



Metody pomiaru temperatury powierzchni przedmiotów i ściernicy w procesie szlifowania jednotarczowego

Methods of temperature measurement of workpieces' surface and the grinding tool in single-disc grinding process

MARIUSZ DEJA*

W referacie przedstawiono metody pomiaru temperatury w szlifowaniu jednotarczowym z kinematyką docierania. W opracowanym rozwiązaniu wykorzystano małe, zasilane bateryjnie przyrządy rejestrujące temperaturę, tzw. logery pastylkowe o symbolu DS1922L produkcji firmy Dallas Semiconductor. Do pomiarów temperatury wykorzystano również kamerę termowizyjną. Zastosowanie czujników termoelektrycznych pozwoliło zarejestrować temperaturę niezależnie w każdym z przedmiotów obrabianych, co nie było dotychczas prezentowane w dostępnej literaturze dotyczącej pomiaru temperatury w docieraniu lub w szlifowaniu z kinematyką docierania.

SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie powierzchni płaskich, kinematyka docierania, temperatura szlifowania.

The paper presents methods of measuring temperature in single-disc grinding with lapping kinematics. Small battery powered devices recording the temperature, iButton temperature loggers DS1922L produced by Dallas Semiconductor, were used for the measurements. A thermal imaging camera were also used for temperature measurements. The use of loggers allowed to register the temperature independently in each of the workpieces, which was not previously presented in the literature concerning temperature measurements in lapping or in grinding with lapping kinematics.

KEYWORDS: flat grinding, lapping kinematics, grinding temperature.

Wprowadzenie

Szlifowanie z kinematyką docierania charakteryzuje się tym, że w miejsce docieraków stosuje się ściernice. Podobnie jak w procesie docierania, rozróżnia się dwa podstawowe

rodzaje szlifowania z kinematyką docierania: szlifowanie jednotarczowe (jednostronne) i szlifowanie dwutarczowe (dwustronne). Szlifowanie dwutarczowe przeprowadzane jest zazwyczaj z zastosowaniem standardowej kinematyki planetarnej [1]. Szlifowanie dwustronne przy zastosowaniu niskich wartości prędkości szlifowania ($v < 5$ m/s) wydaje się być procesem dobrze rozpoznany zarówno przez producentów obrabiarek, jak i przez stosujących te urządzenia wytwórców części maszyn. Szlifowanie szybkościowe (ang. *high-speed grinding*) powierzchni płasko-równoległych z zastosowaniem kinematyki planetarnej zostało wymienione w pracy [11] jako jedno z głównych wyzwań przemysłowych. Temperatury osiągają wyższe wartości w szlifowaniu dwustronnym z wysokimi prędkościami. Niedostępność strefy obróbki uniemożliwia przeprowadzanie pomiaru temperatury przedmiotu obrabianego (PO), która wydaje się mieć istotne znaczenie w tym procesie.

Szlifowanie jednotarczowe z kinematyką docierania, nie jest tak szeroko wykorzystywane w praktyce przemysłowej. Przyczyną takiego stanu zastosowania tej technologii są prawdopodobnie mniejsze możliwości sterowania i kontroli parametrów kinematycznych z uwagi na swobodny napęd pierścieni prowadzących z separatorami przedmiotowymi. Badania własne potwierdzają możliwość realizacji procesu szlifowania z zastosowaniem standardowego układu [3], oraz układu zmodyfikowanego z niezależnym napędem pierścieni prowadzących [2]. Wartość parametru chropowatości $R_a = 0,08$ nm powierzchni obrabianej uzyskana w badaniach szlifowania jednostronnego [12], wskazuje na celowość prowadzenia dalszych prac nad szerszym zastosowaniem przemysłowym tej technologii. Zastosowanie niezależnego napędu pierścieni prowadzących umożliwia zwiększenie prędkości szlifowania, powodując również wzrost temperatury PO.

Prace dotyczące wyznaczania temperatury docierania lub polerowania oparte były dotychczas głównie na założeniach modelowych [4, 6]. Podstawowym problemem pomiaru temperatury w układzie kinematycznym docierania,

* Dr inż. Mariusz Deja, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, mdeja@pg.gda.pl

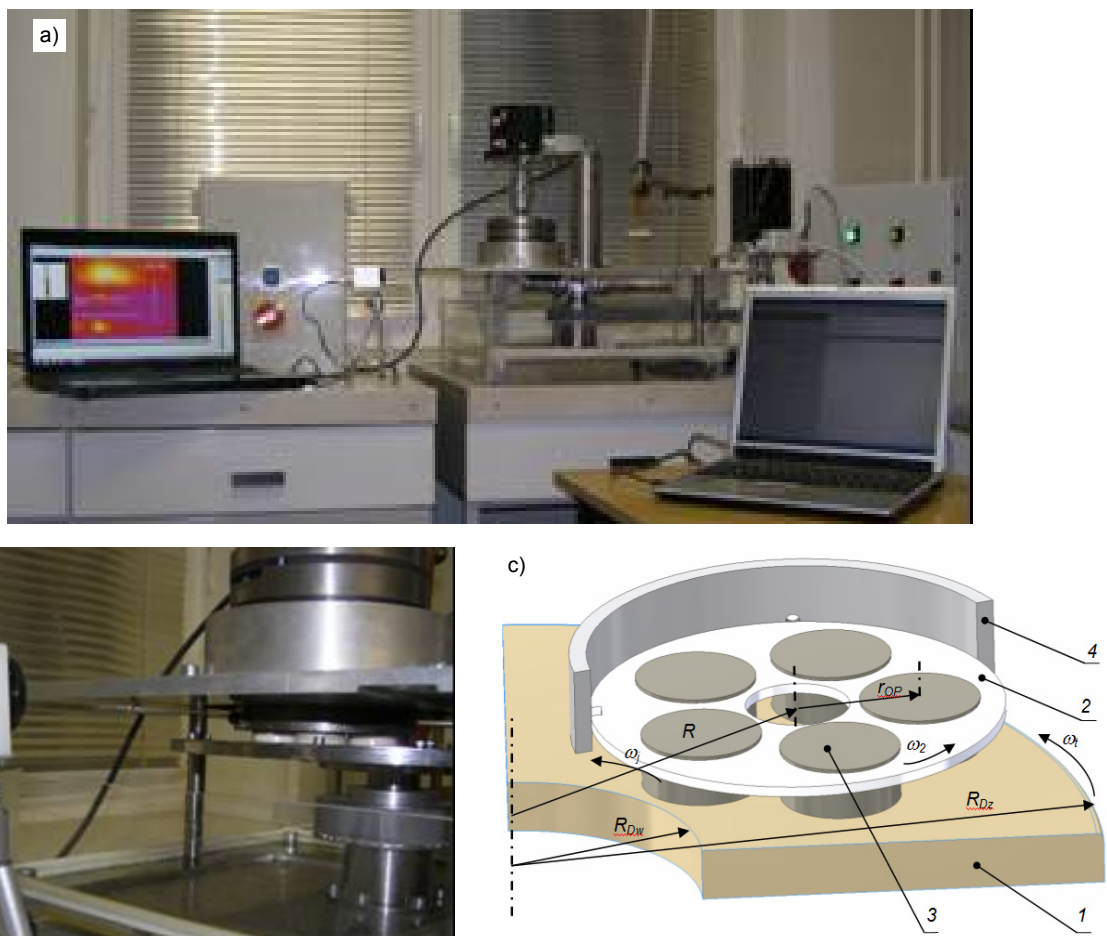
zwłaszcza dwutarczowego, jest odizolowanie przedmiotu obrabianego w separatorze. Uniemożliwia to jego obserwowanie lub zamontowanie standardowej aparatury pomiarowej stosowanej w szlifowaniu [7, 8]. Bezpośredni pomiar temperatury odsłoniętej czynnej powierzchni ściernicy możliwy jest jedynie w szlifowaniu jednotarczowym z wykorzystaniem kamery termowizyjnej, analogicznie jak w pracy [10]. Metody wykorzystujące m.in. czujniki termoelektryczne (termopary) stosowane w łatwy sposób w pomiarze temperatury PO w strefie kontaktu ze ściernicą nie mogą być praktycznie zastosowane w analizowanym procesie szlifowania.

W artykule przedstawiono opracowaną metodę pomiaru temperatury przedmiotów obrabianych z wykorzystaniem ogólnodostępnych i tanich czujników termoelektrycznych umożliwiających rejestrację temperatury przedmiotów w trakcie szlifowania jednotarczowego. Tego typu czujniki były wykorzystane także w szlifowaniu szybkościowym [5]. Nowa konstrukcja stanowiska badawczego umożliwiła również bezpośredni pomiar temperatury PO kamerą termowizyjną, dla sprawdzenia poprawności działania

opracowanego układu pomiarowego z czujnikami termoelektrycznymi.

Stanowisko badawcze

Prototypowa konstrukcja szlifierki z niezależnymi zespołami napędowymi pierścienia prowadzącego i ściernicy (rys. 1) umożliwiła dalsze podwyższenie wartości prędkości szlifowania. W standardowym rozwiązaniu konstrukcyjnym, prędkość szlifowania ograniczona była maksymalną prędkością obrotową ściernicy, wynoszącą $n_t = 64$ obr/min. Zastosowanie silników krokowych umożliwiło zwiększenie zakresu osiąganych parametrów kinematycznych (przy niezmiennych zależnościach kinematycznych w stosunku do standardowej kinematyki docierania jednotarczowego) oraz dwukierunkowe programowanie obrotów pierścienia prowadzącego i ściernicy z możliwością dokładnego pozycjonowania i powtarzania sekwencji ruchów. W szlifowaniu węglików spiekanych G20 wykorzystano prototypowe ściernice ze ścierniwem diamentowym (ziarna D64) na spoiwie niklowym uzyskanym w procesie galwanizacji.

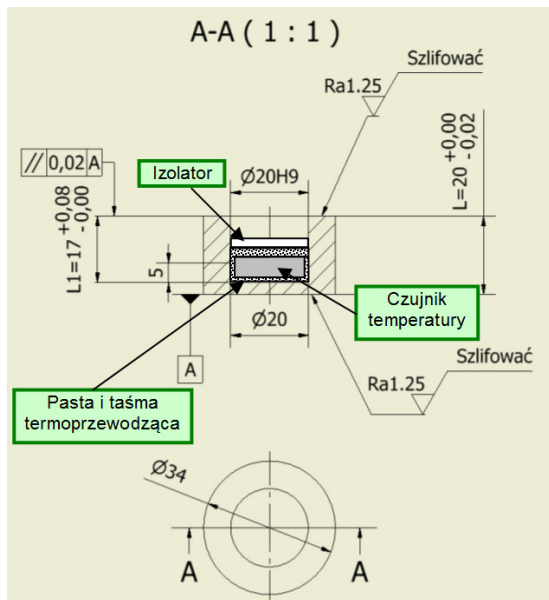


Rys. 1. Stanowisko badawcze do szlifowania jednostronnego: a) widok ogólny, b) pomiar temperatury PO przy zastosowaniu kamery termowizyjnej Thermal Imager PI160, c) schemat badanego układu kinematycznego: 1 - ściernica, 2 - separator, 3 - przedmiot obrabiany, 4 - pierścień prowadzący,

Pomiar temperatury z zastosowaniem czujników termoelektrycznych

W opracowanym rozwiązaniu umożliwiającym pomiar temperatury w ograniczonej dostępną strefie obróbkowej szlifowania, wykorzystano małe, zasilane bateryjnie przyrządy rejestrujące temperaturę, tzw. logery pastylkowe o symbolu DS1922L firmy Dallas Semiconductor [9]. Oprócz programowalnych czujników termoelektrycznych, logery posiadają pamięć wewnętrzną, w której zapisywana jest historia rejestrowania temperatury (zakres pomiarowy -

$40^{\circ}\text{C} + +85^{\circ}\text{C}$ przy rozdzielczości $0,0625^{\circ}\text{C}$). Czujniki temperatury instalowano w przedmiotach wykonanych wg wymagań przedstawionych na rys. 2. Dla badań szlifowania przygotowano po 5 przedmiotów z otworem nieprzelotowym o różnych wysokościach ($L=14, 17, 20$ mm) przy zachowaniu początkowej grubości dna wynoszącej 3 mm.



Rys. 2. Schemat obrabianego przedmiotu z zainstalowanym czujnikiem temperatury

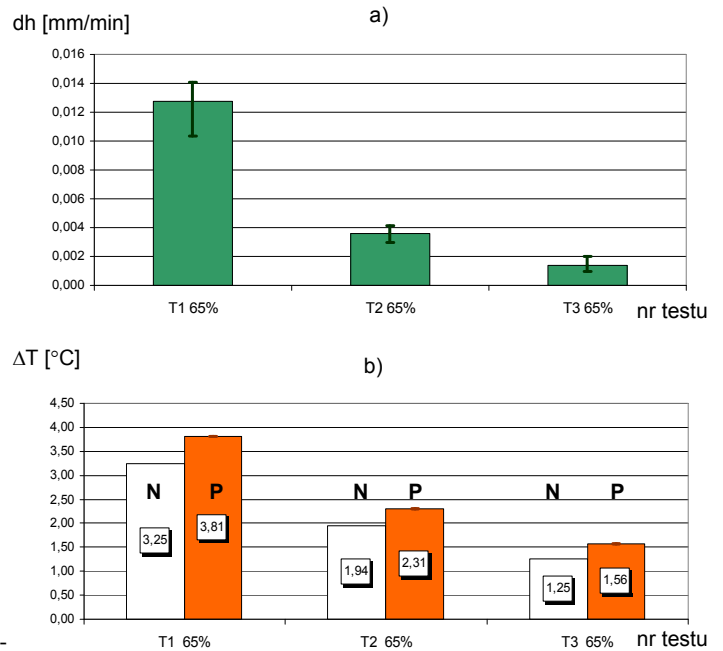
Korpus ściernicy umożliwił zamontowanie trzech czujników DS1922L po wcześniejszym ich zaprogramowaniu - rys. 3. Jeden z czujników umieszczony został na promieniu $R = 117,5$ mm w pobliżu położenia środka separatora ($R = 115$ mm), a kolejne w strefie zewnętrznej ($R = 172$ mm) i wewnętrznej ($R = 63$ mm). W obszarach czujników brzegowych, kontakt PO z czynną powierzchnią ściernicy był minimalny, a przez strefę czujnika środkowego przemieszczała się całkowita powierzchnia obrabiana.



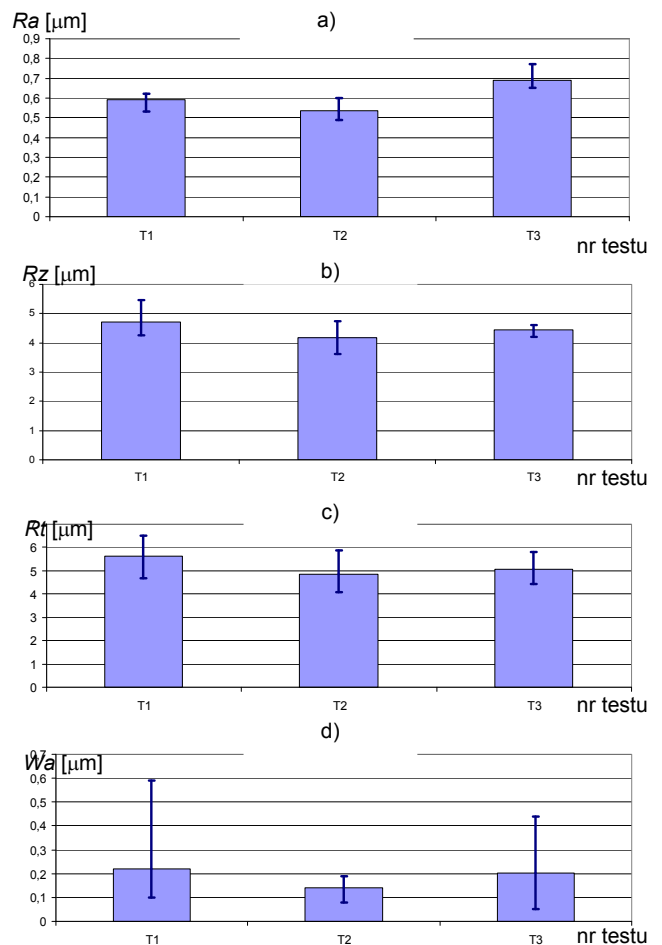
Rys. 3. Korpus narzędzia z czujnikami temperatury (n1+n3) umieszczonymi w nieprzelotowych otworach, przed przykręceniem ściernicy o spoiwie galwanicznym

Obróbka węglików spiekanych G20

Do obróbki węglików spiekanych G20 zastosowano ściernicę z ziarnami diamentowymi D64 utwardzonymi w spoiwie niklowym uzyskanym w procesie galwanizacji, o wysokości 65% w stosunku do maksymalnych wielkości nominalnych zastosowanych ziaren. Naciski jednostkowe wynosiły $p = 12$ kPa, a średnia wartość prędkości szlifowania $v = 0,76$ m/s. Każdy z testów T1÷T3 realizowany był w czasie $\Delta t = 270$ s, z krótką ok. 10- sekundową przerwą po ciągłej obróbce w czasie $\Delta t = 90$ s. W trakcie przerwy następowało pobranie zawiesiny ścierniczej z czynnej powierzchni ściernicy (CPS). Zaprogramowany czas testów skutkowało dużym spadkiem wydajności szlifowania oraz mniejszym przyrostem temperatury w kolejnych testach T1÷T3 - rys. 4. Całkowity czas pracy badanej ściernicy wynosił $T_s = 13,5$ min, przy bardzo małym ubytku materiałowym osiągniętym po teście T3 z uwagi na zużycie CPS. Po każdym z testów uzyskano niewielkie różnice w wartościach parametrów chropowatości i falistości - rys. 5.



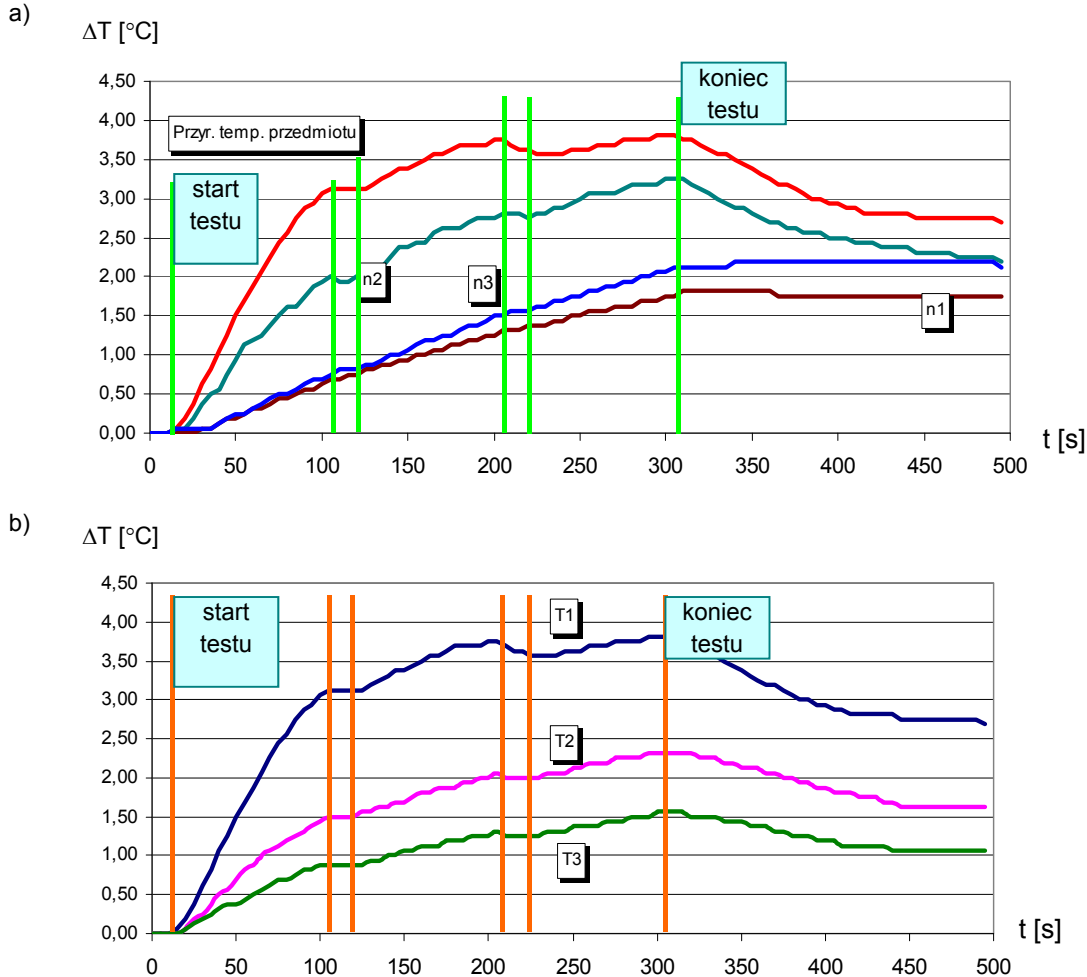
Rys. 4. Wydajność i przyrost temperatury szlifowania jednostarcowego węglików spiekanych G20 ściernicą o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi D64: a) wydajność dla pojedynczego testu, b) porównanie maksymalnego przyrostu temperatury PO (P) z maksymalnym przyrostem temperatury ściernicy (N)



Rys. 5. Wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni PO z węglików spiekanych G20 po szlifowaniu jednostronnym ściernicą o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi D64: a) Ra, b) Rz, c) Rt, d) Wa

Przebieg zmian wartości temperatury PO i ściernicy przedstawiono na wykresie (rys. 6). Tak jak dla większości ściernic [5], największy przyrost temperatury nastąpił w pierwszej fazie testu T1 w czasie $t = 0-90$ s, przy początkowym stanie CPS. W kolejnych dwóch fazach testu T1, jak również w kolejnych testach T2 i T3 przyrosty te są coraz mniejsze z uwagi na mniejszą intensywność obróbki w wyniku zużycia CPS.

Zarejestrowany przyrost temperatury ściernicy jest typowy dla wszystkich badanych ściernic. Najwyższa temperatura została zarejestrowana przez czujnik n2, znajdujący się w części środkowej pierścienia roboczego CPS ($R = 117,5$ mm), a najniższa przez czujniki brzegowe w miejscach z minimalnym kontaktem pomiędzy PO i CPS.

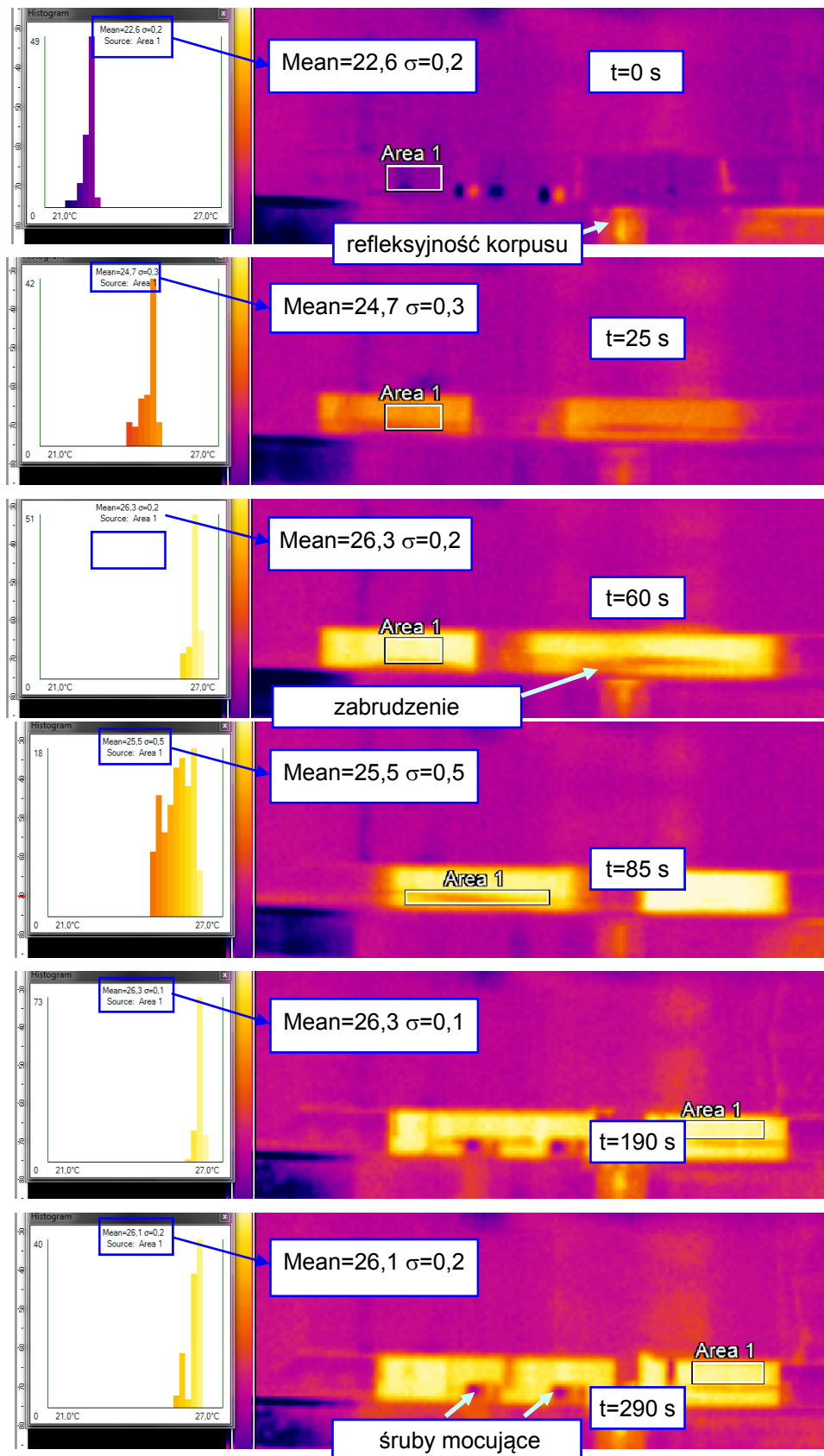


Rys. 6. Przyrost temperatury szlifowania jednostronnego węglików spiekanych G20 ściernicą o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi D64: a) dane z testu T1 dla czujników zainstalowanych w PO i w ściernicy, b) dane z wszystkich testów T1+T3 dla PO

W zrealizowanych testach z wykorzystaniem wszystkich ściernic [5], temperatura PO była wyższa od temperatury narzędzia, zwłaszcza w początkowej fazie badań. Związane to było z ciągłym kontaktem obrabianych powierzchni z CPS, powtarzającym się okresowo w określonych miejscach czynnej powierzchni. Różnica pomiędzy przyrostami temperatur przedmiotów obrabianych i ściernicy zmniejszała się w kolejnych testach przy mniejszej intensywności obróbki. W końcowych testach osiągnęto zbliżone wartości przyrostu temperatury zarejestrowanej przez środkowy czujnik zainstalowany w korpusie narzędzia i przyrostu temperatury zarejestrowanej przez czujniki zainstalowane w PO.

Podobne wartości przyrostów temperatury PO dla ściernicy o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi D64 zostały zarejestrowane przez kamerę termowizyjną - rys. 7. Przemierzające się w zmiennej odległości do kamery przedmioty obrabiane, utrudniały analizę temperatury określonych próbek. Na termogramach widoczne są różnice

w rozkładzie temperatury na analizowanych powierzchniach bocznych PO. Przeprowadzenie prawidłowej i szybkiej analizy było utrudnione z uwagi na zanieczyszczenie powierzchni bocznej PO zawieszoną ściernicą oraz częściowe zasłonięcie analizowanych powierzchni PO przez śruby mocujące ściernicę do korpusu. Zabrudzenie przedmiotów było niewielkie ale występowało zwłaszcza w obszarze najbardziej interesującym, czyli w pobliżu CPS. Na termogramach widoczny jest niekorzystny wpływ refleksyjności bocznej powierzchni korpusu na rozkład temperatury. Średnie wartości temperatury z wybranych obszarów „Area 1” zależą od ich wielkości i położenia, które z uwagi na kinematykę procesu oraz wymienione problemy, nie mogą być stałe. Utrudnia to przeprowadzenie szybkiej analizy danych pomiarowych. Zastosowanie czujników termoelektrycznych umożliwiło natomiast zarejestrowanie temperatury szlifowania niezależnie w każdym z poruszających się PO, oraz w różnych miejscach obracającej się ściernicy z możliwością przeprowadzenia szybkiej analizy danych pomiarowych.



Rys. 7. Termogramy z testu T1 w funkcji czasu szlifowania jednostronnego węglików spiekanych G20 ściernicą o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi D64, z zaznaczonymi obszarami zakłócającymi automatyczną analizę wyników pomiaru temperatury

Podsumowanie

Zastosowanie metody pomiarowej z wykorzystaniem specjalnych czujników termoelektrycznych (tzw. termologerów) umożliwiło pomiar temperatury niezależnie w każdym

z przedmiotów obrabianych oraz w różnych miejscach ściernicy, co nie było dotychczas prezentowane w dostępnej literaturze dotyczącej pomiaru temperatury w docieraniu lub w szlifowaniu z kinematyką docierania. Opracowana metoda wyeliminowała zakłócenia pomiarowe występujące w meto-

dzie termowizyjnej, wynikające głównie z zanieczyszczenia badanych obiektów zawieszoną ścierną.

Temperatura przedmiotów szlifowanych osiągała niższe wartości niż temperatura ściernic. Różnica pomiędzy przyrostami temperatury przedmiotów obrabianych i ściernicy zmniejszała się w kolejnych testach przy mniejszej intensywności obróbki, wynikającej ze zużycia CPS. Najwyższa temperatura ściernicy została rejestrowana przez czujnik znajdujący się w części środkowej pierścienia roboczego CPS, a najniższa przez czujniki brzegowe w miejscach z minimalnym kontaktem pomiędzy PO i CPS, co potwierdza poprawność opracowanej metody pomiaru.

Podobne wartości przyrostów temperatury PO podczas szlifowania zostały zarejestrowane przez kamerę termowizyjną. Przemierzające się w zmiennej odległości od kamery przedmioty obrabiane, utrudniały jednak pomiar temperatury określonych próbek. Różnice w rozkładzie temperatury na powierzchni bocznej PO wynikały z jej zanieczyszczenia zawieszoną ścierną oraz z częściowego zastąpienia powierzchni bocznych przez śruby mocujące ściernicę do korpusu. Utrudniało to również przeprowadzenie automatycznej analizy termogramów.

Dalsze badania szlifowania ściernicami o różnej wysokości warstwy spoiwa niklowego uzyskanego w procesie galwanizacji wydają się uzasadnione dla tego typu materiału trudno skrawalnego, jakim są węgliki spiekane. Uzyskane dane pomiarowe umożliwią również sprawdzenie planowanych badań modelowych.

LITERATURA

1. Abrahamson G.R., Duwell E.J., McDonald W.J., Wear and lubrication as observed on a lap table with loose and bonded abrasive grit. *Journal of Tribology*. Vol. 113, No. 2, s. 249–254, 1991.
2. Barylski A., Deja M., Finishing of Ceramics in a Single-Disk Lapping Machine Configuration. *Solid State Phenomena*, Vol. 165, s. 237–243, 2010.
3. Barylski A., Deja M., Microgrinding of flat surfaces on single-disc lapping machine. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 5, Nos. 2/3, s. 245–267, 2009.
4. Bulsara V.H., Ahn Y., Chandrasekar S., Farris Th.N., Polishing and Lapping Temperatures. *Journal of Tribology*, Vol. 119, Issue 1, s. 163–170, 1997.
5. Deja M., Wybrane problemy szlifowania powierzchni płaskich z kinematyką docierania. Monografia nr 143, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 222 s, 2013.
6. Horng J.H., Jeng Y.R., Chen C.L., A model for temperature rise of polishing process considering effects of polishing pad and abrasive. *Journal of Tribology*, Vol. 126, No. 3, s. 422–429, 2004.
7. Kuriyagawa T., Syoji K., Ohshita H., Grinding temperature within contact arc between wheel and workpiece in high-efficiency grinding of ultrahard cutting tool materials. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, Issues 1–3, s. 39–47, 2003.
8. Malkin S., Guo C., Thermal analysis of grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 56, Issue 2, s. 760–782, 2007.
9. Materiały informacyjne firmy Maxim Integrated: DS1922L, DS1922T iButton Temperature Logger with 8KB Datalog Memory [dostęp: 20 czerwca 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/4088/t/al>.
10. Molenda J., Barylski A., Badania temperatury elementów układu wykonawczego docierarki jednotarczowej. W: *Problemy i tendencje rozwoju obróbki ścierniczej*. Red. P. Cichosz, Politechnika Wroclawska, Wroclaw 2012, s. 257–264. ISBN 978-83-917677-6-4.
11. Oliveira J.F.G., Silva E.J., Guo C., Hashimoto F., Industrial challenges in grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 58, Issue 2, s. 663–680, 2009.
12. Sanchez L.E.A., Jun N.Z.X., Flocchi A.A., Surface finishing of flat pieces when submitted to lapping kinematics on abrasive disc dressed under several overlap factors. *Precision Engineering*, Vol. 35, Issue 2, s. 355–363, 2011.