

Andrzej GOŁĄBCZAK<sup>1</sup>  
Robert ŚWIĘCIK<sup>1</sup>

## BADANIA ROZKŁADU TEMPERATURY W STREFIE ŚCIERNEGO SZLIFOWANIA ELEKTROEROZYJNEGO STOPU TYTANU

W pracy przedstawiono wyniki badań rozkładu temperatury ściernego szlifowania elektroerozyjnego AEDG stopu tytanu Ti6Al4V. Podstawą opracowania są badania eksperymentalne szlifowania płaszczyzn ściernicą diamentową SD ze spoiwem metalowym. Zakres prezentowanych badań obejmuje wyniki pomiarów temperatury w strefie kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym z wykorzystaniem termopary oraz kamery termowizyjnej.

### 1. WPROWADZENIE

Jednym z bardzo istotnych parametrów jakie decydują o jakości i trwałości wyrobów, jest stan warstwy wierzchniej, uzyskiwany m.in. w obróbce wykończeniowej, realizowanej szlifowaniem ściernicowym. Kontrola temperatury warstwy wierzchniej ma istotne znaczenie dla oceny przebiegu procesu szlifowania, w tym także działania źródła ciepła w strefie styku ściernicy i szlifowanego przedmiotu. Ciepło generowane jest w każdej ze stref fizycznych oddziaływań ziaren CPS na przedmiot obrabiany. Źródłami generowanego ciepła w strefie szlifowania jest praca odkształceń plastycznych i sprężystych oraz dekohezji materiału, a także praca sił tarcia.

W procesie ściernego szlifowania elektroerozyjnego AEDG (*Abrasive Electrical Discharge Grinding*), oprócz wymienionych źródeł, dodatkowo dochodzą jeszcze wyładowania iskrowe. Bezpośrednim efektem powstającego ciepła jest wzrost temperatury szlifowanego przedmiotu oraz ściernicy. Wartości temperatury przedmiotu w tej strefie są uzależnione m.in. od gęstości strumienia ciepła, rzeczywistej długości styku ze ściernicą i właściwości cieplnych obrabianego materiału [1],[2]. Wzrost temperatury szlifowania, na skutek działania źródła ciepła, prowadzi do szeregu niekorzystnych zmian w WW szlifowanego przedmiotu. Do najważniejszych zaliczyć można m.in.: przypalenia

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Katedra Technologii Maszyn

szlifierskie, stan naprężeń własnych oraz zmiany strukturalne materiału (np.: hartowanie wtórne i rekrytalizacja).

Podczas szlifowania elektroerozyjnego AEDG, w wyniku wnikania strumienia ciepła do przedmiotu obrabianego, może więc dochodzić do zmian fizycznych właściwości warstwy wierzchniej jak i struktury, twardości i naprężeń własnych. Poznanie rozkładu temperatur w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym może mieć istotne znaczenie aplikacyjne, zwłaszcza przy projektowaniu operacji szlifierskich trudno skrawalnych materiałów konstrukcyjnych, w warunkach przemysłowego zastosowania procesu szlifowania AEDG.

Autorzy pracy skoncentrowali uwagę na zbadaniu rozkładu temperatury szlifowania procesu AEDG oraz porównawczo w procesie szlifowania konwencjonalnego. W artykule przedstawiono kontynuację zapoczątkowanych w pracy [3] badań dotyczących pomiarów temperatury w strefie kontaktu ściernicy z przedmiotem szlifowanym.

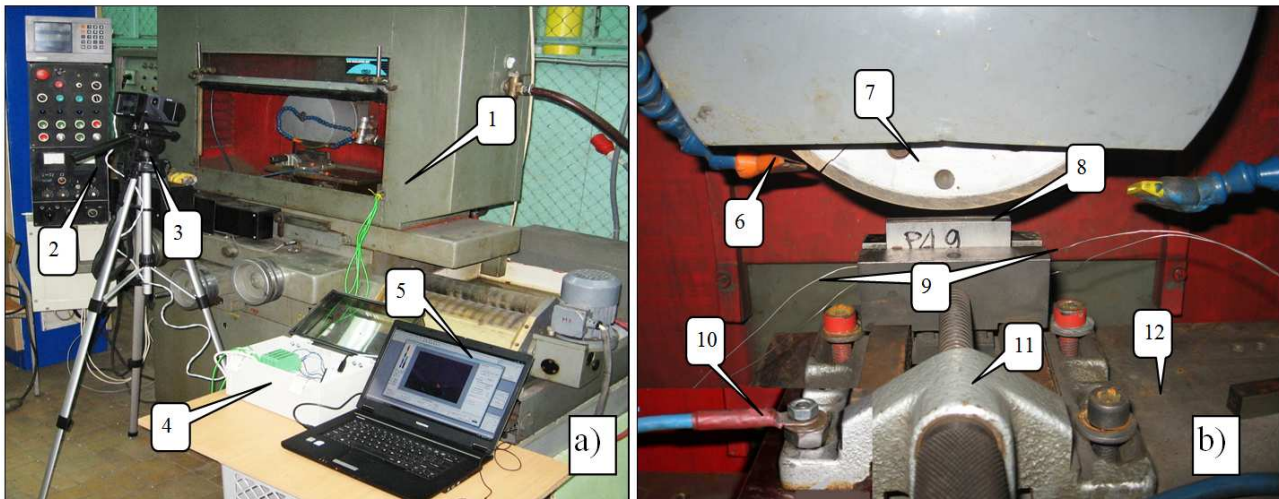
## 2. STANOWISKO BADAWCZE, METODA I WARUNKI BADAŃ

Jednym z podstawowych etapów oceny wpływu ciepła generowanego w strefie szlifowania na jakość powierzchni przedmiotu po obróbce jest znajomość rozkładu wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego oraz ściernicy. Przeprowadzono zatem badania, mające na celu ustalenie charakteru zmian wartości temperatury na powierzchni przedmiotu, podczas szlifowania elektroerozyjnego AEDG oraz porównawczo dla szlifowania konwencjonalnego. Pomiary wartości temperatury prowadzono przy użyciu termopar typu K, podłączonych do listwowych mikroprocesorowych przetworników temperatury LMPT-21ME, z których sygnał pomiarowy przekazywany był do karty pomiarowej USB-6009 firmy National Instruments. Rejestrowane wyniki pomiarów temperatury przekazywano poprzez złącze USB do komputera. Do komunikacji pomiędzy komputerem a układem rejestrującym wykorzystano oprogramowanie LabVIEW2010.

Przeprowadzono także pomiary temperatury w podczerwieni, wykorzystując kamerę termowizyjną VIGOCAM V50. Kamerę podłączono z komputerem za pomocą złącza ethernet RJ-45. Komunikację kamery z komputerem zapewniało oprogramowanie TERM 2.21.1. Oprogramowanie to umożliwiało wygodne sterowanie kamerą oraz rejestrację znacznie większej, niż na karcie pamięci kamery, ilości wyników pomiarów w postaci obrazów termowizyjnych.

Proces szlifowania AEDG realizowano na stanowisku badawczym wyposażonym w szlifierkę do płaszczyzn typu ECBT8 oraz generator impulsów wyładowań iskrowych typu GMP75, układy kontrolno- pomiarowe parametrów szlifowania oraz komputerowy system rejestracji wyników badań. Podstawowe zespoły funkcjonalne stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1.

Zakres badań obejmował próby w głębokiego szlifowania AEDG płaskich próbek ze stopu tytanu Ti6Al4V (o wymiarach 55x20x10) ściernicą diamentową (SD 125/100 M75) ze spoiwem metalowym. Proces szlifowania AEDG realizowano w obecności dielektryka, jakim była woda destylowana.



Rys. 1. Stanowisko badawcze: a) widok ogólny, b) strefa szlifowania: 1 – szlifierka ECBT-8, 2 – pulpit sterowniczy, 3 – kamera termowizyjna, 4 – układ rejestrujący, 5 – komputer, 6 – dysze doprowadzające dielektryk, 7 – ściernica, 8 – szlifowana próbka, 9 – termopara, 10 – doprowadzenie napięcia z generatora, 11 – imadło, 12 – stół szlifierki  
 Fig. 1. Workstand: a) overview, b) grinding system; 1 – ECBT8 grinder, 2 – control desk, 3 – thermovision camera, 4 – recorder system, 5 – PC computer, 6 – dielectric feed pipe, 7 – grinding wheel, 8 – workpiece, 9 – thermocouple, 10 – feed voltage from generator, 11 – vice, 12 – grinding table

W realizowanych badaniach, zmiennymi wielkościami wejściowymi były warunki elektryczne generatora, tj.: napięcie robocze –  $U[V]$ , prąd roboczy –  $I[A]$ . Pozostałe parametry elektryczne, tj.: czas impulsu –  $t_o [\mu s]$  i czas przerw –  $t_p [\mu s]$  oraz parametry szlifowania, tj.: prędkość posuwu wzdłużnego szlifowanego przedmiotu –  $v_f$ , dosuw ściernicy do przedmiotu –  $a$  i prędkość szlifowania –  $v_s$ , dobrano na podstawie wcześniejszych wyników badań [4÷6].

Badania przeprowadzono dla trzech zakresów parametrów elektrycznych generatora, oznaczonych kodowo  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$ . W procesie szlifowania AEDG stosowano następujące parametry elektryczne generatora:  $P_3$ :  $U=100V$ ,  $I=8A$ ;  $P_4$ :  $U=150V$ ,  $I=12A$  i  $P_5$ :  $U=200V$ ,  $I=25A$ . Czas trwania impulsu  $t_o$  ustalony został na poziomie  $32\mu s$ , natomiast czas przerw  $t_p$  –  $63\mu s$ . W procesie szlifowania konwencjonalnego stosowano następujące parametry:  $v_s=30m/s$ ,  $a=20\mu m$ ,  $v_f=0,5m/min$ . Oznaczenie  $P_1$  dotyczy obróbki realizowanej bez użycia chłodzenia (tzw. obróbka „na sucho”), natomiast  $P_2$  – obróbki z cieczą chłodzącą, którą była woda destylowana.

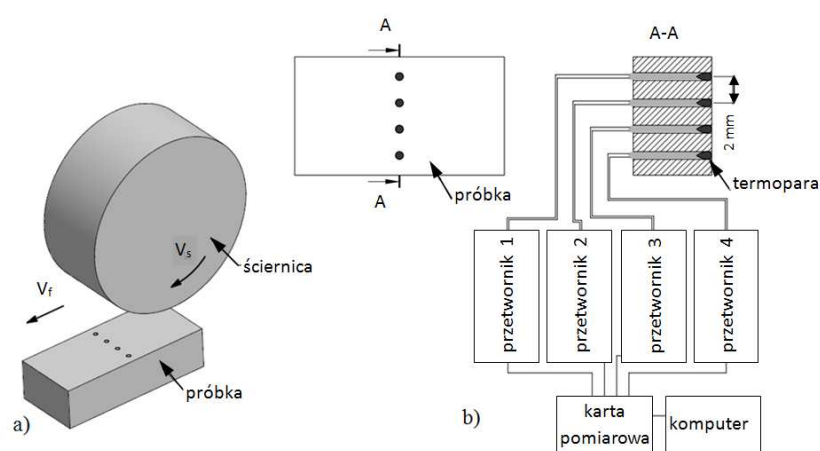
### 3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania doświadczalne obejmowały próby szlifowania stopu tytanu Ti6Al4V metodą AEDG i porównawczo metodą konwencjonalną z użyciem cieczy chłodzącej (dielektryk) i na sucho. Prezentowane wyniki badań dotyczą pomiarów temperatury w strefie kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym z wykorzystaniem termopary oraz kamery termowizyjnej.

## 3.1. POMIARY TEMPERATURY SZLIFOWANIA METODA TERMOPARY

Pomiary temperatury prowadzono przy użyciu 4 termopar typu K, rozmieszczonych w szlifowanej próbce w jednej linii, w układzie poprzecznym do kierunku obróbki, w odległości 2mm każda. Pomiary rejestrowano za pomocą układu pomiarowego wyposażonego w kartę pomiarową USB-6009 oraz listwowe mikroprocesorowe przetworniki temperatury LMPT-21ME. Zarejestrowane wartości temperatury przesyłano do pamięci komputera, celem dalszej obróbki.

Schemat pomiaru temperatury szlifowania za pomocą termopar przedstawiono na rysunku 2.

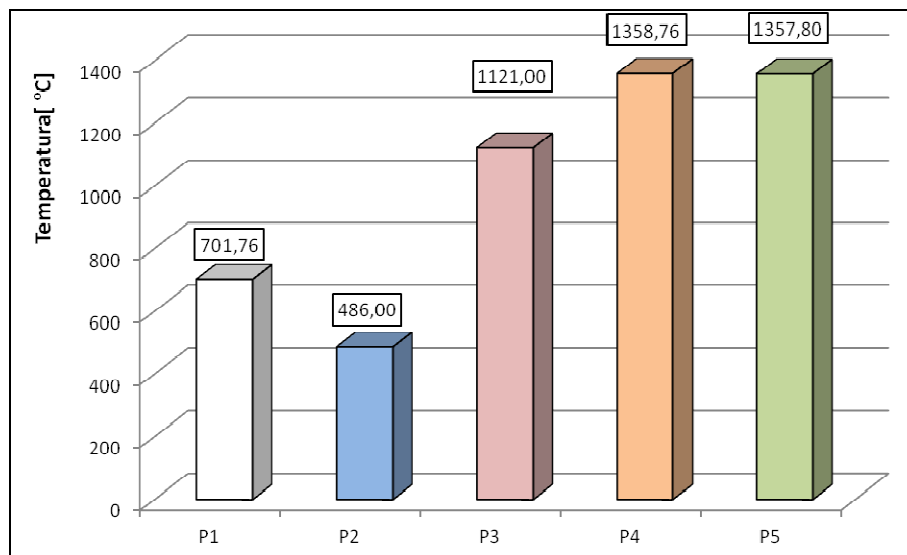


Rys. 2. Schemat układu do pomiaru temperatury w strefie szlifowania z użyciem termopar: a) widok ogólny, b) rozmieszczenie termopar w szlifowanej próbce

Fig. 2. Scheme of system for temperature measurement in grinding zone using thermocouples: a) overview, b) arrangement of thermocouples in grinding workpiece

Wyniki pomiarów temperatury szlifowania AEDG stopu tytanu Ti6Al4V, realizowanego z dodatnią polaryzacją przedmiotu obrabianego, przedstawiono na rysunku 3. Porównanie tych wyników badań wskazuje, że wraz ze wzrostem napięcia i natężenia prądu generatora wyładowań ( $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$ ) zwiększa się temperatura procesu AEDG. Największą wartość temperatury uzyskano dla procesu realizowanego z dużymi i średnimi wartościami napięcia roboczego i natężenia prądu ( $P_4$ ,  $P_5$ ). Wartości temperatury są odpowiednio wyższe o około 18% w porównaniu do procesu realizowanego z małymi nastawami napięcia i natężenia prądu ( $P_3$ ) oraz o około 65% w porównaniu do procesu szlifowania konwencjonalnego ( $P_2$ ) i około 48% w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego na sucho ( $P_1$ ). Należy nadmienić, że uzyskane temperatury w tym procesie są maksymalnymi wartościami, jakie można zmierzyć za pomocą termopary typu K. Przypuszczać można, że w procesie szlifowania AEDG, realizowanym z wartościami napięcia i natężenia prądu przekraczającymi zakres 150V i 12A, wartości temperatury na styku ściernica przedmiot obrabiany mogą być znacznie wyższe. Na tym etapie badań, zagadnienie to wykracza jednak poza możliwości posiadanego układu pomiarowego.

Relatywnie wysokie wartości temperatury uzyskano także w procesie AEDG realizowanym z małymi nastawami napięcia i natężenia prądu ( $P_3$ ). Wzrost temperatury w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego ( $P_2$ ) wynosił tu około 56%.



Rys. 3. Porównanie wartości temperatury w strefie szlifowania z wykorzystaniem termopar typu K  
Fig. 3. Comparison of temperature values in grinding zone with using thermocouples type K

Uzyskane wyniki badań potwierdziły wcześniejsze spostrzeżenia autorów prezentowane w pracy [3], w której wykazano, że wraz ze wzrostem parametrów elektrycznych zwiększa się także temperatura procesu AEDG. Należy nadmienić, że w tych badaniach zastosowano rozmieszczenie termopar w próbce wzdłuż posuwu szlifowania. Rejestrację temperatury prowadzono przy wykorzystaniu rejestratora ekranowego firmy LUMEL KD-7. W procesie szlifowania próbki ze stopu tytanu stosowano ściernicę CBN. W tych warunkach szlifowania AEDG i sposobie rejestracji wyników, uzyskano znacznie niższe wartości temperatury szlifowania. Były one o około 56% niższe od uzyskiwanych w niniejszej pracy.

Wzrost temperatury w procesie AEDG może być następstwem wnikania dużego strumienia ciepła do przedmiotu obrabianego. Potwierdzeniem tego faktu jest wzrost energii wyładowań w procesie AEDG, który dowodzi z kolei o większym udziale procesu erozji elektrycznej w usuwaniu nadmiaru obróbkowego oraz zmniejszeniu udziału energii skrawania ziarnami ściernymi CPS, co wykazali autorzy w pracy [7]. Z kolei prezentowane wyniki badań w pracy [6] potwierdziły, że w procesie szlifowania AEDG stopu tytanu realizowanego z udziałem dużych wartości napięcia i natężenia prądu ( $P_5$ ) następuje kształtowanie w WW naprężeń rozciągających. Te niekorzystne naprężenia mogą być następstwem termicznego oddziaływania wyładowań iskrowych, które powodują wzrost temperatury w strefie obróbki, co zdają się potwierdzać wyniki prezentowane w niniejszej publikacji. Prawdopodobną przyczyną jest tu duża szybkość nagrzewania i studzenia

warstwy wierzchniej w obszarze styku ściernica-przedmiot obrabiany, która może prowadzić do wzrostu naprężeń cieplnych i spowodować niekorzystny rozkład naprężeń własnych.

### 3.2. POMIARY TEMPERATURY SZLIFOWANIA METODĄ TERMOWIZYJNĄ

Przeprowadzono również pomiary temperatury przy użyciu kamery termowizyjnej. Dokładność termowizyjnego pomiaru temperatury zależy w dużym stopniu od współczynnika emisyjności promieniowania przedmiotu, dla którego dokonywany jest pomiar. Dlatego też, przed przystąpieniem do pomiarów temperatury z wykorzystaniem kamery termowizyjnej, określono współczynnik emisyjności dla stopu tytanu. W tym celu wykorzystano próbkę w połowie pokrytą sadzą, dla której współczynnik emisyjności przyjmowany jest na poziomie 0,98. Wartość współczynnika emisyjności określono wielokrotnymi pomiarami temperatury obu części próbki, nagrzaną każdorazowo do tej samej temperatury, przy różnych nastawach współczynnika emisyjności. Tym sposobem, ustalono wartość współczynnika emisyjności stopu tytanu na poziomie 0,4. Wartość tę stosowano w próbach szlifowania konwencjonalnego realizowanego na sucho. W procesie szlifowania AEDG z użyciem dielektryka, wartość współczynnika emisyjności określono wielokrotnymi pomiarami, poprzez porównywanie temperatury mierzonej termoparą i kamerą termowizyjną przy różnych nastawach współczynnika emisyjności. Ustalono w ten sposób współczynnik emisyjności na poziomie 0,05.

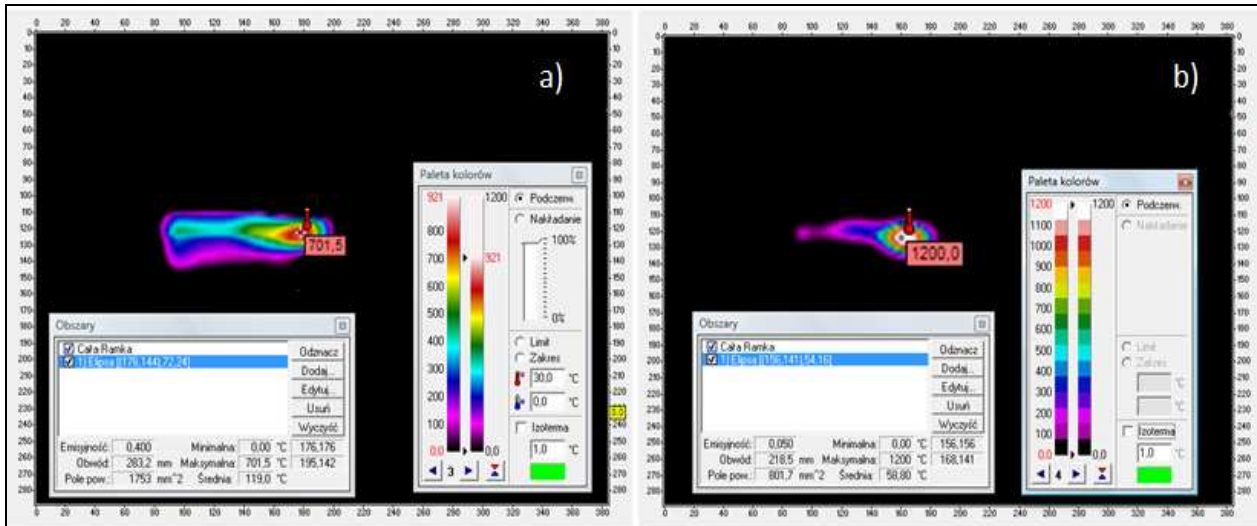
Przykładowe obrazy termowizyjne, uzyskane przy pomocy zastosowanej kamery termowizyjnej, przedstawiono na rysunku 4. Pomiary temperatury prowadzono w sekwencyjnym trybie rejestracji z częstotliwością obrazów 2Hz. Jako wartość temperatury szlifowania przyjmowano wartość średnią z 5 najwyższych wartości maksymalnych, odczytywanych z obserwowanych obszarów obrazów termowizyjnych, lub też z danych zapisanych z wybranych obszarów. Porównanie temperatury mierzonej metodą termowizyjną i termoparami przedstawiono na rys. 5.

Analiza wyników badań przedstawionych na rysunku 5 wskazuje na tendencję wzrostu temperatury szlifowania, wraz ze zwiększaniem parametrów elektrycznych generatora wyładowań elektroiskrowych ( $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$ ), zarówno dla pomiarów realizowanych termoparą jak i kamerą termowizyjną.

W warunkach prowadzonych badań, dla procesu realizowanego ze średnimi i dużymi nastawami napięcia i natężenia prądu ( $P_4$ ,  $P_5$ ), uzyskano najwyższe wartości temperatury szlifowania. Podobnie jak w przypadku pomiarów za pomocą termopary, były to maksymalne wartości, przekraczające 1200°C, jakie można zmierzyć za pomocą posiadanej kamery termowizyjnej. Ten fakt potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia autorów o następstwach termicznego oddziaływania wyładowań iskrowych, które powodują wzrost temperatury w strefie obróbki.

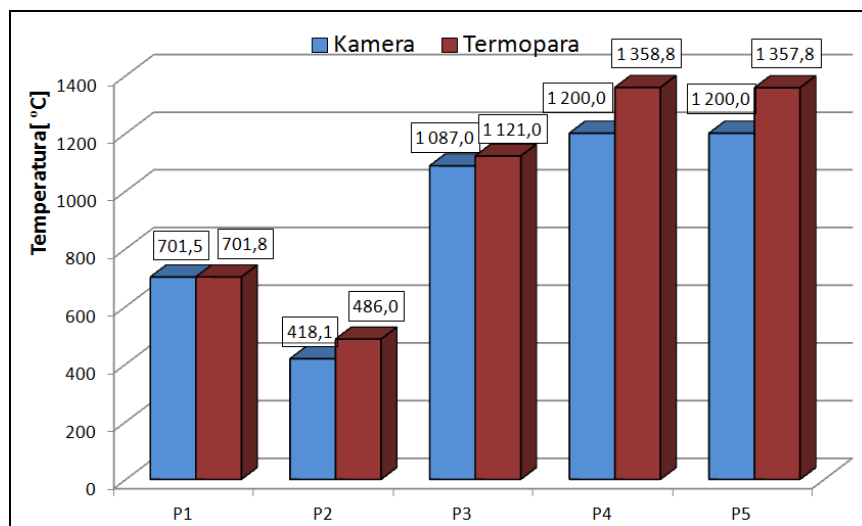
Relatywnie wysokie wartości temperatury uzyskano także w procesie AEDG realizowanym z małymi nastawami napięcia i natężenia prądu ( $P_3$ ). Zaobserwowano tu wzrost temperatury o około 62% w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego

z wykorzystanie dielektryka ( $P_2$ ) oraz około 36% w przypadku procesu szlifowania na sucho ( $P_1$ ).



Rys. 4. Przykładowe obrazy termowizyjne strefy szlifowania: a) szlifowanie konwencjonalne na sucho ( $P_1$ ), b) szlifowanie AEDG;  $U=200V$ ,  $I=25A$  ( $P_5$ )

Fig. 4. Exemplary thermovision images of grinding zone: a) dry conventional grinding ( $P_1$ ), b) AEDG grinding  $U=200V$ ,  $I=25A$  ( $P_5$ )



Rys. 5. Porównanie wartości temperatury w strefie szlifowania mierzonej termoparą i kamerą termowizyjną  
Fig. 5. Comparison of temperature values in grinding zone measured by thermocouple and thermovision camera

Badania wykazały, że w procesie szlifowania konwencjonalnego na sucho ( $P_1$ ) średnia temperatura zarejestrowana za pomocą kamery termowizyjnej była porównywalna z wartościami temperatury zmierzonej termoparami. Prowadzone pomiary temperatury

kamerą termowizyjną procesu szlifowania z użyciem dielektryka ujawniały natomiast niewielkie różnice w porównaniu do wartości temperatury mierzonej za pomocą termopar. Wynosiły one odpowiednio: około 3% dla procesu AEDG realizowanego z małymi nastawami napięcia i natężenia prądu ( $P_3$ ) oraz około 13 % dla procesu szlifowania konwencjonalnego ( $P_2$ ). Te różnice w otrzymanych wartościach mogą być wynikiem niewielkich zakłóceń spowodowanych przez dielektryk.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania umożliwiły sprawdzenie przydatności metody termoparowej i termowizyjnej do pomiaru temperatury oraz określenie rozkładu temperatury w strefie kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym w procesie elektroerozyjnego szlifowania (AEDG) stopu tytanu Ti6Al4V. Wyniki pomiarów potwierdziły, że wraz ze wzrostem parametrów elektrycznych generatora (napięcia i natężenia prądu) wzrasta temperatura w procesie szlifowania.

Celowym jest kontynuowanie prac nad doskonaleniem aparatury pomiarowej oraz prowadzenie dalszych badań w zakresie ustalania rozkładu temperatury szlifowania AEDM, mającej bezpośredni wpływ na tribologiczne właściwości warstwy wierzchniej kształtowanej w tym procesie.

#### LITERATURA

- [1] JAIN V., MOTE RAKESH G., 2005, *On the temperature and specific energy during electrodischarge diamond grinding (EDDG)*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26, 56-67.
- [2] YADAVA V., JAIN V. K., DIXIT M., 2004, *Parametric Study of Temperature Distribution in Electrodischarge Diamond Grinding*, Materials and Manufacturing Processes, 19/6, 1071–1101.
- [3] GOŁĄBCZAK A., ŚWIĘCIK R., 2011, *Badania wpływu wybranych warunków szlifowania AEDG stopu tytanu na temperaturę warstwy wierzchniej*, XXXIV Szkoła Naukowa Obróbki Ściernej, Gdańsk, 395-402.
- [4] GOŁĄBCZAK A., ŚWIĘCIK R., 2009, *Elektroerozyjne szlifowanie stopu tytanu*, Inżynieria Maszyn, 12/1, 19-28.
- [5] ŚWIĘCIK R., 2009, *Experimental investigation of abrasive electrodischarge grinding of Ti6Al4V titanium alloy*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 37/2, 706-711.
- [6] GOŁĄBCZAK A., ŚWIĘCIK R., 2010, *Electro-discharge Grinding: Energy Consumption and Internal Stresses in the Surface Layer*, Proceedings 16<sup>th</sup> International Symposium for Electromachining ISEM XVI, Shanghai, Chiny, 517-522.
- [7] GOŁĄBCZAK A., ŚWIĘCIK R., 2009, *Energochłonność procesu elektroerozyjnego szlifowania stopu tytanu*, XXXII Szkoła Naukowa Obróbki Ściernej, Koszalin, 587-596.

#### INVESTIGATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN ELECTRODISCHARGE GRINDING OF TITANIUM ALLOY

In the paper the investigation results of temperature distribution during electrodischarge grinding (AEDG) of Ti6Al4V alloy. Foundation of elaboration are experimental investigations of plane grinding using diamond grinding wheel (SD) with metal bond. The range of presented investigation results concerns temperature measurements in contact zone of grinding wheel and workpiece with using thermocouple and thermovision camera.