

dr inż. Jerzy Józwik
Politechnika Lubelska

WYBRANE ZASTOSOWANIA POMIARÓW TERMOGRAFICZNYCH W OBRÓBCE SKRAWANIEM

Przedmiotem niniejszej pracy jest przedstawienie obszarów wykorzystania pomiarów termograficznych w obróbce skrawaniem. Zakres pracy obejmuje omówienie zagadnień generowania ciepła podczas procesu skrawania oraz pomiarów z wykorzystaniem systemów termograficznych. W pracy przedstawiono praktyczne obszary wykorzystania techniki termograficznej zarówno podczas oceny stanu cieplnego narzędzia skrawającego, ale także przedmiotu obrabianego i obrabiarki. Zaprezentowano również wybrane wyniki badań i analiz rozkładu temperatury obiektu z wykorzystaniem systemów termograficznych.

THE CHOSEN USAGE OF THERMOGRAPHIC MEASUREMENTS IN MACHINING

The article presents the areas of usage measurements in machining. The range of work includes the problems of heat generation during machining and measurement with using thermographic system. The article presents practical areas of using thermographic technique during evaluation of thermal state of cutting tool, workpiece and machine tool also. Author presents some of research and analysis results of object temperature distribution with using thermographic system.

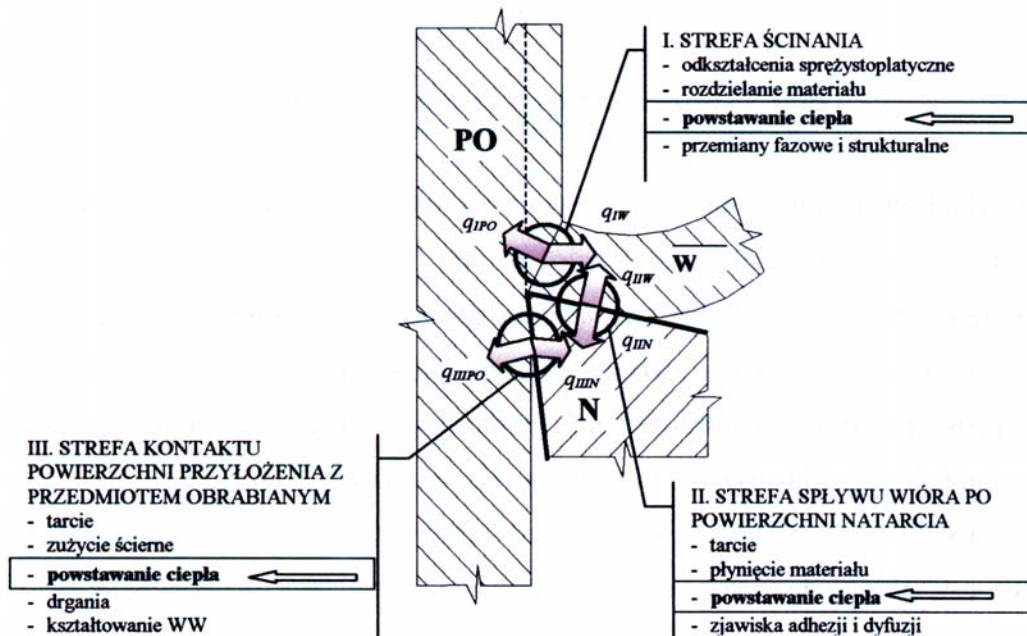
1. WPROWADZENIE

Zjawisko generowania i wymiany ciepła towarzyszy nieodzownie procesom obróbki skrawaniem [1-11]. Z analiz wynika [3-7], że ilość generowanego ciepła i intensywność jego powstawania związane są z szeregiem zjawisk fizycznych występujących podczas obróbki. Efektem przewodzenia ciepła przez elementy układu masowo-dyssypacyjno-sprężystego OUPN (Obrabiarka, Uchwyt, Przedmiot, Narzędzie) jest wzrost ich temperatury. Mechanizmy generowania ciepła dotyczą zarówno strefy skrawania [3, 4, 7, 8] ale również zespołów funkcjonalnych maszyn i urządzeń: silników napędowych, przekładni mechanicznych, węzłów łożyskowych itp. [5, 9-11]. Z badań prezentowanych w literaturze [3-5, 7-11] wynika, że jest ono skorelowane z szeregiem dynamicznych procesów mechanicznych oraz procesów destrukcyjnych zachodzących na maszynie. Ilość i intensywność generowanego ciepła wpływa na mechanizm zużycia ostrza narzędzia, mechanizm powstawania wióra, odkształcenia cieplne przedmiotu obrabianego i narzędzia ale także przekładni mechanicznych maszyny technologicznej [3-5, 7-11]. W efekcie, wskutek postępujących odkształceń cieplnych uzyskujemy obniżoną dokładność wymiarowo-kształtową wyrobu. Prezentowany artykuł ma charakter przeglądowy i wskazuje na obszary wykorzystania techniki termograficznej w obróbce skrawaniem. Zawiera również wybrane wyniki badań eksperymentalnych, bez wnikliwej ich analizy. Pogłębioną analizę wyników badań doświadczalnych oraz ich prezentację graficzną autor pracy zamierza obszernie przedstawić w kolejnych swoich pracach.

2. BADANIA TERMOGRAFICZNE W OBRÓBCE SKRAWANIEM

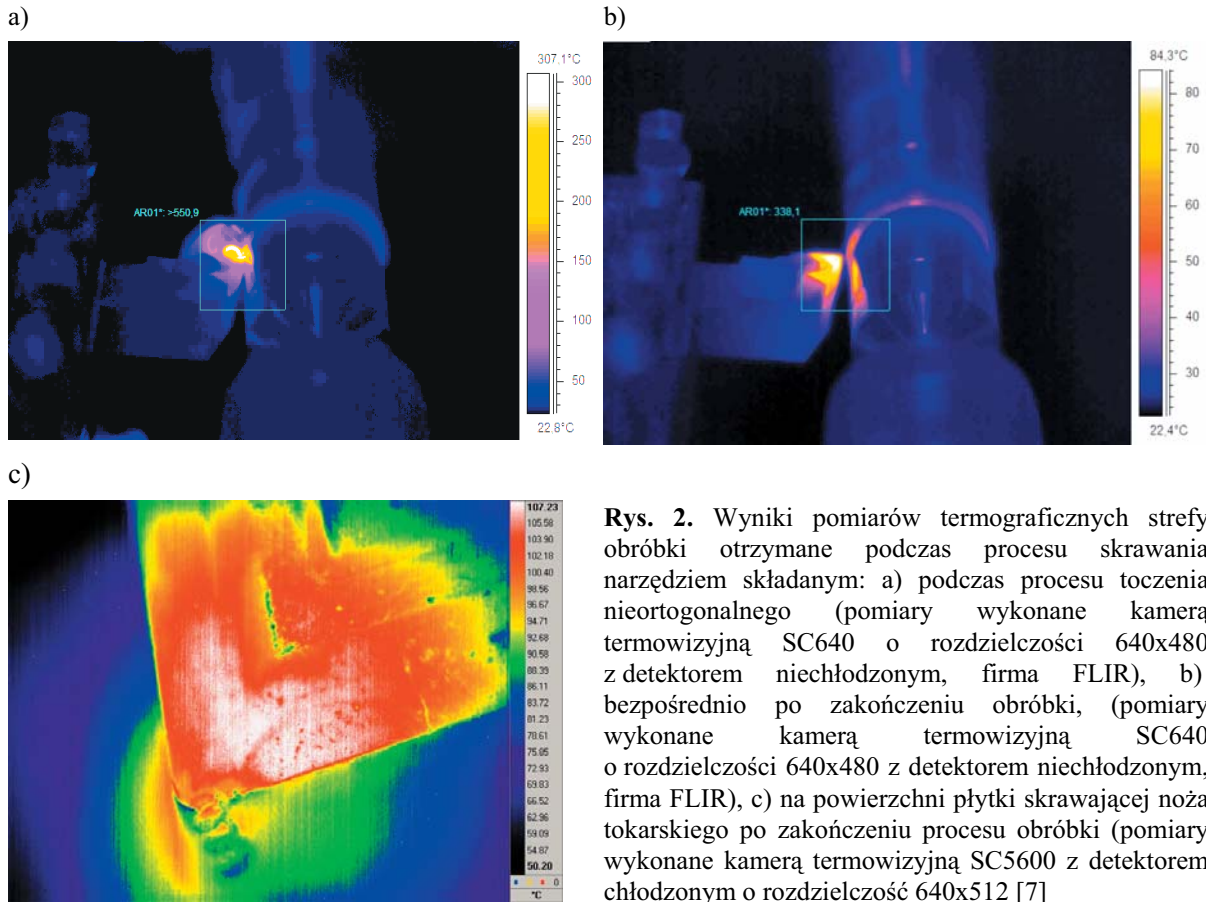
2.1. Badania termograficzne strefy skrawania

Fizyczny mechanizm procesu skrawania, któremu towarzyszy generowanie ciepła, jest wynikiem wzajemnych oddziaływań elementów układu obróbkowego, na który składają się: obrabiarka (O), przedmiot obrabiany (PO) oraz narzędzie (N). Strefę skrawania tworzą dwa elementy układu masowo-dyssypacyjno-sprężystego OUPN: przedmiot obrabiany i narzędzie (rys. 1).

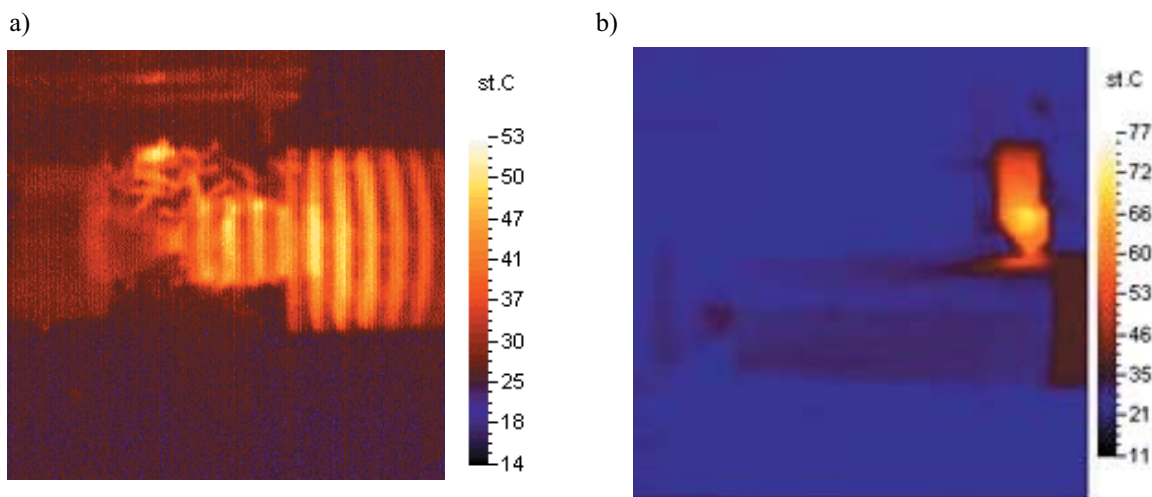


Rys. 1. Strefy intensywnych oddziaływań fizycznych w układzie narzędzie (N) – przedmiot obrabiany (PO), q_{IWO} , q_{IWN} , q_{IWW} , q_{IIW} , q_{IIN} , q_{IIIPO} , q_{IIIN} – cząstkowe strumienie ciepłne, W – wiór

Ciepło generowane jest w każdej ze stref fizycznego modelu skrawania (rys. 1). Powstaje w obszarze intensywnych odkształceń sprężysto-plastycznych oraz dekohezji materiału, obszarze kontaktu wióra z powierzchnią natarcia oraz obszarze kontaktu powierzchni przyłożenia z obrobioną powierzchnią przedmiotu skrawanego. Efektem generowanego ciepła w strefie skrawania jest wzrost temperatury przedmiotu obrabianego i narzędzia [3, 4]. Znaczną część ciepła przejmuje wiór i jest ono odprowadzane razem z nim ze strefy obróbki. Jednak ocena wartości temperatury poszczególnych elementów układu obróbkowego nastęrcza wiele trudności. Zastosowanie dotykowych metod punktowych identyfikacji wartości temperatury należy do jednych z trudniejszych zadań badawczych, czasami nie możliwych do implementacji z uwagi konieczność kontaktu sensorów z obiektem badanym oraz dynamikę procesu skrawania. Jakkolwiek ocena temperatury w strefie skrawania jest możliwa do określenia podczas obróbki (z wykorzystaniem termoelementów), to jednak dotyczy ona ściśle określonego punktu. Znacznie trudniej jest natomiast dokonać oceny rozkładu wartości temperatury na powierzchni przedmiotu lub narzędzia. Alternatywę stanowi pomiar termograficzny, z zastosowaniem systemów termowizyjnych [12-16]. Na rys. 2 przedstawiono zobrazowania termalne strefy skrawania podczas obróbki (rys. 2a) i bezpośrednio po jej zakończeniu (rys. 2b) oraz powierzchni natarcia płytki skrawającej (rys. 2c) składanego narzędzia tokarskiego.

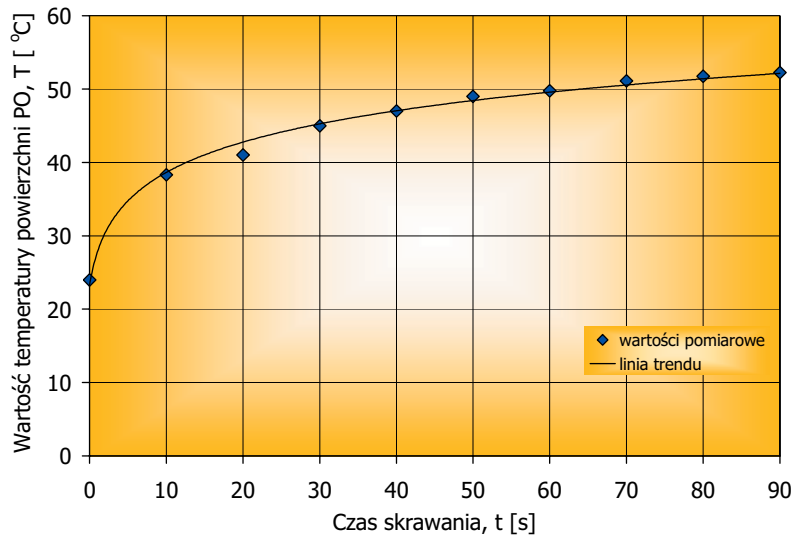


Na rys. 3 zaprezentowano rozkład wartości temperatury powierzchni przedmiotu obrabianego oraz narzędzia podczas toczenia ortogonalnego (rys. 3a) i nieortogonalnego (rys. 3b). Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły na sporządzenie charakterystyki przebiegu zmian wartości temperatury maksymalnej w funkcji czasu skrawania (rys. 4) dla ustalonych technologicznych parametrów skrawania, określonego rodzaju materiału przedmiotu obrabianego i narzędzia oraz jego geometrii.



Rys. 3. Wybrane termogramy przedmiotu obrabianego po obróbce, a) dla przypadku toczenia ortogonalnego, b) dla przypadku toczenia nieortogonalnego

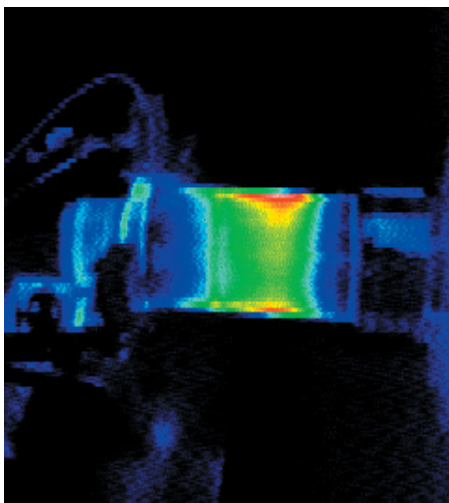
Przedstawione na rys. 4 wyniki pomiarów wskazują na inercyjny charakter zmian wartości temperatury powierzchni badanego obiektu (przedmiotu obrabianego) w funkcji czasu skrawania.



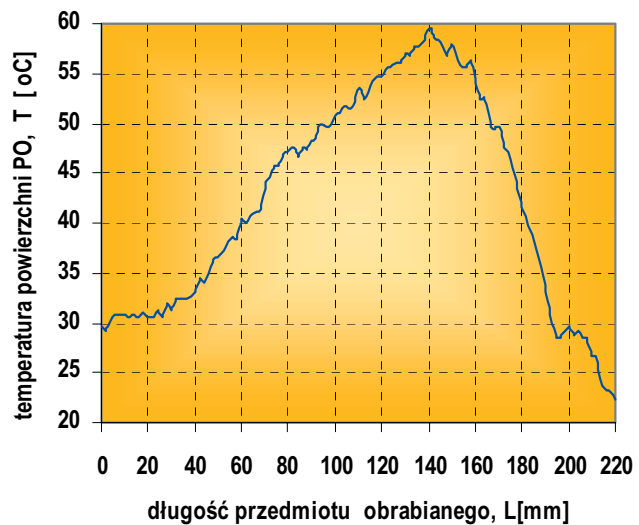
Rys. 4. Przebieg zmian wartości maksymalnej temperatury powierzchni przedmiotu obrabianego uzyskane podczas pomiarów termograficznych w ściśle określonych warunkach skrawania

Zbliżone charakterystyki zmian wartości temperatury powierzchni uzyskano podczas obróbki podatnego elementu cienkościennego klasy tuleja (rys. 5).

a)

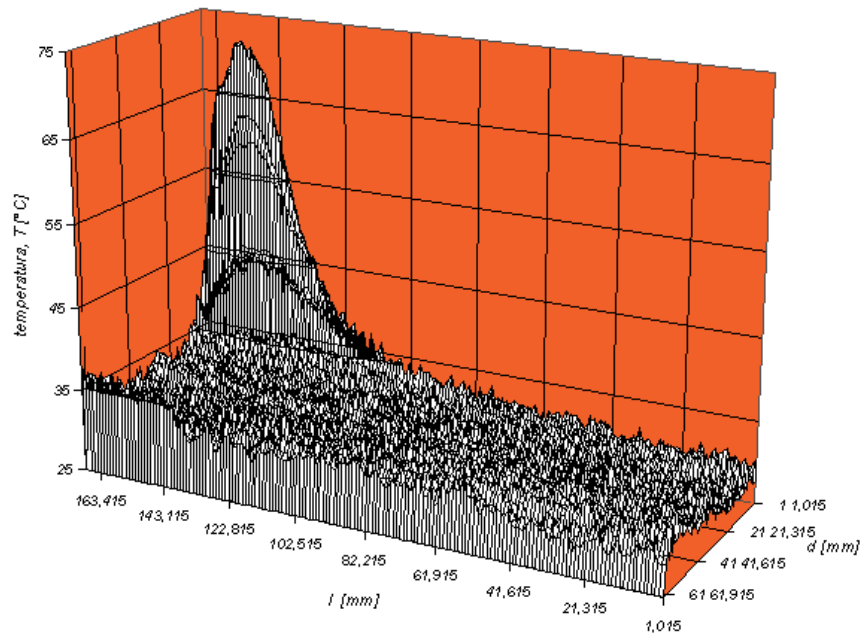


b)



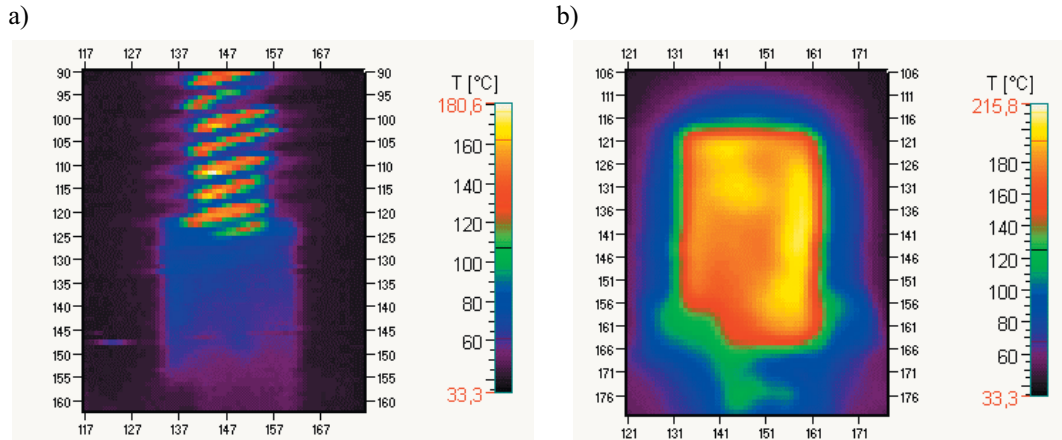
Rys. 5. Rozkład wartości temperatury powierzchni obrabianego przedmiotu cienkościennego uzyskany podczas pomiarów termograficznych w ściśle określonych warunkach skrawania: a) termogram powierzchni, b) przebieg zmian wartości maksymalnej temperatury powierzchni na długości przedmiotu w określonej jednostce czasu

Na rys.6 zaprezentowano rozkład wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego otrzymany na podstawie macierzy wartości, uzyskanej podczas pomiarów termograficznych. Na rysunku przedstawiono charakterystyczne wartości temperatury w obszarze kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym oraz wzdłuż tworzącej.



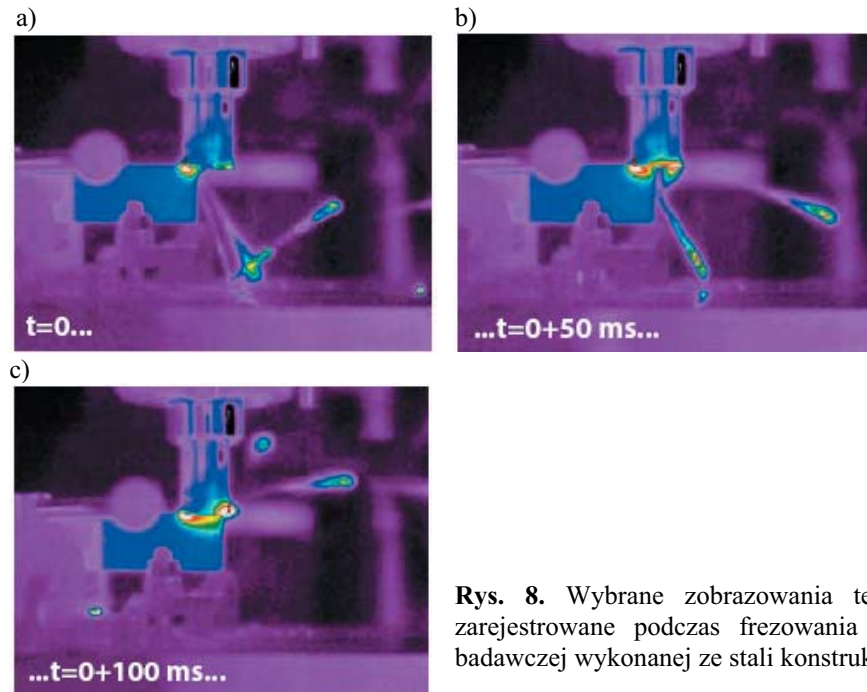
Rys. 6. Rozkład 3D wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego otrzymany na podstawie macierzy wartości uzyskanej podczas pomiarów termograficznych

Na rys. 7 zaprezentowano wyniki pomiarów termograficznych podczas procesu wiercenia. Rys. 7a przedstawia początkową fazę obróbki z widocznym narzędziem i wiórem w rowku wiórowym narzędzia, zaś na rys. 7b zaprezentowano rozkład wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego po zakończeniu procesu wiercenia.



Rys. 7. Wyniki pomiarów termograficznych podczas procesu wiercenia: a) początkowa faza obróbki z widocznym narzędziem, b) rozkład wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego bezpośrednio po zakończeniu procesu skrawania

Na rys. 8 przedstawiono zobrażenia termalne zarejestrowane podczas procesu frezowania próbek wykonanych ze stali konstrukcyjnej. Wybrane termogramy strefy skrawania stanowią reprezentatywną dla poszczególnych jednostek czasu „obrazkową” reprezentację zmian cieplnych strefy obróbki z całej populacji otrzymanych zobrażeń termalnych. Z zaprezentowanych na rys. 2-11 wyników pomiarów można stwierdzić, że technika termograficzna wykorzystywana jest w wielu metodach kształtowania ubytkowego części maszyn.

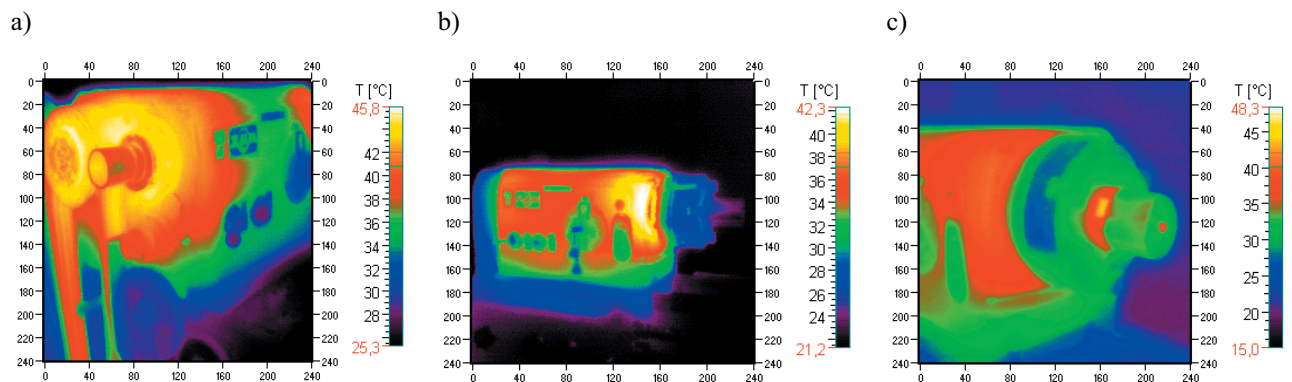


Rys. 8. Wybrane zobrazowania termalne zarejestrowane podczas frezowania próbki badawczej wykonanej ze stali konstrukcyjnej

Przeprowadzona analiza literatury w tym zakresie [1, 3-4, 7-8] wskazuje, że w głównej mierze pomiary termograficzne wykorzystywane są podczas badań w celu określenia rozkładu wartości temperatury powierzchni przedmiotu obrabianego dla większości metod obróbki (toczenia, wiercenia, frezowania), temperatury powierzchni roboczych ostrza narzędzia oraz strefy skrawania w trakcie obróbki.

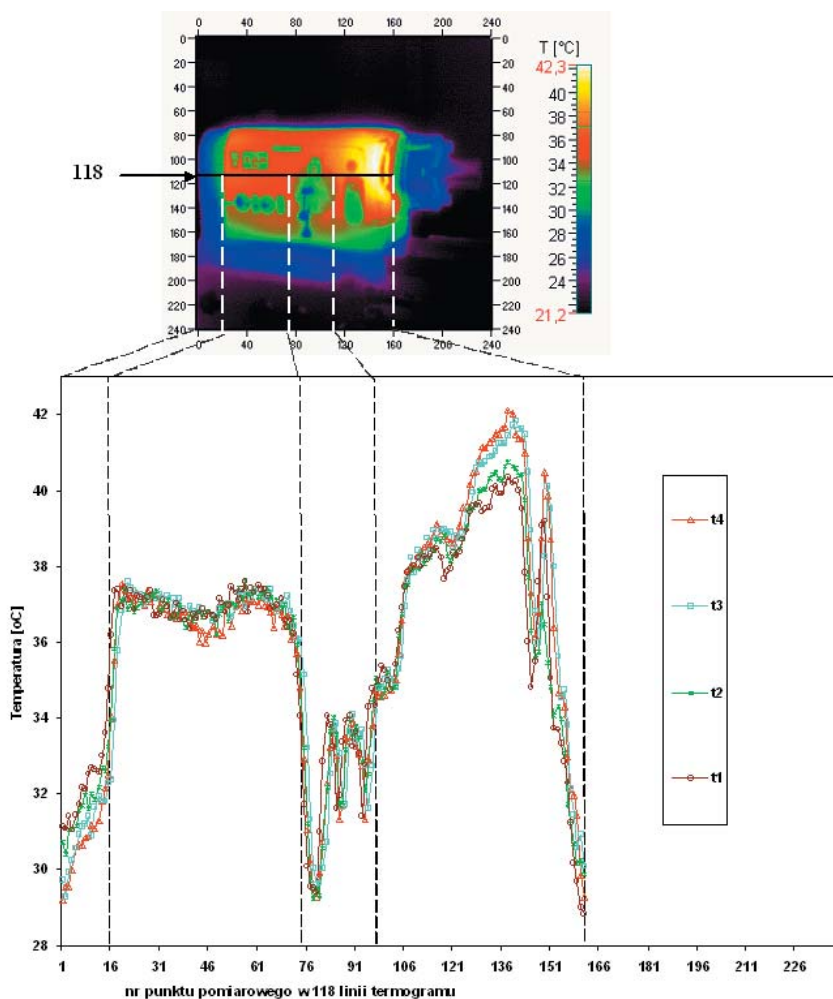
3.2. Badania termograficzne w diagnostyce obrabiarek

Badania intensywności zjawisk cieplnych towarzyszących pracy maszyn i urządzeń technologicznych stanowi źródło cennych informacji umożliwiających ocenę poprawności ich działania [5, 9-11]. Zaletą tego typu kontroli jest to, że diagnostyka może być prowadzona pod pełnym obciążeniem. Ponadto ilość miejsc, wykrywanych za pomocą kamery termowizyjnej jest dużo większa niż innymi metodami (np. dotykowymi) (rys. 9). Efektem tego jest także znaczna poprawa jakości uzyskiwanych informacji o zjawiskach termodynamicznych, wymianie ciepła, czy warunkach chłodzenia.



Rys. 9. Zobrazowania termalne tokarki: a) zespołu napędu pasowego i łożyskowania, b) zespołu wrzeciennika, c) korpusu przedniej końcówki łożyskowania wrzeciona (pomiary wykonano kamerą termograficzną V20 firmy Vigo System S.A.)

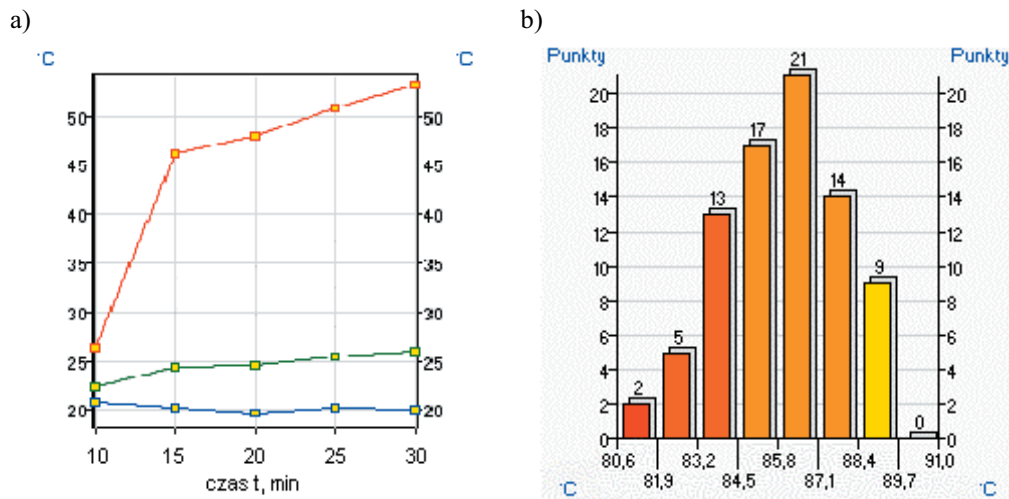
Nagrzewanie maszyn jest wynikiem powstających w jej obrębie strat mocy. W maszynach niemalże cała energia dostarczona z sieci elektrycznej do silników napędowych zamienia się na pracę, której wynikiem jest między innymi generowane ciepło (rys. 9). Efektem działania ciepła na konstrukcję maszyny są odkształcenia jej zespołów składowych. Mogą one powodować: pogarszanie funkcji sterowniczych, wzajemne przemieszczenia zespołów roboczych, nadmierne opory ruchu elementów, obniżać sprawność maszyny, itp.. Źródłami ciepła mogą być elementy układów kinematycznych napędów maszyny, takie jak: silniki, łożyska, przekładnie zębate i pasowe, sprzęgła i hamulce oraz elementy układów hydraulicznych i pneumatycznych (siłowniki, pompy, dławiki, rozdzielacze itp.) [5, 9-11]. Źródłem ciepła jest także sam proces realizowany na maszynie. Różna intensywność i nierównomierne rozmieszczenie źródeł ciepła, jak również niejednakowe warunki wymiany ciepła z otoczeniem poszczególnych zespołów maszyn i urządzeń powodują, że podstawowe elementy układu konstrukcyjnego maszyny mają różne wartości temperatury, co prowadzi do odkształceń cieplnych (rys. 10).



Rys. 10. Rozkład wartości temperatury powierzchni wrzeciennika tokarki uniwersalnej pracującej pod obciążeniem w 118 linii termogramu, dla wybranych czterech jednostek czasu t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , gdzie: $\Delta t = 60$ s

Efekty oddziaływania zjawisk cieplnych na maszynę można zmniejszać przez zmniejszenie nierównomierności rozkładu temperatury (stosując sztuczne chłodzenie źródeł ciepła, albo podgrzewanie miejsc o niższej temperaturze), stosowanie materiałów o małej rozszerzalności

cieplnej, stosowanie kompensatorów cieplnych, utrzymanie stałej temperatury w pomieszczeniach, zabezpieczenie maszyn przed miejscowym nasłonecznieniem i opływaniem przez prądy ciepłego powietrza, itp. Ponadto istotnym zagadnieniem jest unikanie przerw w produkcji powodujących stygnięcie maszyn, przestrzeganie stałości rytmu pracy, przeglądy i remonty mające na celu eliminowanie źródeł nadmiernego wydzielania się ciepła. W praktyce diagnostyka termograficzna jest wykorzystywana coraz częściej w budowie maszyn. Przykłady jej zastosowań (badania własne autora) przedstawiono na rys. 9-11.



Rys. 11. Graficzna prezentacja wyników pomiarów termograficznych: a) przebieg zmian estymat termalnych wrzeciennika tokarki uniwersalnej w funkcji czasu (linie trendu: temperatury maksymalnej – kolor czerwony, średniej – kolor zielony, minimalnej – kolor niebieski), b) histogram rozkładu temperatury wybranego obszaru termogramu

Na rys. 11 zaprezentowano w sposób graficzny przebieg zmian estymat termalnych wrzeciennika tokarki uniwersalnej w funkcji czasu (rys. 11a) oraz histogram rozkładu temperatury wybranego obszaru termogramu (rys. 11b). Przedstawione linie trendu opisują odpowiednio przebiegi zmian temperatury maksymalnej T_{\max} (oznaczonej kolorem czerwonym), średniej T_{sr} (kolor zielony) oraz minimalnej T_{\min} (kolor niebieski). Zaprezentowany na rys. 11b histogram rozkładu wartości temperatury wybranego obszaru termogramu pozwala na wnikliwą analizę ilościową badanego obszaru. Określa udział punktów o temperaturze z określone przedziału wartości temperatury.

Bogate oprogramowanie współczesnych systemów termograficznych pozwala nie tylko na projektowanie procesu pomiaru, konfigurowanie parametrów toru pomiarowego ale również analizę statystyczną, wykonywanie wykresów (różnego typu) animację uzyskanych zobrazowań, wyznaczanie trendu zmian estymat cieplnych, określenia obszarów na termogramie i przypisywanie im konkretnych wartości współczynnika emisyjności, „automatyzację” procesu pomiarowego oraz wiele innych.

3. BŁĘDY POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH

Podczas pomiarów temperatury z wykorzystaniem systemów termowizyjnych należy liczyć się z różnymi rodzajami błędów, które w literaturze wymienia się jako: błędy metody, błędy kalibracji oraz błędy toru elektronicznego [1-2]. Do grupy błędów metody zalicza się: błąd oszacowania emisyjności, błąd spowodowany wpływem odbitego przez obiekt promieniowania otoczenia oraz wpływem promieniowania samego otoczenia. Ponadto do tej grupy błędów zaliczane są: błąd spowodowany ograniczoną transmisją atmosfery oraz jej promieniowaniem (emisją), błąd spowodowany brakiem możliwości uśredniania wyników pomiarów,

a tym samym redukcji wpływu szumu detektora promieniowania. Błąd oszacowania emisyjności (emisyjność obiektu zależy od długości fali, temperatury, rodzaju materiału, stanu powierzchni, kierunku obserwacji, polaryzacji) można zmniejszyć poprzez: pomalowanie obiektu na czarno, stosując odpowiednie nawilżenie lub dokonując równomiernego nagrzewania obiektu, a następnie tworzenie mapy jego emisyjności. W praktyce przemysłowej, niektóre z powyższych metod stają się niemożliwe do zastosowania.

Błędy kalibracji wynikają z promieniowania własnego elementów optycznych i filtrów kamery, innego niż w warunkach kalibracji i zależnego od temperatury oraz emisyjności układów optycznych, odległości obiektu od kamery, która jest inna niż w trakcie kalibracji, ograniczonej dokładności wzorca oraz ilości punktów wzorcowania i błędów interpolacji.

Na błędy toru elektronicznego mają wpływ: szумы detektora, niestabilność układu chłodzenia (dla kamer z matrycami chłodzonymi), wahania wzmocnienia przedwzmacniacza i innych układów elektronicznych kamery, ograniczone pasmo przenoszenia detektora i innych układów elektronicznych kamery, ograniczona rozdzielczość i nieliniowość przetworników analogowo – cyfrowych. Błędy toru elektronicznego są niskie i wynoszą poniżej ± 1 % dla temperatur otoczenia od -15 °C do $+40$ °C [1-2, 12-16].

W celu uzyskania dokładnych wyników pomiarów temperatury kamerą termowizyjną, niezbędne jest skompensowanie wpływu różnych, zakłócających pomiar źródeł promieniowania. Z uwagi na to, że pełna kompensacja jest niemożliwa, w niektórych typach kamer termowizyjnych częściowa kompensacja zakłóceń dokonywana jest automatycznie przez kamerę, po wprowadzeniu przez użytkownika następujących danych: emisyjności obiektu, wartości temperatury otoczenia, wartości odległości między obiektem a kamerą, wartości względnej wilgotności atmosfery itp. Wprowadzenie powyższych wartości parametrów może stanowić problem dla operatora kamery, ponieważ nie ma prostych sposobów na ich określenie. Należy więc pamiętać na ile ważna jest znajomość prawidłowych wartości tych parametrów. Wartości wymienionych parametrów stają się mniej znaczące, gdy temperatura obiektu jest dużo wyższa od temperatury otoczenia (np. trzykrotnie) i emisyjność obiektu jest większa niż 0,9 [1, 2, 12-16].

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaprezentowane, praktyczne przykłady zastosowań pomiarów termograficznych pozwalają stwierdzić, że jakkolwiek pomiary wybranych elementów i zespołów układu masowo - dysypacyjno – sprężystego OUPN są możliwe, to jednak nastroczają one użytkownikom wielu trudności. Podstawową trudnością wynikającą głównie ze specyfiki pomiarów termowizyjnych) jest problem (a wręcz brak możliwości) oceny rozkładu wartości temperatury na powierzchniach ostrza narzędzia monolitycznego lub płytki skrawającej w trakcie procesu skrawania. Wynika to z faktu przesłaniania powierzchni narzędzia przez wiór lub przedmiot obrabiany. Pomiary takie mogą być, co prawda, dokonywane w przerwach podczas obróbki (np. w przypadku toczenia) lub podczas chwilowego wyjścia ostrza narzędzia z kontaktu z przedmiotem obrabianym (np. podczas frezowania) lecz do estymacji wartości temperatury na interesujących nas powierzchniach niezbędne jest zastosowanie aparatu matematycznego. Chociaż dynamika pomiaru termograficznego nie stanowi obecnie znaczącego problemu, to jednak specyfika i uwarunkowania technologiczne utrudniają proces oceny rozkładu wartości temperatury w samej strefie skrawania. Metody kontaktowe, z uwagi na dużą bezwładność termiczną czujników, w pomiarach dynamicznych procesów mechanicznych mogą nie zarejestrować stosunkowo szybkich zmian temperatury. W tych przypadkach pomiar termograficzny stanowi alternatywną metodę możliwą do implementacji.

Z badań własnych autora (w odniesieniu do maszyn technologicznych) wynika także, że zastosowanie termografii pozwala na: wczesne i dokładne rozpoznawanie nieprawidłowych stanów maszyn i procesów na nich realizowanych, ocenę strat ciepła, rozpoznawanie uszkodzeń skorelowanych ze stanem cieplnym maszyny i całych linii produkcyjnych (detekcję uszkodzeń), zwiększenie bezpieczeństwa pracy maszyny dzięki szybkiej i stosunkowo dokładnej informacji o pojawiających się zmianach cieplnych w wyniku rozwoju uszkodzenia, ograniczenie strat w stanach awaryjnych, ograniczenie kosztów obsługi remontowej, eliminacja przeciążenia informacyjnego operatorów, zwiększenie pewności informacji, wspomaganie decyzji operatorów w stanach nienormalnych i awaryjnych, diagnostykę obrabiarek skrawających do metali, monitorowanie przebiegu procesu skrawania, itp. W sytuacji, gdy pomiar jest długotrwały, idealnym rozwiązaniem jest wykorzystanie kamery termograficznej połączonej interfejsem z komputerem i rejestrowanie danych w zaplanowany, zautomatyzowany sposób bez konieczności nadzoru operatora.

5. LITERATURA

1. Madura H. (red.): Pomiary termowizyjne w praktyce. Agenda Wydawnicza Pomiary Automatyka Kontrola. Warszawa 2004.
2. Minkina W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
3. Józwik J.: Thermographic evaluation of temperature distribution on workpiece surface during orthogonal machining. *Maintenance and Reliability*, nr 2-3, 2001.
4. Józwik J.: Thermographic evaluation of temperature distribution on workpiece surface during non-orthogonal turning. *Maintenance and Reliability*, nr 5 (12), 2001.
5. Józwik J. i.in.: Procedury termograficznych badań diagnostycznych tokarki uniwersalnej. Monografia: Józwik J. (red.) i in.: Postęp w technikach wytwarzania i konstrukcji maszyn. LTN, 2005, s. 123–134.
6. Gadaj S. P.: Zastosowanie termografii w badaniach mechanicznych, *Przegląd Mechaniczny* 1997, nr 5, s. 10–19.
7. Knapik D.: Materiały własne, niepublikowane. EC TEST SYSTEMS Sp. z o.o., ul. Lublańska 34, 31-476 Kraków.
8. Rzeczkowski M.: Dynamiczne pomiary termograficzne. *Pomiary Automatyka Robotyka* 4/2008.
9. Różański L., Poloszyk S.: Zastosowanie termowizji w diagnostyce maszyn. Agenda Wydawnicza PAK. Warszawa 2004. s. 75–83.
10. Poloszyk S., Różański L.: Obraz termowizyjny jako symptom w diagnostyce termalnej maszyn technologicznych, *Materiały IV Konferencji Krajowej „Termografia i Termometria w Podczerwieni”*, Łódź 2000, s. 60–64.
11. Staniek R., Różański L.: Thermography in the Studies of the Thermal Characteristics of Numerically Controlled Vertical Knee-type Milling Machines, *Quantitative InfrRed Thermography* 6, QIRT'2002, Dubrovnik, 2002.
12. <http://www.flir.com.pl/> (z dn. 24.11.2008).
13. <http://www.infratec.net/index.php?id=57&L=4> (z dn. 24.11.2008).
14. <http://www.irtech.pl> (z dn. 24.11.2008).
15. <http://vigo.com.pl> (z dn. 24.11.2008).
16. <http://thermo.p.lodz.pl/tp/pirs.html> (z dn. 24.11.2008).