

Dr inż. Wojciech STACHURSKI,
dr inż. Piotr ZGÓRNIAK (Politechnika Łódzka):

ZASTOSOWANIE POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH DO WYZNACZENIA TEMPERATURY SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA STALI STOPOWEJ 42CrMo4

Streszczenie

W artykule zaprezentowano badania dotyczące wyznaczania temperatury skrawania z wykorzystaniem pomiarów termowizyjnych. Tak określona temperatura skrawania posłużyła do doboru optymalnych warunków obróbki podczas toczenia stali stopowej 42CrMo4. Jako kryterium optymalizacyjne przyjęto jakość warstwy wierzchniej (twardość, chropowatość) oraz dokładność wymiarowo-kształtową wytwarzanego elementu. Przytoczono zalecenia dotyczące obróbki, których przestrzeganie zapewni spełnienie wymagań stawianych przez konstruktora.

Słowa kluczowe: *toczenie, pomiary termowizyjne, temperatura skrawania*

UTILIZATION OF INFRARED MEASUREMENTS FOR CUTTING TEMPERATURE EVALUATION DURING TURNING PROCESS OF 42CrMo4 ALLOY STEEL

Abstract

In the paper results of IR measurement of cutting temperature generated during turning process is presented. On the base of infrared sequences acquired during cutting tests the optimal cutting parameters have been established for 42CrMo4 alloy steel. As an optimalization criteria the quality of outer surface of the workpiece have been established. Hardness, surface roughness parameters and dimensional accuracy were measured to evaluate quality of outer surface of the machined parts. In order to meet constructional requirements for machined parts the recommendations and guides to properly conduct machining processes have been presented in the article.

Keywords: *turning, IR measurements, cutting temperature*

ZASTOSOWANIE POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH DO WYZNACZENIA TEMPERATURY SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA STALI STOPOWEJ 42CrMo4

Wojciech STACHURSKI¹, Piotr ZGÓRNIAK¹

1. WSTĘP

Wysokie temperatury powstające w procesie skrawania wpływają niekorzystnie na właściwości warstwy wierzchniej oraz dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotów obrobionych [8]. Oddziaływanie wysokiej temperatury może skutkować np. zmianami wymiarów liniowych zachodzących podczas stygnięcia i powodujących błędy wykonania, zaś przekroczenie temperatury dopuszczalnej dla danego materiału może powodować m.in. niepożądane zmiany w twardości powierzchni po obróbce.

Wiedza na temat temperatur występujących w strefie skrawania ma duże znaczenie podczas doboru warunków obróbki przy projektowaniu procesów technologicznych. Dzieje się tak zwłaszcza w sytuacji, w której dążymy do zastąpienia jednych operacji innymi, np. szlifowania przez toczenie.

Dla wielu elementów jedną z najważniejszych operacji w procesie technologicznym jest, z punktu widzenia właściwości użytkowych, szlifowanie powierzchni walcowej zewnętrznej (np. wały w przekładniach zębatych i ślimakowych). Jednak sam proces szlifowania jest kosztowny. Wynika to m.in. z konieczności stosowania specjalizowanych obrabiarek (szlifierek do wałków), zachowania właściwego stanu powierzchni roboczej narzędzia (ściernicy) oraz z długiego czasu obróbki. O ile to możliwe szlifowanie należy eliminować, zastępując je procesem mniej wymagającym i przez to tańszym – toczeniem wykończeniowym.

Do wyznaczania temperatury skrawania stosowane są metody analityczne, numeryczne oraz doświadczalne. W metodach doświadczalnych bardzo popularnym sposobem monitorowania temperatury jest metoda termowizyjna, wykorzystująca zjawisko

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15

promieniowania podczerwonego [5]. Jednak stosowanie termowizji w praktyce nie jest łatwe. Ze względu na dużą czułość tej metody oraz wpływ czynników środowiskowych na dokładność wyznaczenia wartości temperatury za pomocą kamery, interpretacja termogramów wymaga dużej wiedzy i doświadczenia z wielu dziedzin [5, 11].

Należy pamiętać, że na temperaturę skrawania oraz jej rozkład w strefie tworzenia wióra wpływają takie czynniki, jak: właściwości materiału obrabianego i narzędziowego, parametry skrawania, stereometria ostrza oraz rodzaj i sposób chłodzenia [13]. W szeregu publikacji [3, 4, 6, 7,] opisana jest kolejność wpływu parametrów skrawania na wartość temperatury skrawania. Najsilniejszy wpływ na temperaturę skrawania (temperaturę ostrza) ma prędkość skrawania v_c , natomiast wpływ posuwu f jest zdecydowanie mniejszy niż prędkości. Wpływ głębokości skrawania a_p na temperaturę ostrza może być z reguły pominięty [13].

2. CEL I ZAKRES BADAŃ

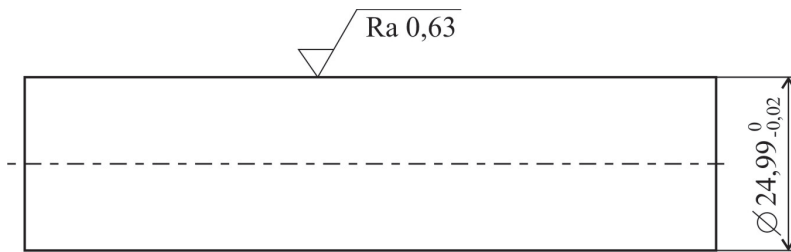
W artykule zaprezentowano sposób wykorzystania pomiarów termowizyjnych do wyznaczenia temperatury skrawania t podczas toczenia wzdłużnego. Pomiarzy temperatury były częścią szerszych badań mających na celu sprawdzenie możliwości zastąpienia procesu szlifowania ulepszonej cieplnie stali stopowej przez toczenie. W wyniku przeprowadzonych badań zaproponowano warunki obróbki, w tym parametry skrawania, umożliwiające spełnienie wymagań narzuconych przez konstruktora. Dobór warunków obróbki uwzględniał zarówno uzyskanie wymaganych parametrów wymiarowych, jak i jakościowych powierzchni obrabianej.

W zakres szerokich badań wchodził dobór warunków obróbki, takich jak:

1. materiał i geometria ostrza,
 2. parametry skrawania:
 - prędkość skrawania v_c ,
 - posuw f ,
 - głębokość skrawania a_p
- poprzez analizę:
- chropowatości powierzchni obrabianej (parametr Ra),
 - dokładności wymiarowej,
 - temperatury w strefie skrawania t ,
 - twardości powierzchni obrobionej (HRC).

3. WARUNKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W trakcie badań toczone wzdłużnie próbki (rys. 1) wykonane ze stali stopowej 42CrMo4 ulepszonej cieplnie do twardości 32 ± 2 HRC.



Rys. 1. Wymagania konstrukcyjne elementu wykorzystywanego w badaniach

Proces toczenia przeprowadzono na tokarce sterowanej numerycznie Haas SL-10. Jako narzędzia użyto składany nóż tokarski do toczenia zewnętrznego PTG NR 2020 K16 (wg ISO) firmy Sandvik [14]. W oprawce mocowano płytki skrawające wykonane z węglików spiekanych w gatunku GC4325 z powłoką wielowarstwową Inveio. Zastosowano płytki o promieniach naroża $r_e=0,8$ mm:

- naroże promieniowe – TNMG 16 04 08 PF,
- naroże o geometrii Wiper - TNMX 16 04 08 WF.

Płytki w gatunku GC4325 przeznaczone są do toczenia stali (obszar P25), a zastosowanie powłoki wykonanej w technologii Inveio znacznie wydłuża okres trwałości ostrzy skrawających [9, 10]. Toczenie prowadzono w zakresie parametrów skrawania (v_c, f, a_p) zalecanych przez producenta do obróbki wykańczającej stali ulepszonej cieplnie, przy czym wybrano jedną głębokość skrawania $a_p=0,4$ mm (maksymalną wartość zalecanego naddatku). Toczenie prowadzono z udziałem cieczy obróbkowej w trybie obfitym. Jako ciecz obróbkową zastosowano emulsję Blasocut firmy Blaser Swisslube dostarczaną w strefę obróbki z wydatkiem 5 l/min.

Pomiary chropowatości wykonano profilometrem T8000 firmy Hommelwerke. Zgodnie z wymaganiami konstruktora do porównywania użyto parametru Ra , powszechnie stosowany do opisu chropowatości w warunkach przemysłowych [1]. Odcinek pomiarowy L_t wynosił 4,8 mm i składał się z 6 odcinków elementarnych $L_c=0,8$ mm. Dla każdej mierzonej powierzchni wykonano trzy pomiary. Wartość średnia z tych pomiarów była uwzględniana jako wartość chropowatości mierzonej powierzchni.

Pomiary dokładności wymiarowej zewnętrznej powierzchni walcowej wykonano przy użyciu mikrometru elektronicznego Mitutoyo o zakresie 25–50 mm. Rozdzielczość odczytu mikrometru wynosi 0,001 mm. Błąd przyrządu i błąd zliczania wynoszą $\pm 0,001$ mm, zaś niepewność pomiaru równa jest $\pm 0,0014$ mm.

Pomiary twardości sposobem Rockwella wykonano na twardościomierzu PW-106.

Pomiary temperatury wykonano z wykorzystaniem naukowej kamery termowizyjnej Flir SC6000HS. Zastosowano filtr umożliwiający pomiar temperatury do 1500°C, przy czym minimalna temperatura rejestrowana w strefie skrawania to 250°C. W celu rozszerzenia zakresu pomiarowego zastosowano technikę „superframingu”. Rozdziel-

czość klatki termicznej wynosiła 320 x 256 dpi. Z uwagi na to, że na wartość rejestrowanej temperatury ma wpływ wiele czynników, w tym m.in. zmiana emisyjności przedmiotu obrabianego wraz ze wzrostem temperatury, w opisywanych badaniach przyjęto średnią wartość współczynnika emisyjności $\epsilon=0,14$. Wartość tego współczynnika uzyskano na podstawie tabeli emisyjności [2]. Proces toczenia dla każdej próby rejestrowano wykorzystując 3000 klatek zapisywanych z częstotliwością wynikową 100 Hz. Częstotliwość ta podyktowana była koniecznością dynamicznego przydziału podzakresów pomiarowych [12]. Do rejestracji oraz oceny zdjęć termicznych wykorzystano program IR Control, przy czym do oceny przyjęto wartość maksymalnej temperatury zarejestrowanej w badanym obszarze. Dla lepszego zobrazowania pól temperatur posłużono się oprogramowaniem MATLAB [8, 13].

4. PRZEBIEG BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania rozpoczęto od toczenia wzdłużnego próbek z wykorzystaniem płytek skrawających o narożu promieniowym oraz płytek z geometrią Wiper. W każdym przypadku badania prowadzono dla trzech prędkości skrawania i trzech posuwów – dwóch skrajnych z zakresu zalecanego przez producenta oraz środkowego. Głębokość skrawania a_p była stała (0,4 mm).

Pomiary chropowatości tak obrobionych powierzchni wykazały, że jedynie płytki z geometrią Wiper są w stanie, dla pewnych zestawów parametrów skrawania, zapewnić uzyskanie zakładanej chropowatości powierzchni – parametr $Ra \leq 0,63 \mu\text{m}$. Pomiary dokładności wymiarowej wykazały, że dla wszystkich prób wymiar średnicowy jest zgodny z dokumentacją rysunkową.

W dalszej części badań prowadzono próby toczenia dla wyselekcjonowanych w ten sposób zestawów parametrów. Badania te opisane są w następnym rozdziale.

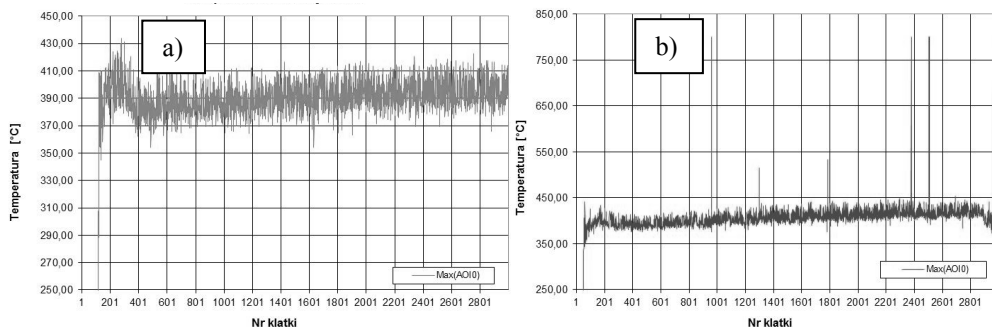
5. WYNIKI POMIARÓW TEMPERATURY

Na podstawie uzyskanych wyników wybrano dwa zestawy parametrów skrawania, dla których uzyskuje się największą wydajność obróbki przy założonym $Ra \leq 0,63 \mu\text{m}$, a następnie przeprowadzono z ich udziałem pomiary temperatury skrawania. Zestawy parametrów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawy parametrów skrawania użyte do pomiarów temperatury

Nr próby	Zestawy parametrów skrawania v_c (m/min) – f (mm/obr) – a_p (mm)
1	300 – 0,2 – 0,4
2	325 – 0,2 – 0,4

Jak wspomniano w rozdziale 3, każdą próbę rejestrowano w 3000 klatek. Na rys. 2 pokazano wykresy maksymalnych temperatur zaobserwowanych w kolejnych klatkach (zdjęciach) termicznych uzyskanych przy prędkości skrawania $v_c=300$ m/min (rys. 2a) i $v_c=325$ m/min (rys. 2b).



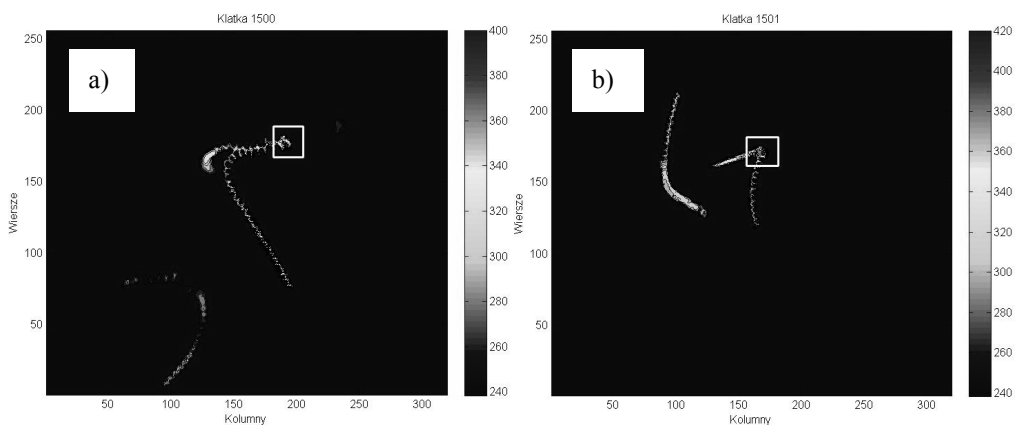
Rys. 2. Wykres maksymalnych temperatur zmierzonych w kolejnych zdjęciach termicznych: a) $v_c=300$ m/min, b) $v_c=325$ m/min.

Do wyznaczenia średniej temperatury maksymalnej brano środkowy zakres sekwencji zdjęć termicznych obejmujący 2000 klatek, eliminując moment wejścia i wyjścia narzędzia z materiału obrabianego. Na podstawie dotychczasowych badań [6] stwierdzono, że fazy wejścia oraz wyjścia narzędzia w przedmiot obrabiany powodują znaczące rozbieżności uzyskiwanych wyników końcowych. Wartości tych temperatur dla każdej z prób podano w tabeli 2.

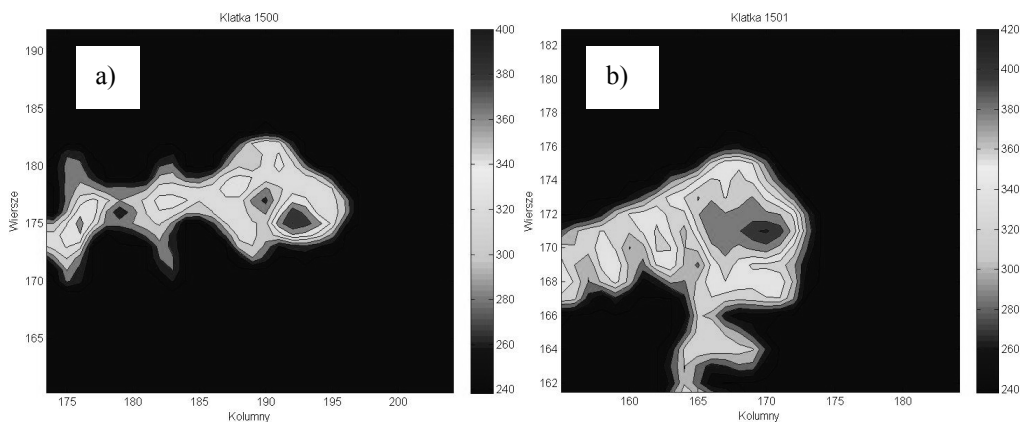
Tabela 2. Wartości średnich temperatur maksymalnych

Nr próby	Zestawy parametrów skrawania v_c (m/min) – f (mm/obr) – a_p (mm)	Średnia temperatura maksymalna $t_{max\ sr}$ (°C)
1	300 – 0,2 – 0,4	390
2	325 – 0,2 – 0,4	408

Na rys. 3 pokazano widoki przykładowych klatek termicznych uzyskanych za pomocą algorytmów programu MATLAB. Zdjęcia wykonano przy $v_c=300$ m/min (rys. 3a) i $v_c=325$ m/min (rys. 3b). Ramką w kolorze białym zaznaczono obszar strefy skrawania pokazany w powiększeniu na rys. 4.



Rys. 3. Zdjęcie termiczne: a) $v_c=300$ m/min, b) $v_c=325$ m/min.



Rys. 4. Zbliżenie strefy skrawania na zdjęciu termicznym: a) $v_c=300$ m/min, b) $v_c=325$ m/min.

6. WNIOSKI

Na podstawie wyników uzyskanych podczas pomiarów temperatury stwierdzono, że:

1. maksymalna temperatura skrawania zmierzona podczas obróbki nie przekracza temperatury odpuszczania dla stali 42CrMo4, tj. ok. 550 °C,
2. wobec powyższego temperatura w strefie skrawania nie wpływa na spadek twardości w warstwie wierzchniej. Potwierdzają to pomiary twardości stali przed i po obróbce skrawaniem (32 ± 2 HRC).

Na podstawie wyników otrzymanych z przeprowadzonych badań ustalono, że istnieje możliwość takiego doboru warunków obróbki, aby zastąpić proces szlifowania wałków toczeniem.

W związku z powyższym zaproponowano następujące warunki obróbki:

1. Narzędzie skrawające – nóż tokarski składany z wymienną płytką skrawającą z węglików spiekanych o geometrii ostrza typu Wiper. Proponowana płytką to TNMX 16 04 08 WX z promieniem naroża 0,8 mm.
2. Parametry skrawania:
 - prędkość skrawania v_c z zakresu 300÷325 m/min,
 - posuw f z zakresu 0,1÷0,2 mm/obr,
 - głębokość skrawania a_p dla toczenia wykańczającego ustalono na 0,4 mm.
3. Ciecz obróbkowa podawana w trybie obfitym.

LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*, Warszawa, WNT, 2008.
- [2] BRAMSON M.A., *Infrared Radiation, A Handbook for Applications*, Nowy Jork, Plenum Press, 1967.
- [3] GRZESIK W., *Podstawy skrawania materiałów metalowych*, Warszawa, WNT, 2010.
- [4] JEMIELNIAK K., *Obróbka skrawaniem*, Warszawa, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1998.
- [5] KISZKA P., GRZESIK W., RECH J., *Pomiar rozkładu temperatury w strefie skrawania za pomocą kamery termowizyjnej*, W: *Mechanik*, nr 3, 2015, 197-200.
- [6] KUCZMASZEWSKI J., ZAGÓRSKI I., *Badania masy, temperatury zapłonu oraz temperatury wiórów podczas skrawania wybranych stopów magnezu*, W: *Mechanik*, nr 10, 2012, 824-828.
- [7] NIEŚLONY P., *Modelowanie przepływu ciepła i rozkładu temperatury w strefie skrawania dla ostrzy z twardymi powłokami ochronnymi*, Opole, Oficyna wydawnicza PO, 2008.
- [8] STACHURSKI W., ZGÓRNIAK P., SAWICKI J., OSTROWSKI D., JANUSZEWICZ B., *Napężenia własne występujące w obszarze temperatury generowanej w przedmiocie obrabianym podczas frezowania*, W: *Inżynieria Materiałowa*, nr 6 (196), 2013, 895-898.
- [9] STACHURSKI W., MIDERA S., *Badania trwałości płytek skrawających typu Wiper*, W: *Mechanik*, nr 8-9, 2013, 161-168/710.
- [10] STACHURSKI W., MIDERA S., *Badania zużycia płytek skrawających z węglików spiekanych w gatunku GC4325 z powłoką Inveio i GC4215*, W: *Mechanik*, nr 8-9, 2014, 161-168/732.
- [11] WIĘCEK B., DE MEY G., *Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania*, Warszawa, Wydawnictwo PAK, 2011.
- [12] ZGÓRNIAK P., GRDULSKA A., *Investigation of temperature distribution during milling process of AZ91HP magnesium alloys*, W: *Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 16, nr 1, 2012, 33-40.
- [13] ZGÓRNIAK P., STACHURSKI W., OSTROWSKI D., KRUSZYŃSKI B., *Wpływ wybranych parametrów skrawania na temperaturę w strefie obróbki podczas frezowania*, W: *Mechanik*, nr 8-9, 2013, 589-596/716.
- [14] www.sandvik.pl (20.05.2015)