

# TERMOGRAFICZNA OCENA ROZKŁADU TEMPERATURY NA POWIERZCHNI PRZEDMIOTU OBRABIANEGO PODCZAS TOCZENIA NIEORTOGONALNEGO

## THERMOGRAPHIC EVALUATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION ON SURFACE OF WORKPIECE DURING NON-ORTHOGONAL TURNING

*W artykule przedstawiono termograficzną analizę rozkładu temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego podczas toczenia nieortogonalnego. W postaci wykresów przedstawiono rozkład temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego w funkcji położenia źródła ciepła oraz czasu. Pomiarzy prowadzono przy użyciu kamery termograficznej typu V-20ER005-25 wyprodukowanej przez firmę VIGO SYSTEM z Warszawy. Dane termograficzne analizowano przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania TERMOGRAF v.1.95 c.*

*The thermographic analysis of temperature distribution on surface of workpiece during non-orthogonal turning is presented in the article. The distribution of temperature on the surface of workpiece in function of moving heat source and time is shown in form of graphs. Measurements were performed with thermographic camera of V-20ER005-25 type, produced by VIGO SYSTEM in Warsaw. Thermographic data were analysed with specialistic THERMOGRAPH v. 1. 95 c software.*

### 1. Wprowadzenie

Skrawanie materiału jest procesem, któremu towarzyszą naprężenia oraz odkształcenia sprężyste i plastyczne [1, 2]. W obszarach intensywnych oddziaływań fizycznych generowane są znaczne ilości ciepła [3]. Wymiana ciepła w układzie przedmiot obrabiany - narzędzie prowadzi do znacznych przyrostów wartości temperatury elementów tego systemu [1-3]. Istotnym zjawiskiem związanym ze zmianą wartości temperatury przedmiotu obrabianego jest zmiana jego wymiarów liniowych. Wzrastająca amplituda drgań atomów ciała prowadzi do wzrostu średniej odległości między nimi, a więc rozszerzenia całego ciała. Zjawisko rozszerzania ciała pod wpływem zmian jego temperatury powoduje powstawanie odkształceń cieplnych, które jak podaje literatura [4], są jednymi z głównych źródeł błędów obróbkowych. Ocenia się, że w obróbce precyzyjnej błędy powodowane przez czynniki termiczne stanowią od 40 do 70% całkowitego błędu wykonania przedmiotu. Systemy kompensacji przemieszczeń cieplnych wymagają ciągłej, szybkiej i bezinwazyjnej metody określania temperatury elementów układu obróbkowego. Zadanie to stosunkowo dobrze realizowane jest dzięki coraz częściej stosowanej technice termograficznej, wykorzystującej informację zawartą w sygnałach cieplnych emitowanych z powierzchni badanych obiektów [5-7]. W mechanice, technikę termograficzną wykorzystuje się zarówno do określania zmian temperatury urządzeń i maszyn technologicznych [6], jak również w badaniach procesów fizycznych zachodzących podczas odkształcania ciał [5, 7].

### 2. Generowanie ciepła w strefie skrawania i skutki jego oddziaływań

Jednym z procesów fizycznych towarzyszących skrawaniu materiałów jest generowanie znacznych ilości ciepła. Ciepło generowane jest w każdej ze stref fizycznych oddziaływań ostrza narzędzia na przedmiot obrabiany. Źródłami generowanego ciepła w strefie skrawania jest praca odkształceń plastycznych i sprężystych oraz dekohezji materiału, praca sił tarcia na powierzchni narzędzia i przyłożenia oraz praca odkształceń plastycznych poprzedzających poślizg i przenikających do warstwy wierzchniej [2]. Bezpośrednim efektem powstającego ciepła jest wzrost temperatu-

ry przedmiotu obrabianego oraz narzędzia. W badaniach fizycznych procesu skrawania znajomość temperatury w strefie obróbki, przedmiotu oraz narzędzia, odgrywa istotną rolę i jest przedmiotem badań w wielu ośrodkach naukowych w kraju i zagranicą [7-15]. To właśnie od niej zależą takie mechanizmy jak: zużywanie ostrza narzędzia, mechanizm tworzenia wióra, konstytuowanie warstwy wierzchniej, wielkość odkształceń cieplnych itp. [2].

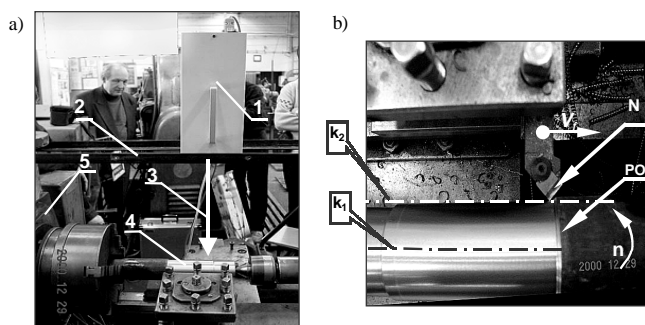
Jak podaje literatura [4] wzrost temperatury przedmiotu oraz narzędzia podczas skrawania w istotny sposób przyczynia się do powstawania znacznych niedokładności obróbki. Skutki przepływu ciepła mogą objawiać się w dwojaki sposób: powodować zmiany wymiarów liniowych przedmiotu obrabianego i narzędzia oraz powodować deformacje będące efektem nierównomiernego jej rozkładu. Materiały obrabiane (najczęściej stale) pod wpływem ciepła ulegają rozszerzaniu. Prowadzenie obróbki przy wzrastających wymiarach liniowych obrabianego przedmiotu oraz narzędzia, może powodować zmiany głębokości skrawania, a przez to istotne błędy kształtu gotowego produktu. Problem ten jest szczególnie zauważalny w przypadku wieloprześciowej obróbki przedmiotów cienkościennych, podatnych na działanie ciepła. Zapewnienie wymaganej dokładności wykonania przy zachowaniu wysokiej wydajności obróbki stanowi jeden z najgłośniejszych problemów wytwarzania. Utrzymanie zadowalającego stopnia zgodności gotowej części z wymaganiami wymiarowymi i geometrycznymi, to ciągłe wyzwanie współczesnych systemów wytwarzania, będące jednocześnie motorem ich rozwoju. Poznanie zakresu i charakteru zmian temperatury elementów systemu obróbkowego, przyczyni się do przynajmniej częściowego skompensowania niekorzystnych oddziaływań cieplnych na dokładność wymiarowo - kształtową przedmiotów obrabianych. O istotnym znaczeniu problemu cieplnych i sprężystych odkształceń przedmiotów, szczególnie poddawanych szybkościowej obróbce skrawaniem, może świadczyć obecność tej tematyki w znaczącej literaturze fachowej. Problem kompensacji przemieszczeń powodowanych ciepłem generowanym w strefie skrawania koncentruje się wokół dwóch istotnych kierunków badań. Jeden z nich jest związany z rozwojem komputerowego modelu symulacji zachowania się narzędzia oraz przedmiotu obrabianego pod wpływem

powstającego ciepła, zaś drugi to próba stworzenia prognostycznego (na podstawie symptomów termalnych) modelu przemieszczeń ciepłych przedmiotu obrabianego oraz narzędzia i wykorzystanie go w procedurach systemów kompensacji w trybie *on-line* [16].

### 3. Stanowisko badawcze i przebieg eksperymentu

Jednym z podstawowych etapów oceny wpływu ciepła generowanego w strefie skrawania na dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotów po obróbce jest znajomość rozkładu wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego oraz narzędzia. W tym celu przeprowadzono badania, mające na celu ustalenie charakteru zmian wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego podczas toczenia nieortogonalnego. Pomiar i rejestrację wartości temperatury prowadzono w podczerwieni przy wykorzystaniu kamery termograficznej *V-20ER005-25*, wyprodukowanej przez firmę *VIGO System* z Warszawy. Proces skrawania prowadzono na tokarce uniwersalnej *CS 401*, przy ustalonych technologicznych parametrach obróbki ( $v_c=150\text{m/min}$ ,  $a_p=1\text{mm}$ ,  $f=0.18\text{ mm/obr}$ ). Toczeniu poddawano wałki ze stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości 45 o średnicy 100 mm, bez chłodzenia. Zastosowano nóż tokarski składany NNZa 20x20 z mocowanym mechanicznie ostrzem z węglika spiekane *S20*. Podstawowe zespoły funkcjonalne stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1a.

Wskutek detekcji promieniowania ciepłego generowanego w strefie skrawania oraz przewodzonego przez elementy systemu obróbkowego, rejestrowano obrazy termalne przedstawiające rozkład wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego. Po uruchomieniu opcji skanera liniowego rejestrowano wartości temperatury wzdłuż wybranej z termogramu linii. Rejestracji, a następnie analizie poddano rozkład temperatury wzdłuż tworzącej przedmiotu obrabianego, leżącej w płaszczyźnie pionowej, przechodzącej przez oś symetrii obrabianego przedmiotu (oś  $k_1$ ) oraz wzdłuż tworzącej leżącej w płaszczyźnie poziomej - na styku z wierzchołkiem ostrza narzędzia skrawającego (oś  $k_2$ ).

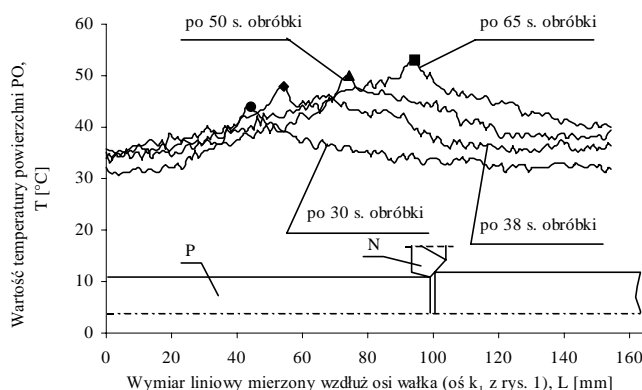


Rys. 1. Stanowisko badawcze: a) podstawowe zespoły funkcjonalne, b) położenie osi obserwacji  $k_1$  oraz  $k_2$ , 1 - kamera termograficzna *V-20ER005-25*, 2 - układ mocowania kamery na obrabiarce, 3 - kierunek obserwacji, 4 - przedmiot obrabiany PO, 5 - tokarka uniwersalna *CS 401*,  $V_f$  - prędkość ruchu posuwowego,  $n$  - prędkość obrotowa PO.

Położenie poszczególnych osi obserwacji przedstawiono na rys. 1b. Oś  $k_2$  przechodzi przez strefę intensywnych oddziaływań fizycznych ostrza narzędzia na przedmiot obrabiany oraz powierzchnię obrabianą.

Komunikację z kamerą, akwizycję i analizę gromadzonych danych termograficznych prowadzono przy zastosowaniu specjalistycznego oprogramowania *TERMOGRAF v. 95 c*.

### 4. Analiza rozkładu temperatury na powierzchni przedmiotu podczas toczenia nieortogonalnego

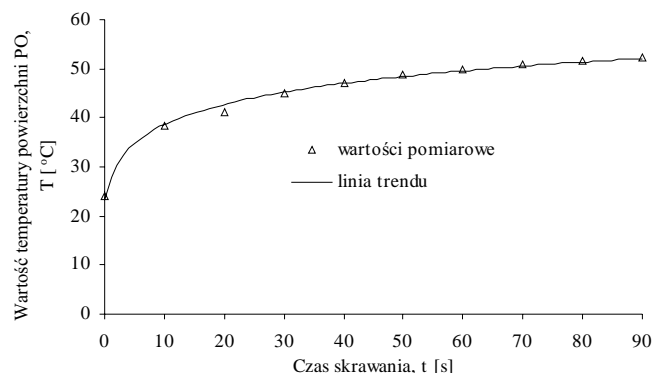


Rys. 2. Rozkład wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego w funkcji położenia źródła ciepła, zarejestrowany wzdłuż osi obserwacji  $k_1$

Analizie poddano rozkład wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego w trakcie procesu skrawania. Prezentowane na rys. 2 charakterystyczne przebiegi zmian wartości temperatury powierzchni PO, uzyskano wykorzystując opcję skanera liniowego kamery *V-20ER005-25*. Obserwację prowadzono wzdłuż osi skanowania oznaczonej na rys. 1b jako  $k_1$ .

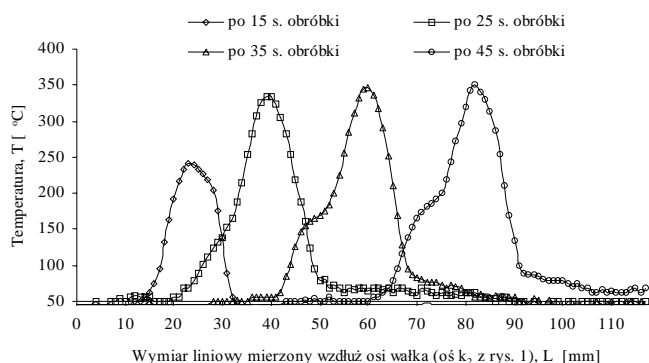
Jak wynika z zaprezentowanych na rys. 2 charakterystyk, temperatura powierzchni przedmiotu obrabianego wzdłuż analizowanej osi, osiąga dla przyjętych warunków skrawania oraz cech geometrycznych przygotówki, maksymalną wartość rzędu  $40\div 55^\circ\text{C}$ . Zaobserwowano wyraźny wzrost wartości temperatury wraz z upływem czasu skrawania. Wzdłuż obrabianego wałka występuje gradient temperatury, którego wzrost wartości koncentruje się w pobliżu źródła ciepła (kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym). Zaobserwowano maksimum temperatury przemieszcza się zgodnie z wektorem prędkości ruchu posuwowego narzędzia. Jednocześnie, w miarę oddalania się źródła ciepła od powierzchni czołowej toczonego wałka, intensyfikuje się proces wymiany ciepła z otoczeniem, czego wynikiem jest obniżanie się wartości temperatury powierzchni obrabianej.

Na rys. 3 zaprezentowano przebieg czasowy zmian wartości temperatury powierzchni przedmiotu obrabianego. Przedstawioną na wykresie linię trendu zmian wartości temperatury uzyskano w wyniku aproksymacji wartości dyskretnych wielomianem trzeciego stopnia. Maksymalna wartość temperatury powierzchni przedmiotu obrabianego wzrasta w całym przedziale czasowym obróbki, dążąc do



Rys. 3. Charakter zmian maksymalnej wartości temperatury powierzchni przedmiotu obrabianego mierzony wzdłuż osi obserwacji  $k_1$ , w funkcji czasu

wartości ustalonej. Dla przeprowadzonych prób toczenia nieortogonalnego, temperatura powierzchni przedmiotu obrabianego przyjmuje powtarzalny charakter zmian w szerokim zakresie technologicznych parametrów obróbki.



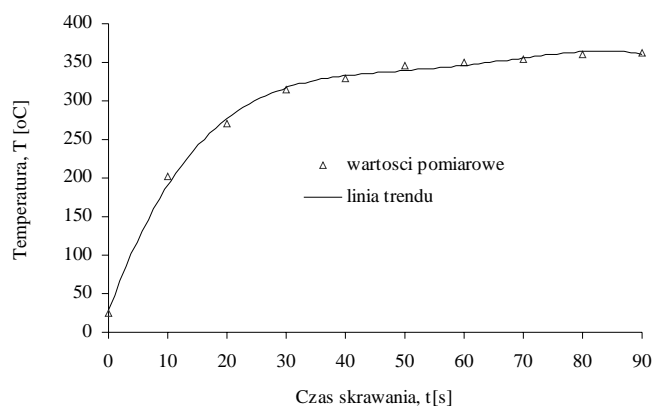
Rys. 4. Rozkład wartości temperatury zarejestrowany wzdłuż osi obserwacji  $k_2$  w funkcji położenia źródła ciepła

Na rys. 4 przedstawiono charakter zmian wartości temperatury zarejestrowanej wzdłuż osi obserwacji  $k_2$  z rys. 1b, przechodzącej przez strefę styku ostrza narzędzia z przedmiotem obrabianym.

Jak wynika z prezentowanych charakterystyk maksymalna temperatura zarejestrowana wzdłuż osi  $k_2$  przyjmuje wartości rzędu  $300 \div 350^\circ\text{C}$ . Dotyczy ona bezpośrednio powierzchni warstwy materiału przetwarzanej w wiór. Okazuje się, że wskutek oddziaływania ruchomego źródła ciepła maksymalna temperatura przetwarzanego w wiór materiału jest o rząd wielkości wyższa w stosunku do najwyższej temperatury powierzchni, rejestrowanej wzdłuż osi  $k_1$  (por. rys. 2). Istotne różnice wartości temperatury w stosunku do wyników pomiarów rejestrowanych wzdłuż osi  $k_1$ , wynikają z intensywnych oddziaływań fizycznych ostrza narzędzia skrawającego na przedmiot obrabiany. Odształcenia plastyczne i sprężyste warstwy skrawanej oraz dekohezja materiału są głównymi źródłami generowanego ciepła w tej strefie. Z uzyskanych charakterystyk wynika, że temperatura powierzchni materiału przetwarzanego w wiór, jak również strefa objęta jej wpływem, wzrasta wraz z czasem skrawania.

Na rys. 5 zaprezentowano charakter zmian maksymalnej wartości temperatury mierzonej wzdłuż osi  $k_2$  w funkcji czasu. Podobnie jak w przypadku prezentowanym na rys. 3, zaobserwowano inercyjny charakter zmian wartości maksymalnej temperatury rejestrowanej

wzdłuż osi obserwacji  $k_2$  w całym przedziale czasowym obróbki, przy czym różnice wartości mierzonej temperatury są znaczne. Przedstawioną na wykresie linię trendu zmian wartości temperatury uzyskano w wyniku aproksymacji wartości dyskretnych wielomianem trzeciego stopnia.



Rys. 5. Charakter zmian maksymalnej wartości temperatury mierzonej wzdłuż osi  $k_2$  w funkcji czasu

## 5. Podsumowanie i wnioski

W oparciu o uzyskane wyniki badań można stwierdzić, że efektem oddziaływania ciepła generowanego w strefie skrawania na przedmiot obrabiany jest niejednorodny przyrost wartości temperatury powierzchni przedmiotu w kierunku równoległym do jego osi. Dla przyjętych w eksperymencie parametrów technologicznych obróbki i cech geometrycznych przygotówki oraz narzędzia, maksymalna temperatura powierzchni przedmiotu obrabianego osiąga wartości rzędu kilkudziesięciu stopni Celsjusza ( $40 \div 55^\circ\text{C}$ ), zaś w strefie intensywnych oddziaływań fizycznych ostrza narzędzi na przedmiot obrabiany –  $300 \div 350^\circ\text{C}$ . Zarówno temperatura powierzchni przedmiotu obrabianego jak również strefa objęta wpływem generowanego ciepła, wzrasta wraz z czasem skrawania i przemieszcza się zgodnie z wektorem prędkości ruchu posuwowego. Występujące gradienty temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego osiągają zróżnicowane wartości zależnie od położenia punktów powierzchni względem źródła ciepła, jakim jest strefa skrawania. Wartości maksymalne gradientu temperatury zaobserwowano w strefie kontaktu ostrza narzędzia z przedmiotem obrabianym. Zaobserwowano narastający charakter zmian wartości temperatury przed czołem źródła ciepła oraz jednoczesne obniżanie się wartości temperatury w miarę oddalania się źródła ciepła od powierzchni czołowej obrabianego wałka.

## 6. Literatura

- [1] Trent E.M.: *Metal cutting*. London, Butterworths 1989.
- [2] Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów metalowych*. WNT. Warszawa 1998
- [3] Reznikov A.N.: *Teplofizika processov mekhaničeskoj obrabotki materialov*. Moskwa, Mašinostroenie 1981.
- [4] Bryan J.: *International status of thermal error research*. Annals CIRP, 39 (2), pp. 645–656, 1990.
- [5] Gadaj S.P.: *Zastosowanie termografii w badaniach mechanicznych*. Przegląd Mechaniczny 5/97, s.10-19.
- [6] Poloszyk S., Różański L.: *Obraz termowizyjny jako symptom w diagnostyce termalnej maszyn technologicznych*. Termografia i termometria w podczerwieni. Wyd. Pol. Łódzkiej i PKOopto SEP. Łódź 2000.
- [7] Zębała W.: *Heat Transfer in the cutting zone*. V Międzynarodowe Sympozjum OSiN. Krynica 1997.
- [8] Józwick J.: *Termograficzna ocena rozkładu temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego podczas skrawania ortogonalnego*. Eksploatacja i Niezawodność, PAN i PN-TE, nr 2-3/2001, s. 64-78.
- [9] Józwick J.: *Modelowanie zjawisk cieplnych zachodzących w strefie skrawania przy wykorzystaniu sztucznej sieci neuronowej*. Ogólnokrajowa Konferencja – SKN i MPN, Białystok 1999.
- [10] Józwick J.: *Doświadczalna analiza rozkładu temperatury powierzchni przedmiotu obrabianego podczas toczenia*. IV Ogólnokrajowa

- Konferencja Naukowo-Techniczna. Postępy w technice wytwarzania maszyn. Postępy 2001. Kraków 2001.
- [11] Wójtowicz Cz.: *Metoda doświadczalno-teoretyczna obliczania ciepła w strefie kontaktu wióra z ostrzem skrawającym w różnych ośrodkach obróbki*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, z. 4, 1992.
  - [12] Cichosz P.: *Rozkład temperatury na powierzchniach roboczych ostrza ceramicznego znajdującego się w określonym stadium zużycia*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, z. 3-4, 1991.
  - [13] Childs T. H., Maekawa K., Maulik P.: *Effects of coolant on temperature distribution in metal machining*. Mat. Science Technol., vol. 4, November 1988, s. 1006-1019.
  - [14] Chu T. H., Wallbank J.: *Determination of the temperature of a machined surface*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 120, pp. 259-263, 1998.
  - [15] Dawson P. R., Malkin S.: *Inclined moving heat source model for calculating metal cutting temperatures*. Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 179-186, August 1984.
  - [16] Sartori S., Zhang G., X.: *Geometric error measurement and compensation of machines*. Annals CIRP, 44 (2), pp. 1-11, 1995.