termowizja, temperatura, pomiary, toczenie, stal nierdzewna

Grzegorz STRUZIKIEWICZ¹

ANALIZA POPRAWNOŚCI POMIARU TEMPERATURY W STREFIE SKRAWANIA W PROCESIE TOCZENIA STALI 4H13

W artykule przedstawiono analizę wpływu wybranych parametrów pomiarowych kamery termowizyjnej oraz kierunku obserwacji procesu toczenia wzdłużnego, na wartość maksymalnej temperatury wióra, uzyskaną z obrazów termograficznych. Przedstawiono wyniki pomiarów maksymalnej temperatury w strefie skrawania dla zmiennych czynników takich jak: kąt rejestracji obrazu termowizyjnego, skala powiększenia, dodatkowe źródła światła. Przeprowadzono również komputerową symulację rozkładu pola temperatury w procesie toczenia wzdłużnego stali nierdzewnej 4H13.

1. WPROWADZENIE

Błędy monitorowania i doboru warunków procesu skrawania utrudniają poznanie zasadniczych mechanizmów zachodzących w procesie obróbki, jak: wielkość odkształceń cieplnych, zużywanie ostrza narzędzia, a także mechanizm tworzenia wióra itp.[7]. Nadmierna ilość ciepła dostarczana do narzędzia, powoduje niekorzystne zjawiska polegające na utracie zdolności skrawnych w wyniku zmniejszającej się twardości ostrza [3],[4],[16],[23]. Zużycie cieplne ostrza, gdy przez określony czas pracuje ono poza granicami dopuszczalnej temperatury, prowadzi do zmian strukturalnych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego. Utrata zdolności skrawnych z kolei prowadzi do błędów obróbki przekładających się na błędy wykonania [16],[18],[21]. Obniżenie temperatury przedmiotu obrabianego i narzędzia przez zwiększenie odprowadzenia ciepła i prawidłowe zaprojektowanie procesu obróbki skrawaniem, podnosi dokładność wymiarową obrabianego przedmiotu oraz zwiększa trwałość zastosowanego narzędzia [7],[10].

Znaczna liczba metod eksperymentalnych pozwala poznać skalę zjawisk cieplnych powstających w procesie skrawania. Jednak niewiele istnieje sposobów możliwych do zrealizowania w warunkach poza laboratoryjnych. Nierzadko pomiar temperatury procesu wiąże się ze znacznymi przygotowaniami, żmudnymi obliczeniami, a dodatkowo badania te są określane mianem "niszczących" [7], [10]. Alternatywą może być technika termograficzna, która pozwala w szybki sposób wyznaczyć zmiany pól temperatur, co

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Zakład Technologii i Modelowania Procesów Obróbki, Kraków, E-mail: struzikiewicz@mech.pk.edu.pl

przekłada się także na określenie procesów fizycznych zachodzących podczas odkształcenia ciał [7],[10]. Systemy kompensacji przemieszczeń cieplnych wymagają ciągłej, szybkiej i bezinwazyjnej metody określania temperatury elementów układu obróbkowego.

Pola temperatur można określić za pomocą obliczeń symulacyjnych, opartych na metodzie elementów skończonych. Badania symulacyjne niosą szereg korzyści wykorzystywanych podczas optymalizacji parametrów skrawania, takich jak prognoza zużycia ostrza, możliwość określenia zapotrzebowania mocy obrabiarki, sztywności narzędzia oraz identyfikacji i analizy zjawisk fizycznych zachodzących w trakcie procesu [5],[19],[22]. W przypadku skrawania metali, mechanika tego procesu obejmuje zagadnienia odkształceń plastycznych, sił, naprężeń, energii i tarcia oraz towarzyszących zjawisk jak: powstawanie i dyfuzja ciepła, adhezja, przemiany strukturalne i fazowe [3],[6],[16],[20].

Istota pomiarów cieplnych w procesie skrawania jest zagadnieniem trudnym oraz złożonym. Z powodu nierównomiernego rozkładu strumieni cieplnych w całej masie odkształconej warstwy skrawanej oraz w ostrzu i tworzącym się wiórze, analityczny opis zachowania temperaturowego staje się niezwykle skomplikowany lub wręcz niemożliwy. Temperaturę zatem cechują zazwyczaj zupełnie inne wartości w różnych punktach wióra, narzędzia i wytwarzanego przedmiotu [3],[16].

Według literatury [6], najwyższa temperatura znajduje się w miejscach największych skupień ciepła, którymi są: m.in. obszar największych odkształceń w warstwie skrawanej oraz obszar styku wióra i ostrza. Źródłem zmian temperatury w procesie skrawania jest zamiana pracy mechanicznej na ciepło oraz zwiększenie energii potencjalnej odkształconej siatki krystalicznej [5]. Dotychczas autorzy prac [1],[2],[3],[15] wymieniają głównie przewodzenie a niektórzy [5],[8] także promieniowanie, jako sposoby dystrybucji energii zgromadzonej w wiórze, narzędziu i przedmiocie obrabianym. Ciepło które powstaje jest unoszone przez tworzące się wióry, przewodzone do narzędzia i przejmowane przez materiał obrabiany, płyn obróbkowy i powietrze. Rozkład pola temperatury jest więc ściśle uzależniony od warunków skrawania, rodzaju uzyskanego wióra, sposobu chłodzenia, charakterystyki materiału obrabianego i ostrza [5]. Czynnikiem najbardziej wpływającym na rozkład ciepła w procesie skrawania, jest prędkość skrawania. Jej zwiększenie powoduje zmniejszenie ilości ciepła, które przechodzi do materiału obrabianego i materiału ostrza, a zwiększa natomiast ilość ciepła, które jest unoszone wraz z wiórem [2],[5].

Należy zwrócić uwagę na fakt, że przy bardzo dużych prędkościach skrawania, obrabiana powierzchnia może zostać nagrzana w stopniu nieznacznym. Autorzy prac [11],[12] twierdzą, że nie występuje jawna zależność temperatury wióra od prędkości skrawania a czynniki jak: wartość oporu właściwego, wartość współczynnika spęczenia wióra oraz wartość kąta ścinania mogą zależeć od prędkości skrawania. Najwyższą temperaturę, można zaobserwować w środku styku wióra z powierzchnią natarcia, co jest spowodowane wzrastającą twardością wióra w tym miejscu oraz rozkładem nacisków na powierzchni natarcia, związanym z warunkami spływu wióra [6]. Gradient, czyli szybkość spadku temperatury w obszarze ostrza noża jest bardzo duży, tzn. już w niewielkiej odległości od strefy skrawania temperatury są znacznie niższe.

Wpływ materiału obrabianego na temperaturę generowaną w procesie skrawania związany jest z jego właściwościami fizykochemicznymi [3],[8],[16]. Proces dekohezji

materiałów, cechujących się małą przewodnością cieplną (np. stal wysokostopowa), jest przyczyną znacznego zwiększenia generowanego ciepła. W zastosowaniu praktycznym, wpływ materiału na temperaturę ocenia się wyłącznie na podstawie twardości i wytrzymałości na rozciąganie materiału. Temperatura procesu skrawania jest zazwyczaj wyższa w przypadku materiałów twardszych i bardziej wytrzymałych na rozciąganie [8].

Na temperaturę decydujący wpływ ma także rodzaj wióra, który powstaje w procesie obróbkowym. Wiór odpryskowy powstając wywiera większy nacisk na ostrze skrawające, na znacznie mniejszej powierzchni narzędzia, dlatego ilość wytworzonego ciepła na jednostkę powierzchni i masy, jest odpowiednio wyższa [3],[8].

Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na temperaturę procesu jest materiał ostrza skrawającego oraz jego właściwości geometryczne. Największą zmianę przynosi zmiana kąta natarcia, przystawienia oraz naroża ostrza. Wraz ze zwiększaniem kąta natarcia, praca odkształcenia plastycznego i praca tarcia zewnętrznego wióra o powierzchnię natarcia zmniejsza się [8]. Zmniejsza się wówczas ilość wydzielanego ciepła. Zwiększenie kąta natarcia powoduje wzrost temperatury skrawania, co wynika z jednoczesnego zmniejszania długości czynnej krawędzi skrawającej [3].

Zasada dokonywania pomiarów temperaturowych za pomocą kamery termowizyjnej opiera się o fakt występowania promieniowania w paśmie podczerwieni, emitowanego przez każde ciało o temperaturze wyższej od temperatury zera bezwzględnego. Natężenie promieniowania zależy od temperatury obiektu i długości fali [13]. Promieniowane generowane przez obiekty zależy od szeregu czynników i wskaźników które należy wziąć pod uwagę podczas wykonywania badań [7],[9],[13]. W mechanice technikę termograficzną wykorzystuje się zarówno do określania zmian temperatury na powierzchniach elementów urządzeń i maszyn technologicznych [10], ale także w badaniach procesów fizycznych zachodzących podczas odkształcania ciała. Technikę termograficzną stosuje się również w obszarze diagnostyki maszyn i urządzeń [17].

Zdolność do emisji promieniowania charakteryzuje współczynnik emisyjności, a jego wartość ma decydujący wpływ na wartość temperatury uzyskaną z analizy obrazów termograficznych. Jego wielkość jest zależna od szeregu cech danego obiektu jakimi są np.: rodzaj materiału, jego powierzchnia (wykończenie, powłoki), temperatura (T), długość fali obserwacji (λ), kąt obserwacji (α) [9],[13].

Poza emisyjnością ważna dla pomiarów pirometrycznych jest także refleksyjność, która wpływa na wartość wskazywanej temperatury [9]. Jest to zjawisko szczególnie wyraźne, gdy w pobliżu znajdują się obiekty o wysokiej temperaturze i dużej emisyjności. Promieniowanie cieplne obserwowanego obiektu stanowi wówczas w dużej części promieniowanie odbite innych ciał. Można ograniczyć wpływ otoczenia przez zastosowanie osłon (najlepiej o dużej refleksyjności) lub pokrywanie obiektu badanego powłoką o większej emisyjności, a tym samym niskiej refleksyjności (powlekanie, oksydowanie) [9].

Kolejnym czynnikiem decydującym o dokładności pomiaru termowizyjnego jest atmosfera. W atmosferze następuje pochłanianie promieniowania podczerwonego przez cząsteczki pary wodnej, dwutlenku węgla oraz ozonu. Wpływ tych składników zależy od pogody, klimatu, pory roku czy położenia geograficznego [13]. Kolejnym zasadniczym zagadnieniem mającym wpływ na promieniowanie, jest tłumienie przez elementy optyczne kamery. Zjawisko to jest spowodowane brakiem przeźroczystości materiałów, z których wykonane są elementy optyczne kamery (najczęściej krzem lub german) [13]. Aby uzyskać najdokładniejszy pomiar termowizyjny, wprowadza się do kamery odpowiednie wartości emisyjności, odległości, wilgotności.

Celem podjętych analiz było określenie wpływu czynników rejestracji obrazu termowizyjnego, takich jak: kąt obserwacji, odległość od obiektu, współczynnik emisyjność obiektu, skala rejestracji obrazu oraz dodatkowe źródła światła na uzyskiwane wyniki pomiaru maksymalnej temperatury w strefie skrawania, dla procesu toczenia wzdłużnego stali 4H13. Wyniki z analizy obrazów termograficznych, porównano z wartościami teoretycznymi i wynikowymi uzyskanymi z komputerowej symulacji procesu toczenia wzdłużnego, uzyskanymi z obliczeń metodą elementów skończonych.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Kamerę termowizyjną typu FLIR SC620 połączono z komputerem z zainstalowanym oprogramowaniem "Therma CAM Researcher Pro 2.9", za pomocą którego rejestrowano i analizowano obrazy termograficzne w zadanym polu, przez wprowadzanie punktów pomiarowych, obszarów (okrąg, prostokąt), linii i izoterm. Kamerę wyposażono w dwa obiektywy stałoogniskowe 37mm i 76mm. Podstawowe parametry techniczne kamery przedstawiono na rys. 1. Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym wyposażonym w tokarkę Masterturn 400 wraz z oprzyrządowaniem do rejestracji obrazów termograficznych procesu skrawania (rys. 2). Zastosowane oprzyrządowanie pozwala na umieszczenie kamery termowizyjnej w różnej odległości i pod dowolnym kątem od badanego obiektu, z zapewnieniem wymaganej sztywności.

b)

a)

a)	
Pole widzenia/min. ogniskowa	24 [°] x18 [°] /0,3m
Czułość termiczna, ⁰ C	< 0,065
Częstotliwość obrazu, Hz	30
Тур	FPA mikrobowo
Pasmo działania, µm	7,5-13
Rozdzielczość, piksel	640x480
Zakres temperaturowy, ⁰ C	-40 ÷ +500
Dokładność	$\pm 2^{0}$ C lub 2%
Emisyjność	0,01 do 1
Wymiary LxWxH, mm	324x144x147

Rys. 1. Kamera termowizyjna FLIR SC620, a) wybrane parametry techniczne, b) kamera Fig. 1. Infrared camera FLIR SC620, a) selected technical parameters, b) camera

Próby skrawania przeprowadzono dla procesu toczenia wałka płytką WNMG 080408 z łamaczem wióra "MF" umieszczoną w oprawce MWLNR 2020-K08. Stosowano płytki z pokryciem TiAlN na podłożu z 6% zawartością Co. Na rys. 2 przedstawiono fotografię stanowiska badawczego oraz wymiary geometryczne narzędzia skrawającego.

Badania przeprowadzono ze stałą prędkością skrawania $v_c = 240$ m/min i głębokością skrawania $a_p = 1$ mm oraz posuwie f = 0,1-0,3mm/obr. Pomiarów dokonywano przy temperaturze otoczenia wynoszącej 20°C i wilgotności powietrza 50%.



Rys. 2. a) Fotografia stanowiska badawczego b) zakres pracy łamacza MF Fig. 2. a) Photography of measurement system b) chip breaker area

Numer próby	1	2	3	4	5	6	7	8
Posuw f mm/obr	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Długość a mm	0	0	0	0	0	-300	300	0
Długość b mm	0	0	0	0	200	0	0	0
Kąt a	90°	90°	90°	90°	90°	-70°	70°	90°
Kąt β	90°	90°	90°	90°	75°	90°	90°	90°
Skala rejestracji	1:1	1:1	2:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
Dodatkowe źródła światła	-	-	-	-	-	-	-	+
	Numer próby Posuw f mm/obr Długość a mm Długość b mm Kąt α Kąt β Skala rejestracji Dodatkowe źródła światła	Numer próby1Posuw f mm/obr0,1Długość a mm0Długość b mm0Kąt α90°Kąt β90°Skala rejestracji1:1Dodatkowe źródła światła-	Numer próby12Posuw f mm/obr0,10,3Długość a mm00Długość b mm00Długość b mm00Kąt a90°90°Kąt β90°90°Skala rejestracji1:11:1Dodatkowe źródła światła	Numer próby 1 2 3 Posuw f mm/obr 0,1 0,3 0,3 Długość a mm 0 0 0 0 Długość b mm 0 0 0 0 Kąt a 90° 90° 90° 90° Kąt β 90° 90° 90° 90° Skala rejestracji 1:1 1:1 2:1 Dodatkowe źródła światła - - -	Numer próby 1 2 3 4 Posuw f mm/obr 0,1 0,3 0,3 0,3 Długość a mm 0 0 0 0 0 Długość a mm 0 0 0 0 0 Długość b mm 0 0 0 0 0 Kąt a 90° 90° 90° 90° 90° Kąt β 90° 90° 90° 90° 90° Skala rejestracji 1:1 1:1 2:1 1:1 Dodatkowe źródła - - - -	Numer próby 1 2 3 4 5 Posuw f mm/obr 0,1 0,3 0,3 0,3 0,3 Długość a mm 0 0 0 0 0 0 Długość b mm 0 0 0 0 0 0 Kąt a 90° 90° 90° 90° 90° 90° Kąt β 90° 90° 90° 90° 75° Skala rejestracji 1:1 1:1 2:1 1:1 1:1 Dodatkowe źródła - - - - -	Numer próby 1 2 3 4 5 6 Posuw f mm/obr 0,1 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 Długość a mm 0 0 0 0 0 -300 Długość b mm 0 0 0 0 0 -300 Kąt a 90° 90° 90° 90° 90° -70° Kąt β 90° 90° 90° 90° 90° -70° Skala rejestracji 1:1 1:1 2:1 1:1 1:1 1:1 Dodatkowe źródła - - - - - -	Numer próby 1 2 3 4 5 6 7 Posuw f mm/obr 0,1 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 Długość a mm 0 0 0 0 0 -300 300 Długość b mm 0 0 0 0 200 0 0 Kąt a 90° 90° 90° 90° 90° 75° 90° 90° Kąt β 90° 90° 90° 90° 75° 90° 90° Skala rejestracji 1:1 1:1 2:1 1:1 1:1 1:1 1:1 Dodatkowe źródła - - - - - - -

Rys. 3. Położenia kamery termowizyjnej oraz parametry pomiarowe podczas prób skrawania Fig. 3. Position of the infrared camera and measuring parameters during the cutting tests

Analizie poddano wpływ wybranych parametrów rejestracji obrazu termowizyjnego (takich jak: kąt obserwacji kamery, współczynnik emisyjności, skala rejestracji obrazu, dodatkowe źródła światła) na uzyskiwane wyniki pomiaru wartości temperatury w strefie skrawania. Przeprowadzono szereg prób różniących się sposobem realizacji pomiaru zgodnie z danymi przedstawionymi na rys. 3.

W próbie numer 3 wprowadzono zmiany w konfiguracji kamery tak, aby rejestrowała ona obraz w skali 2:1. Natomiast w próbie 4, w celu przeprowadzenia analizy wpływu refleksów światła odbitego od powierzchni przedmiotu obrabianego na obiekt, naniesiono amorficzną postać węgla. Ostatnią próbę przeprowadzono z dodatkowym źródłem światła zimnego, tj. zastosowano dwa reflektory firmy Dedocool, umieszczone w odległości 400 mm od toczonego wałka.

Materiałem obrabianym była stal chromowo-martenzytyczna 4H13, odporna na korozję powodowaną czynnikami atmosferycznymi (korozja gazowa), roztworami alkalicznymi i rozcieńczonymi kwasami. Materiał ten jest stosowany na części maszyn i elementy form, np. noże, sprężyny, narzędzia medyczne i gospodarstwa domowego, wkładki form do tworzyw. Stal charakteryzuje się dużą czułością na pęknięcia naprężeniowe i nie nadaje się do spawania. Do analizy wyników badań wyznaczono emisyjność $\varepsilon = 0,35$. Skład chemiczny oraz właściwości fizyczne materiału obrabianego zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości stali 4H13 Table 1. Composition of 4H13 alloy steel

								Właściwości mechaniczne i fizyczne						
		Sl	cład ch	d chemiczny				Granica plastyczności <u>Re (Rp_{0.2}) min.</u> 345 MPa	Wytrzymałość na rozciąganie Rm <780 MPa	Gęstość przy 20°C 7,7 kg/dm ³	Moduł sprężystości przy 20°C 215 GPa	-		
<u>C</u>	Mn	S1	Р	S	Cr	V	Mo	IVIF a	Ivir a	kg/ulli	UF a	_		
0,45	0,5	0,6	max 0,04	max 0,03	13,5	0,2	0,5	Współczynnik rozszerzalności termicznej 20°C ÷ 400°C	Współczynnik przewodz. ciepła	Ciepło właściwe przy 20°C	Opór właściwy			
								12,0 10^{-6} x K^{-1}	30 W/(m:K)	460 I/(kg x K)	0,55 Oxmm ² /m	-		

3. ANALIZA WYNIKÓW

Na rys. 4 przedstawiono przykład obrazów termograficznych uzyskanych podczas badań doświadczalnych.

Analiza wyników wykazała, że najwyższą wartość średniej temperatury maksymalnej w czasie skrawania, która wyniosła $T_{max_sr} = 417^{\circ}$ C, uzyskano podczas próby nr 7 dla kąta obserwacji badanego obiektu $\alpha = 70^{\circ}$. Wartość ta różniła się o 10% w porównaniu do wartości średniej uzyskanej w pomiarze, w którym kamera usytuowana była prostopadle do powierzchni natarcia ostrza skrawającego.



Rys. 4. Graficzny wynik pomiaru temperatury w próbie 2 Fig. 4. Temperature measurement results in test 2

Najniższa średnia temperatura maksymalna $T_{max_śr} = 367^{\circ}$ C wystąpiła w próbie nr 8, w której wprowadzono dodatkowe źródło światła generujące tłumienie promieniowania obrabianego wałka. Wyniki badań wartości temperatury we wszystkich próbach przedstawiono w tabeli 2.

Trzykrotne zwiększenie posuwu z wartości f = 0,1mm/obr do f = 0,3mm/obr spowodowało pomijalną zmianę różnicy zarejestrowanej średniej temperatury maksymalnej. W wyniku zmiany skalowania rejestracji obrazu na 2-krotne powiększenie, uzyskana wartość temperatury była niższa o 2% w odniesieniu do skali 1x. Naniesienie na toczony wałek amorficznej warstwy węgla, w celu zniwelowania pojawiających się na powierzchni wałka refleksów światła odbitego, nie spowodowało znaczących zmian w uzyskanych wynikach pomiaru maksymalnej temperatury.

Nr Próby	1	2	3	4	5	6	7	8
T_{max} , °C	414	416	395	414	411	384	443	383
<i>T_{max_śr},</i> ℃C	383	380	374	394	389	369	417	367
Procentowa zmiana wartości temperatury w odniesieniu do pomiaru prostopadłego w próbie "2"	1%	-	2%	4%	2%	3%	10%	3%

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiaru temperatury kamerą termowizyjną Table 2. Summary of the results of temperature measurements

Wyniki uzyskane za pomocą analizy termograficznej porównano z rozkładem temperatury uzyskanym podczas symulacji z zastosowaniem oprogramowania do termomechanicznej analizy danych DEFORM. W obliczeniach i przy definiowaniu warunków brzegowych przyjęto następujące uproszczenia:

- zaniechano obliczania temperatury występującej w narzędziu skrawającym,
- symulację procesu toczenie przeprowadzono na długości równej 1/8 obrotu przedmiotu obrabianego będącego w stanie ustalonym ($T \approx \text{const.}$),
- uwzględniono właściwości termofizyczne materiału powłoki narzędzia,
- przyjęto gęstość siatki w zakresie od 5000 do 50000,
- zaprojektowano zagęszczenie siatki w obszarze strefy skrawania poprzez stosowanie "remeshingu".

Model trójwymiarowej geometrii płytki skrawającej, z uwzględnieniem geometrii ostrza skrawającego, w tym promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, oraz łamaczem wióra typu "MF" przedstawiono na rys. 5. Geometrię wałka (rys. 6) ustalono w module "preprocessingu" oprogramowania DEFORM, jako wartość wynikową ustalonej średnicy toczonego wałka wraz z zadaną głębokością skrawania. Zdefiniowano parametry cechujące proces toczenia, jego środowisko, a także właściwości materiału obrabianego. Uwzględniono rzeczywisty kąt natarcia i kąt pochylenia pomocniczej krawędzi skrawającej dla kąta przystawienia wynoszącego $\kappa = 95^\circ$.





Rys. 5. Widok zamodelowanej płytki do toczenia w programie Solidworks Fig. 5. Model of insert made in Solidworks

Rys. 6. Okno główne preprocesora programu DEFORM, z zamodelowanym procesem toczenia
Fig. 6. The main window of the program DEFORM pre-processor with model of turning process



Rys. 7. Rozkład temperatury w procesie toczenia Fig. 7. Temperature distribution in the process of turning



Rys. 8. Przebieg temperatury w czasie zarejestrowany podczas symulacji procesu toczenia Fig. 8. Temperature in time during the turning process simulation

Najwyższa wartość temperatury podczas komputerowej symulacji procesu wyniosła $T_{max_sym} = 803$ °C w obszarze tarcia odkształcanego materiału o powierzchnię natarcia na ostrzu, czyli w obszarze o największych naciskach (rys. 7). Uzyskany drogą symulacji rozkład temperaturowy jest zgodny z typowymi rozkładami [5],[14]. Przebieg maksymalnej temperatury w czasie w procesie toczenia został przedstawiony na rys. 8. Uzyskane w symulacji procesu wartości maksymalnej temperatury są dwukrotnie większe od wartości uzyskanych z pomiarów termowizyjnych. Należy jednak pamiętać, że dotyczą one bezpośrednio strefy styku materiału wióra o powierzchnię natarcia ostrza, natomiast w pomiarach termowizyjnych uzyskane wartości temperatury odnoszą się zewnętrznej strony tworzącego się wióra.

W nawiązaniu do rzeczywistych prób skrawania, w których analizowano wpływ kąta obserwacji kamerą termowizyjną procesu toczenia na wartość temperatury oraz nierównomiernego rozkładu temperatury, jaki występuje w strefie skrawania i obszarze towarzyszącym, postanowiono poddać analizie zależność temperatury od perspektywy obserwacji strefy odkształcenia uzyskanej w symulacji komputerowej (rys. 9).





Maksymalna temperatura: $T_{max} = 410^{\circ}$ C



Rys. 9. Maksymalna wartość temperatury w zależności od perspektywy zobrazowania procesu Fig. 9. The maximum temperature value in depending on the perspective of the imaging process

W pierwszym przypadku, tworzący się wiór, w skuteczny sposób "zakrywa" strefę skrawania, uniemożliwiając rejestrację temperatury występującej na powierzchni tarcia o powierzchnię natarcia ostrza. Wyznaczona maksymalna temperatura w tym przypadku wyniosła $T_{max} = 410$ °C.

W ujęciu od strony lewej, prócz znacznie bardziej wychłodzonego wióra, strefa skrawania jest częściowo przysłonięta nieobrobionym materiałem obrabianym. Wyznaczona wartość maksymalnej temperatury wynosiła w tym przypadku $T_{max} = 350$ °C.

Najwyższą temperaturę można uzyskać obserwując proces od strony prawej. Widoczny jest powstający silnie nagrzany wiór o temperaturze osiągającej $T_{max} = 590$ °C.

Korzystając z analiz przestawionych przez autorów w pracach [11],[12], dotyczących temperatury skrawania, obliczono teoretyczne wartości temperatury w dwóch punktach wióra na podstawie wzorów (1) i (2). Na rys. 10 przedstawiono schemat powstawania wióra a na rys. 11 fotografie wiórów uzyskanych w trakcie badań doświadczalnych.

W punkcie P₃ wzór na wartość temperatury wióra przyjmuje postać:

$$T_{chP} - T_0 = \frac{F_c \cdot v_c \cdot \sin(\Phi)}{\rho \cdot c \cdot f \cdot a_p \cdot v_c \cdot \sin(\Phi)} = \frac{k_c}{\rho \cdot c}$$
(1)



Rys. 10. Powstawanie segmentów wióra podczas toczenia [12] Fig. 10. Chip segments formation in turning [12]

Rys. 11. Fotografia wióra powstałego podczas toczenia stali 4H13 dla: a) f = 0,1mm/obr, b) f = 0,3mm/obr oraz $a_p = 1$ mm, $v_c = 240$ m/min Fig. 11. Photography of chip formed during turning of steel 4H13: a) f = 0.1mm/rev, b) f = 0.3mm/rev and $a_p = 1$ mm, $v_c = 240$ m/min

Wartość temperatury w punkcie D[']₃ (jest to punkt należący do wióra pokrywający się z punktem D) wyraża zależność:

$$T_{chD} - T_0 = \frac{F_c \cdot v_c \cdot \sin(\Phi)}{\rho \cdot c \cdot v_{ch} \cdot f \cdot a_p \cdot \cos(\Phi - \gamma_n)} = \frac{k_c \cdot \Lambda \cdot \sin(\Phi)}{\rho \cdot c \cdot \cos(\Phi - \gamma_n)}$$
(2)

Wzory (1) oraz (2) pozwalają na obliczenie wartości temperatury wióra tylko w dwu wymienionych punktach odcinka $D_3^P P_3$ (rys. 10).

W celu wykonania obliczeń przeprowadzono mikroskopowy pomiar grubości uzyskanych wiórów w procesie toczenia oraz określono wartości kąta ścinania oraz współczynnika spęczania. Na rys. 11 przedstawiono przykładowe fotografie wiórów.

Współczynnik spęczenia wióra obliczano korzystając z zależności:

$$\Lambda_h = \frac{l}{l_{ch}} \cong \frac{h_{ch}}{h_D} \tag{3}$$

Prędkość spływającego wióra obliczano z wzoru:

$$v_{ch} = \frac{v_c}{\Lambda_h} = v_c \cdot \frac{l_{ch}}{l} \cong v_c \cdot \frac{h_D}{h_{ch}}$$
(4)

Kąt ścinania obliczano z zależności:

$$\tan \Phi = \frac{\cos \gamma_n}{\Lambda_h - \sin \gamma_n} \tag{5}$$

Na podstawie wzorów (1) i (2) uzyskano wartości temperatury w punktach $T_{P3} = 748$ °C oraz $T_{D'3} = 421$ °C. Uzyskane wyniki są zbieżne z wynikami uzyskanymi za pomocą pomiarów termowizyjnych i symulacji komputerowej.



Rys. 12. Przebieg temperatury w funkcji czasu zarejestrowany w węźle podczas symulacji procesu toczenia Fig. 12. Temperature of the point at the time recorded during the turning process simulation

W trakcie symulacji komputerowej zaobserwowano, iż punktowo występująca wartość maksymalna temperatury ulega bardzo szybkiej zmianie w czasie formowania wióra. W celu zobrazowania tego zjawiska posłużono się narzędziem "point tracking" służącym do śledzenia dowolnie wybranego węzła obliczanego elementu skończonego. Na rys. 12 przedstawiono przebieg temperatury w funkcji czasu, wybranego węzła związanego z wiórem o początkowo wysokiej wartości T = 720°C. Wykazano, że już po czasie t = 0,0020 s, wartość temperatury wióra spada o 200°C do wartości poniżej T = 500°C.

4. WNIOSKI

Średnią wartość maksymalnej temperatury zarejestrowanej podczas badań eksperymentalnych, uzyskano przy położeniu kamery przesuniętej o 300mm w stosunku do położenia prostopadłego, a co za tym idzie zmianie kąta obserwacji strefy skrawania. Wartość temperatury w tym pomiarze była o 10% wyższa niż w przypadku pomiaru realizowanego przy kącie obserwacji równym 90 stopni. Uzyskany wynik jest najbliższy wynikowi otrzymanemu w komputerowej symulacji procesu.

Różnica w ocenie wartości temperatury wynika ze zmiany emisyjności zależnej od kąta obserwacji. Dodatkowym czynnikiem może być wpływ "odsłonięcia" strefy skrawania, co jest zgodne z wynikami uzyskanymi drogą MES.

Niewielka zmiana kąta obserwacji powoduje znikomy wpływ na mierzone wartości temperatury. Najniższą wartość temperatury zaobserwowano podczas realizacji próby polegającej na wprowadzeniu dodatkowego, sztucznego oświetlenia obserwowanego

obiektu. Wynik ten jest najprawdopodobniej uwarunkowany zwiększeniem "promieniowania odbiciowego", powodującego tłumienie promieniowania rozpatrywanej strefy. Należy pamiętać, że w wyniku nałożenia się kilku czynników tłumiących promieniowanie podczerwone, może dojść do błędnego odczytania wartości temperatury.

Analizując wyniki rozkładu temperatury uzyskane drogą symulacji procesu w odniesieniu do wyników z pomiarów, stwierdzono rozbieżne wyniki dotyczące wartości maksymalnej temperatury w strefie skrawania. Najwyższa wartość temperatury uzyskana w symulacji wyniosła T_{max} =804°C, co w odniesieniu do wyniku zarejestrowanego przez kamerę termowizyjną T_{max} = 443°C przekłada się na różnicę wynoszącą 55%.

A_{ch}	- pole przekroju wióra	m^2
A_D	- nominalne pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej	m^2
a_p	- głębokość skrawania	m, mm
b_{ch}	- szerokość wióra	m, mm
b_D	- nominalna szerokość warstwy skrawanej	m, mm
С	- ciepło właściwe	J/(kg·K)
Δx	- podziałka segmentów wióra, podziałka wióra	m, mm
f	- posuw	m/obr, mm/obr
F_c	- siła skrawania (składowa obwodowa całkowitej siły skrawania)	N
Φ	- kąt ścinania	deg
Ϋ́n	- kąt natarcia normalny (narzędzia)	deg
h_{ch}	- grubość wióra	m, mm
h_D	- nominalna grubość warstwy skrawanej	m, mm
k_c	- właściwy opór skrawania	Pa
l	- długość, długość warstwy skrawanej	m, mm
l_{ch}	- długość wióra	m, mm
λ	- współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
Λ_h	- współczynnik spęczenia wióra	
Т	- temperatura	K, ⁰ C
T_{ch}	- temperatura wióra	K, ⁰ C
T_0	- temperatura otoczenia	K, ⁰ C
v _c	- prędkość skrawania	m/s
V _{ch}	- prędkość spływającego wióra	m/s

Załącznik 1. WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

LITERATURA

- [1] BALAJI A.K., SREERAM G., JAWAHIR I. S., LENZ E., 1999, *The effects of cutting tool conductivity on tool-chip contact length and cyclic chip formation in machining with grooved tools*, Annals of the CIRP, 48/1, 33-38.
- [2] CHOU Y. K., EVANS C. J., 1999, *White layers and thermal modeling of hard turned surfaces*. International Journal of Machine Tools, Manufacture, 39, 1863-1881.
- [3] GRZESIK W., 1998, Podstawy skrawania materiałów metalowych, WNT, Warszawa.
- [4] GRZESIK W., 2001, An investigation of the thermal effects in orthogonal cutting associated with multi-layer coatings, Annals of the CIRP, 50/1, 53-56.
- [5] GRZESIK W., Analytical models based on composite layer for computation of tool-chip interface temperature in machining steels with multilayer coated cutting tools, Annals of the CIRP, 54/1, 91-94.
- [6] JEMIELNIAK K., 2004, Obróbka skrawaniem, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

- [7] JÓZWIK J., 2002, Termograficzna analiza rozkładu temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego podczas toczenia nieortogonalnego, Przegląd Mechaniczny, 4, 24-28.
- [8] KAWALEC M., KODYM J., JANKOWIAK M., 1984, Laboratorium procesu skrawania, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [9] LIS K., 2006, *Problem emisyjności w pomiarach pirometrycznych temperatury*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 2.
- [10] MANDURY H., 2004, Pomiary termowizyjne w praktyce, Agenda Wydawnicza Paku, Warszawa.
- [11] MIERNIKIEWICZ A., PRZYBYLSKI L., 2004, Temperatura skrawania. Część I. Badania teoretyczne. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 24/2.
- [12] MIERNIKIEWICZ A., PRZYBYLSKI L., 2004, Temperatura skrawania. Część II. Temperatura wióra. Badania doświadczalne, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 24/2, 49-60.
- [13] MINKINA W., 2004, Pomiary termowizyjne przyrządy i metody, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej.
- [14] ÖZEL T., 2006, The influence of friction models on finite element simulation of machining, Int. J. Mach. Tools Manuf., 46, 518-530.
- [15] QI H. S., MILLS B., 2000, *Chip formation of a transfer layer at the tool-chip interface during machining*, Wear, 245, 136-147.
- [16] STORCH B., 2011, Podstawy obróbki skrawaniem, Wydaw. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- [17] STÓS J., 2008, Obróbka skrawaniem innowacje, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków.
- [18] ZĘBALA W., 2010, *Milling optimization of difficult to machine alloys*, Management and Production Engineering Review, 1/1, 59-70.
- [19] ZEBALA W., 2012, *Tool stiffness influence on the chosen physical parameters of the milling process*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, 60/3, 597-604.
- [20] ZĘBALA W., SIWIEC J., 2012, *Hard turning of cold work tool steel with CBN tools*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 36/4, 19-32.
- [21] ZEBALA W., SŁODKI B., 2013, Cutting data correction in Inconel 718 turning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65, 881-893.
- [22] ZĘBALA W., 2011, Modelowanie procesu toczenia materiałów trudnoskrawalnych, Czasopismo techniczne-Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 108/5M, 15, 135-148.
- [23] ZĘBALA W., SŁODKI B., STRUZIKIEWICZ G., 2013, Productivity and reliability improvement in turning Inconel 718 alloy – case study. Poprawa produktywności i niezawodności toczenia stopu Inconel 718 – studium przypadku, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 15/4, 421-426.

ANALYSIS OF TEMPERATURE MEASUREMENT CORRECTNESS IN CUTTING ZONE DURING 4H13 STEEL TURNING

The paper presents an analysis of the influence of selected measuring parameters of the infrared camera and the direction of observation of the longitudinal turning on the value of the maximum temperature of the chip obtained from the thermographic images. The results of measurements of the maximum temperature in the cutting zone for variable factors such as the angle of the thermal image registration, scale of magnification, additional light source are presented. A computer simulation of the temperature field distribution in the longitudinal turning of stainless steel 4H13 also was conducted.