzy z twardymi powłokami ochronnymi*, Oficyna Wydawnicza PO, Opole, 2008.
- [14] REZNIKOV A.N., *Teplofizika rezanija*, Mashinostroenie, Moskwa, 1968.
- [15] SHAW M.C., *Metal cutting principles*, Oxford University Press, New York, 1984.
- [16] TALER J., DUDA P., *Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła*, WNT, Warszawa, 2003.
- [17] TIEU A.K., FANG X.D., ZHANG D., *FE analysis of cutting temperature field with adhering layer formation*, Wear, Vol. 214, 1998, pp. 252-258.