

Seweryn KIERAŚ<sup>1</sup>  
Krzysztof NADOLNY<sup>1\*</sup>

## ANALIZA EFEKTYWNOŚCI CHŁODZENIA POWIERZCHNI ŚCIERNICY Z UŻYCIEM DYSZ SCHŁODZONEGO SPRĘŻONEGO POWIETRZA

Jedną z najnowszych metod chłodzenia strefy szlifowania jest doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego w postaci schłodzonego sprężonego powietrza (SSP) z zastosowaniem dysz CAG (ang. *Cold Air Guns*). Podstawową zaletą tej metody jest wyeliminowanie kosztów związanych z pozyskaniem i utylizacją płynów chłodząco-smarujących. Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule było określenie rzeczywistego efektu chłodzącego, uzyskanego na powierzchni ściernicy, wynikającego z zastosowania dysz podających schłodzone sprężone powietrze. Do badań wytypowano dwie typowe dysze CAG renomowanych producentów: WNT 6910.15.3-7 oraz Vortec 610. W przeprowadzonych badaniach porównawczych korzystniejsze wyniki analiz uzyskano dla dyszy CAG Vortec 610, dla której temperatura powierzchni ściernicy wynosiła około  $-5^{\circ}\text{C}$ . W tych samych warunkach zastosowanie dyszy WNT 6910.15.3-7 pozwoliło na schłodzenie powierzchni ściernicy do około  $-2,5^{\circ}\text{C}$ . Należy jednak podkreślić, że na uzyskane wyniki wpływ miały różnice w budowie elastycznych przewodów doprowadzających SSP do strefy obróbki, dlatego dokonano dodatkowych pomiarów objętościowego natężenia przepływu czynnika chłodzącego.

### 1. WPROWADZENIE

Proces szlifowania wiąże się ze znacznym zwiększeniem temperatury w strefie obróbki. Rozkład ciepła, które powstaje w strefie styku ściernicy z powierzchnią obrabianą ma charakter nierównomierny, co wpływa na zwiększenie naprężeń cieplnych zarówno w ściernicy jak i w przedmiocie obrabianym (PO). Większa część energii wykorzystanej do procesu szlifowania przekształcona zostaje w ciepło, którego nadmiar oddziaływujący na powierzchnię przedmiotu obrabianego prowadzi często do powstawania defektów szlifierskich [10]. Ponieważ przestrzeń międzyziarnowa (przeźreń, którą zapełniają powstające wióry) jest stosunkowo mała a utrzymanie zdolności skrawnej na wysokim poziomie wymaga, aby była ona wolna i sprawnie wspomagała transport produktów szlifowania ze strefy obróbki, stosuje się w większości przypadków płyn chłodząco-smarujący (PCS). Głównym jednak powodem stosowania PCS jest smarowanie strefy kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym oraz jej chłodzenie. Chłodzenie pozwala skutecznie zwiększyć parametry wpływające na wydajność szlifowania a smarowanie

<sup>1</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, Koszalin

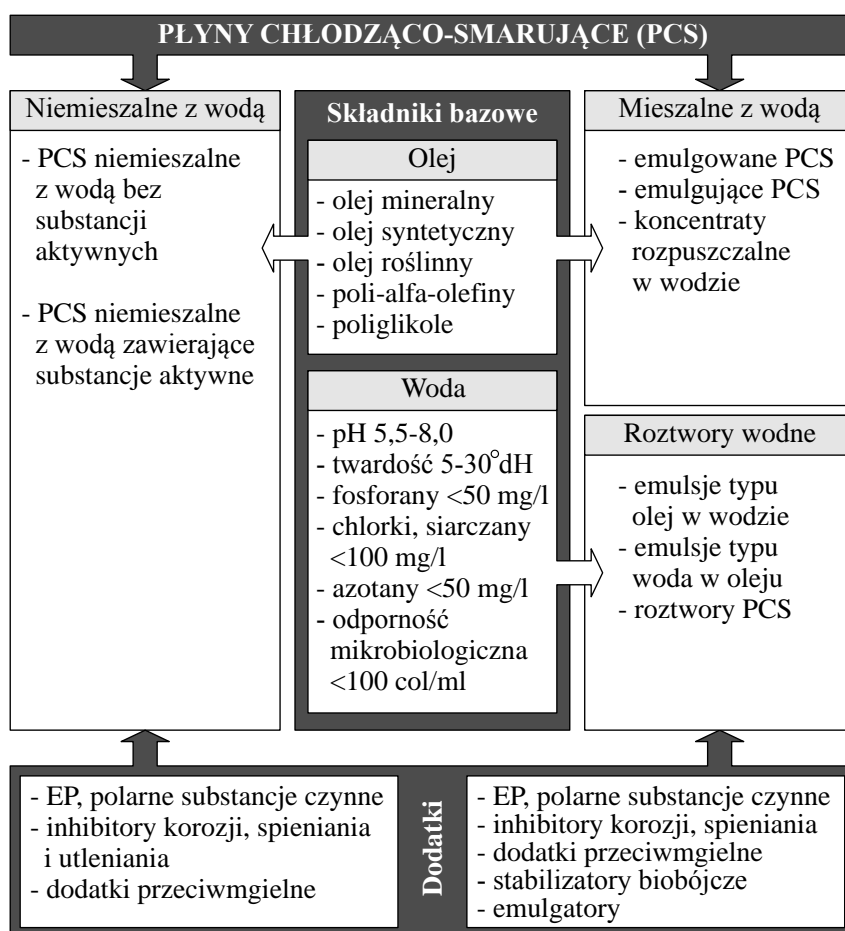
\* E-mail: krzysztof.nadolny@tu.koszalin.pl

wpływa na zmniejszenie tarcia ostrzy o niezdefiniowanej geometrii i często ujemnym kącie natarcia [6].

Do podstawowych zadań płynów chłodząco-smarujących podczas procesu szlifowania należą [8]:

- tworzenie stabilnej warstewki smaru, która zmniejsza tarcie między ziarnem ściernym i PO oraz między spoiwem i PO,
- chłodzenie powierzchni PO i czynnej powierzchni ściernicy (CPS), poprzez przejmowanie i odprowadzanie ciepła,
- zwilżanie i czyszczenie ściernicy,
- zabezpieczenie antykorozyjne obrabiarki i materiału obrabianego,
- przeciwdziałanie rozwojowi bakterii, spienianiu się itp.

Dobór odpowiedniego PCS jest bardzo istotny dla procesu szlifowania, gdyż zróżnicowane właściwości biologiczne, fizyczne i chemiczne PCS wpływają w znacznym stopniu na prawidłowy jego przebieg [3],[8],[9]. Podstawowym i kluczowym kryterium podziału PCS jest występowanie w nim wody [7],[8],[12],[14]. Na rysunku 1 przedstawiono ogólne zestawienie głównych typów PCS, które stosowane się we wszystkich procesach skrawania, także w szlifowaniu.



Rys. 1. Podział i skład płynów chłodząco-smarujących stosowanych w procesach szlifowania [2]

Fig. 1. Classification and composition of coolants used in grinding processes [2]

Zarówno wydajność jak i sposób doprowadzenia PCS do strefy szlifowania mają istotny wpływ na przebieg procesu szlifowania. Zaprojektowano wiele różnych typów dysz w celu sprostania licznym wymogom dotyczącym sposobu aplikacji PCS do strefy kontaktu ściernicy z powierzchnią obrabianą. Ogólnie rzecz ujmując istnieją trzy kryteria podziału typów dysz doprowadzających PCS do strefy szlifowania [4]:

- ze względu na funkcję (zalewające, nie zalewające),
- ze względu na metodę skupienia (dysze o strumieniu swobodnym, dysze o strumieniu skupionym (dysze spiętrzające – ang. *swell nozzle*, dysze rozpylające),
- ze względu na geometrię dyszy (dysze w kształcie ściętej rury – ang. *squeezed pipe*, dysze igłowe – ang. *needle nozzle*, dysze trzewikowe – ang. *shoe nozzle*).

Jedną z najnowszych metod chłodzenia strefy szlifowania jest doprowadzenie schłodzonego sprężonego powietrza (SSP) z zastosowaniem dysz CAG (ang. *Cold Air Guns*) [5],[11],[13]. Podstawowa zaleta dysz CAG polega na zastosowaniu powietrza jako medium chłodzącego, co wiąże się z wyeliminowaniem kosztów związanych z pozyskaniem i utylizacją PCS [1]. Dysze CAG, dzięki zastosowaniu w ich konstrukcji rurek wirowych (ang. *vortex tubes*), pozwalają rozdzielić strumień sprężonego powietrza na zimny i gorący, bez konieczności stosowania elementów ruchomych. Gorące powietrze, będące produktem ubocznym, odprowadzane jest do otoczenia, natomiast strumień SSP doprowadza się do strefy szlifowania [15]. SSP uzyskane za pomocą dysz CAG może osiągnąć temperaturę do 55°C niższą w odniesieniu do wartości temperatury powietrza zasilającego urządzenie [15]. W dyszach CAG strumień sprężonego powietrza jest obracany wokół własnej osi dzięki generatorowi wiru. Pozwala to uzyskać strumień zimnego i gorącego powietrza. Dzięki generatorowi wiru powietrze wiruje z prędkością około 1.000.000 obr./min w kierunku zaworu kontrolnego. Pewna część gorącego szybko wirującego powietrza przechodzi przez zawór kontrolny i przedostaje się do otoczenia. Pozostała część strumienia powietrza, z mniejszą prędkością, zmuszana jest do powrotu wewnątrz wirującego strumienia powietrza i oddając mu energię w postaci ciepła schładza się i jest kierowana na przeciwny koniec dyszy. W ten sposób na jednym końcu rurki wirowej otrzymuje się strumień gorącego powietrza, na drugim strumień zimnego powietrza. Zawór kontrolny umieszczony na wylocie gorącego powietrza pozwala na regulację temperatury strumieni gorącego i schłodzonego powietrza [15].

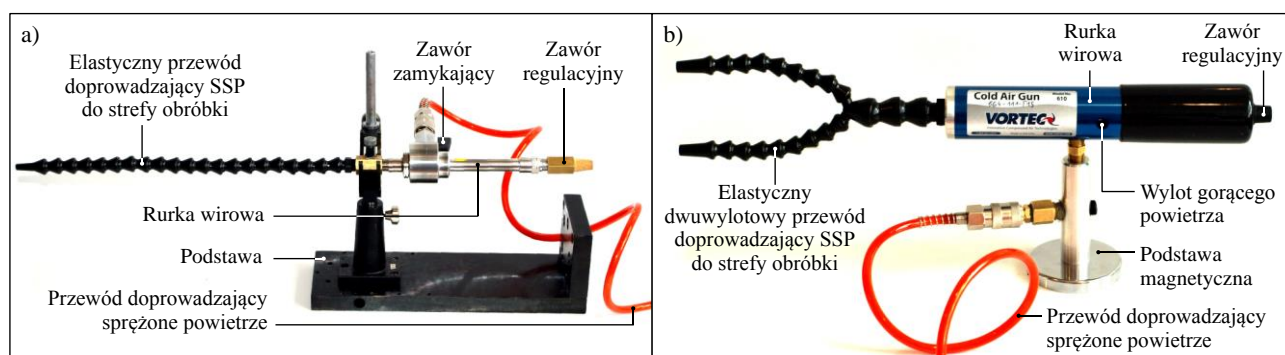
## 2. CHARAKTERYSTYKA DYSZ CAG ZASTOSOWANYCH W BADANIACH

Do badań wytypowano dwie typowe dysze CAG renomowanych producentów: WNT 6910.15.3-7 oraz Vortec 610. Do zasilania badanych dysz stosuje się przefiltrowane sprężone powietrze. Zastosowanie w obydwóch dyszach rurek wirowych umożliwia generowanie strumienia SSP o temperaturze poniżej 0°C, natomiast występowanie zaworu regulacyjnego w konstrukcji badanych dysz umożliwia sterowanie wartością temperatury i objętością strumienia SSP [16],[17].

Zakres pracy dyszy WNT 6910.15.3-7 mieści się w przedziale 0,3-0,7 MPa. Wg danych producenta dysza WNT pozwala otrzymać strumień SSP o temperaturze około

-40°C, a moc chłodzenia dyszy osiąga wartość do 733 W. W warunkach doprowadzenia powietrza zasilającego o ciśnieniu 0,69 MPa oraz temperaturze +21°C wydatek powietrza wynosi 425 l/min [17]. Dyszę WNT 6910.15.3-7 wyposażono dodatkowo w stabilną podstawę oraz elastyczny jednowylotowy przewód doprowadzający SSP do strefy obróbki (rys. 2a).

Dysza Vortec 610, jak podaje producent, charakteryzuje się wydajnością chłodzenia w granicach 264 W, przy wydatku powietrza rzędu 57-425 l/min. Ponadto, dysza Vortec 610 umożliwia wytworzenie strumienia SSP o temperaturze do nawet 55,6°C mniejszej w porównaniu do temperatury powietrza, które zasila dyszę [16]. W skład wyposażenia dyszy Vortec 610 wchodził elastyczny dwuwylotowy przewód służący do doprowadzania SSP do strefy obróbki i podstawa magnetyczna, umożliwiająca łatwą instalację dyszy w obszarze roboczym szlifierki (rys. 2b).



Rys. 2. Elementy funkcjonalne badanych dysz CAG: a) dysza WNT 6910.15.3-7; b) dysza Vortec 610  
Fig. 2. Functional components of examined CAG nozzles: a) WNT 6910.15.3-7 nozzle; b) Vortec 610 nozzle

Tabela 1 przedstawia dane producenta dyszy WNT 6910.15.3-7 dotyczące temperatury powietrza mierzonej w miejscu efektywnego wylotu z dyszy. W tabeli 2 przedstawiono dane producenta dotyczące wybranych parametrów dyszy Vortec 610.

Tabela 1. Dane producenta dotyczące temperatury powietrza mierzonej w miejscu efektywnego wylotu z dyszy WNT 6910.15.3-7 [17]

Table 1. Manufacturer's data of the air temperature measured on effective outlet of the WNT 6910.15.3-7 nozzle [17]

Wartość ciśnienia powietrza zasilającego (MPa)	Temperatura powietrza na wylocie dyszy (°C)		
	Udział zimnego powietrza 25%	Udział zimnego powietrza 50%	Udział zimnego powietrza 75%
0,3	-31	-22	-6
0,4	-35	-35	-8
0,5	-39	-28	-10
0,6	-42	-31	-11
0,7	-46	-34	-13

Tabela 2. Dane producenta dotyczące wybranych parametrów dyszy Vortec 610 [16]

Table 2. Manufacturer's data of selected Vortec 610 nozzle parameters [16]

Moc chłodzenia (W)	Wydatek powietrza (l/min)	Najniższa osiągnięta wartość temperatury (°C)	Natężenie przepływu powietrza (l/min)	Masa urządzenia (kg)
264	425	-23	57-425	1,4

### 3. METODYKA BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań było określenie rzeczywistego efektu chłodzącego, uzyskanego na powierzchni ściernicy, wynikającego z zastosowania dysz podających schłodzone sprężone powietrze. Ponadto dokonano analizy bezwładności cieplnej oraz objętościowego natężenia przepływu badanych dysz CAG. Pomiary temperatury przeprowadzono przy zastosowaniu kompletnego planu eksperymentu bez powtórzeń ( $n = 1$ ). Natomiast w przypadku pomiarów objętościowego natężenia przepływu również zastosowano plan kompletny, z tą różnicą, że liczba powtórzeń pomiarów wynosiła  $n = 5$ .

### 4. SYSTEMY POMIAROWE I TECHNIKA BADAŃ

Termogramy umożliwiające ocenę skuteczności chłodzenia powierzchni ściernicy przy zastosowaniu badanych dwóch dysz CAG zostały zarejestrowane za pomocą kamery termowizyjnej Testo 890 produkcji firmy Testo AG (rys. 3). W tabeli 3 przedstawiono dane techniczne kamery termowizyjnej Testo 890. W zarejestrowanych termogramach wydzielano każdorazowo obszar pomiarowy w wybranym fragmencie uzyskanego wyniku pomiaru. W pomiarach stosowano różne wartości współczynnika emisyjności  $\varepsilon$  w zależności od rodzaju ocenianej powierzchni. W opisywanych badaniach przyjęto wartość  $\varepsilon = 0,94$  dla powierzchni ściernicy [21] oraz  $\varepsilon = 0,95$  dla czarnego tworzywa sztucznego



Rys. 3. Widok ogólny kamery termowizyjnej Testo 890 [18]

Fig. 3. General view of the Testo 890 thermovision camera [18]

[22], z którego wykonane były elastyczne przewody wylotowe dzysz CAG. Analizy termogramów dokonywano z użyciem oprogramowania Testo IRSoft w wersji 3.2, dostarczonego przez producenta kamery termowizyjnej.

Tabela 3. Dane techniczne kamery termowizyjnej Testo 890 [18]  
Table 3. Technical data of Testo 890 thermovision camera [18]

Dane obrazu termowizyjnego	
Rodzaj detektora	640 × 480 pikseli
Czułość termiczna (NETD)	< 40 mK przy +30 °C
Pole widzenia/ minimalna odległość ogniskowa	42° × 32° / 0,1 m
Rozdzielczość geometryczna (IFOV)	1,13 mrad (42° × 32°)
Częstotliwość odświeżania obrazu	33 Hz
Ustawienie ostrości	automatyczne / manualne
Zakres spektralny	7,5 do 14 μm
Dane obrazu rejestrowanego w paśmie widzialnym	
Pole widzenia / minimalna odległość ogniskowa	3,1 Mpix / 0,5 m
Dane pomiarowe	
Zakres temperatury	-30 do +100°C / 0 do +350 °C (przełączalny)
Dokładność	±2°C (±2%) mierzonej wartości
	±3°C mierzonej wartości w zakresie -30 do -22°C
Ustawienia emisyjności	0,01 do 1

Pomiary prędkości przepływu strumienia SSP generowanego przez badane dysze CAG odbywały się przy użyciu urządzenia Testo 440 (Testo AG) – rys. 4. W tabeli 4 przedstawiono dane techniczne anemometru Testo 440 [19].



Rys. 4. Widok ogólny anemometru Testo 440 [20]  
Fig. 4. General view of the Testo 440 anemometer [20]

Tabela 4. Dane techniczne anemometru Testo 440 [19]

Table 4. Technical data of Testo 440 anemometer[19]

Zakres pomiarowy	0,2 do 40 m/s
Dokładność pomiarowa	większa niż $\pm 2\%$ dla maksymalnej prędkości przepływu 0-10 m/s
	większa niż $\pm 2\%$ dla maksymalnej prędkości przepływu 10-20 m/s
	większa niż $\pm 3\%$ dla maksymalnej prędkości przepływu 0,1 m/s
Rozdzielczość	0,1 m/s
Wyświetlacz	Dwuliniowy, wysokość wyświetlanych znaków 9 mm i 6 mm

W pierwszej części badań dokonano analizy bezwładności temperaturowej rozpatrywanych dysz CAG. W tym celu co 30 s rejestrowano termogramy przedstawiające rozkład temperatury badanych dysz w czasie  $t = 15$  min., przy różnych ustawieniach pokrętkła zaworu regulacyjnego (minimum, średnio, maksimum). Ogółem rejestrowano po 31 termogramów dla każdej serii pomiarów.

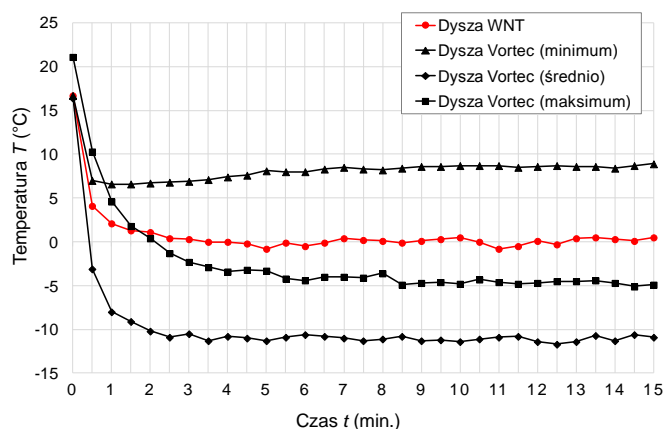
W kolejnym etapie prac przeprowadzono pomiary skuteczności schładzania powierzchni ściernicy z użyciem badanych dysz CAG, również na podstawie termogramów, zarejestrowanych z użyciem kamery termowizyjnej Testo 890 (rys. 3 i tab. 3). Wylot elastycznych przewodów doprowadzających strumień SSP skierowany był pod kątem prostym do bocznej powierzchni ściernicy o oznaczeniu technicznym 1–250×32×98–99A60J7V. W celu określenia wpływu odległości podawania strumienia SSP na temperaturę schładzanego obiektu sporządzono termogramy w warunkach odsunięcia wylotu dysz od powierzchni bocznej ściernicy o 10, 20 i 30 mm. Rejestracji termogramów dokonywano w czasie  $t = 10$  min. w odstępach co 30 s, przy czym pomiar rozpoczynano po upływie 15 minut od rozpoczęcia działania dyszy w celu osiągnięcia warunków ustalonych.

Trzeci etap badań dotyczył pomiarów wartości objętościowego natężenia przepływu strumienia SSP generowanego przez badane dysze. W przypadku każdej z analizowanych dysz CAG producent wyposażył ją w przewód elastyczny innego typu. W rezultacie odznaczały się one różną średnicą otworów wylotowych, jak również różną ich liczbą. Dysza WNT 6910.15.3-7 posiadała przewód jednowylotowy o średnicy końcówki  $\phi 3,0$  mm, natomiast dysza Vortec 610 wyposażona została w przewód dwuwylotowy o średnicy końcówki wynoszącej  $\phi 6,3$  mm. Sumaryczne pole przekroju wylotu dla dyszy WNT wynosiło  $7,1 \text{ mm}^2$  a dla dyszy Vortec (sumując wartości dla dwóch końcówek) aż  $62,3 \text{ mm}^2$ . W celu porównania skuteczności chłodzenia obu typów dysz konieczne było uzupełnienie uzyskanych wyników pomiarów temperatury określeniem objętościowego natężenia przepływu (w  $\text{m}^3/\text{s}$ ) stanowiącego iloczyn prędkości przepływu SSP na wylocie dyszy (wyrażonej w m/s) i jej pola przekroju (w  $\text{m}^2$ ). Do pomiaru prędkości wypływu SSP zastosowano anemometr Testo 440 (rys. 4 i tabela 4).

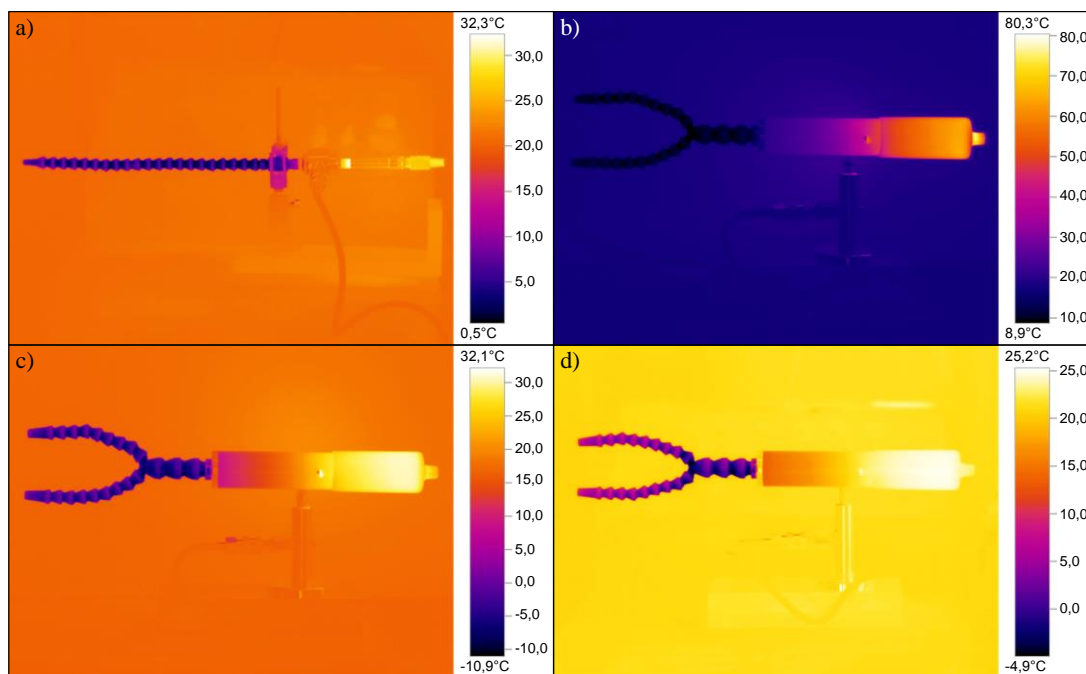
We wszystkich próbach wartość ciśnienia powietrza zasilającego dysze była stała i wynosiła 0,6 MPa.

## 5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Przeprowadzone pomiary charakterystyki bezwładności cieplnej badanych dysz CAG wykazały, że najkrótszym czasem początkowego ustalenia temperatury (około 45 s) odznaczała się dysza Vortec przy ustawieniu pokrętła zaworu regulacyjnego w pozycji minimum umożliwiającą generowanie najcieplejszego strumienia SSP (rys. 5). Początkowe ustalenie temperatury dyszy Vortec, przy ustawieniu generowania najzimniejszego



Rys. 5. Wykres bezwładności cieplnej badanych dwóch dysz CAG w czasie  $t = 15$  min  
 Fig. 5. Diagram of two selected CAG nozzles thermal inertia in work time  $t = 15$  min



Rys. 6. Termogramy zarejestrowane podczas pomiaru bezwładności cieplnej badanych dysz CAG (stan po upływie czasu  $t = 15$  min): a) dysza WNT; b) dysza Vortec (ustawienie minimalne); c) dysza Vortec (ustawienie średnie); d) dysza Vortec (ustawienie maksymalne)

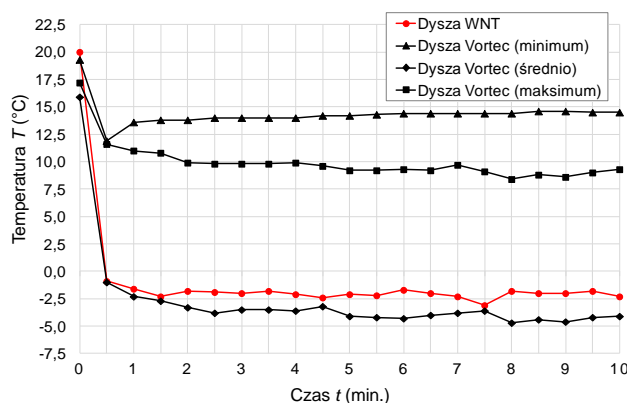
Fig. 6. Thermograms obtained during measurement of the thermal inertia of examined CAG nozzles (state after  $t = 15$  min): a) WNT nozzle; b) Vortec nozzle (minimum setup); c) Vortec nozzle (medium setup); d) Vortec nozzle (maximum setup)



strumienia SSP (maksimum) trwało najdłużej spośród wszystkich badanych ustawień dysz – około 4,5 min. Warto zauważyć, że temperatura dyszy Vortec przy ustawieniu pokrętła regulacji w pozycji minimum, obniża się relatywnie szybko, jednak po osiągnięciu temperatury granicznej (około  $6,6^{\circ}\text{C}$ ), następowała dalsza stabilizacja parametrów, czego efektem jest ogrzewanie się układu nawet do około 5 minut po rozruchu dyszy.

Rysunek 6 przedstawia termogramy zarejestrowane podczas pomiaru bezwładności cieplnej badanych dysz CAG po czasie  $t = 15$  min.

Na rys. 7 przedstawiono zmiany temperatury powierzchni ściernicy w czasie  $t = 10$  min, przy odsunięciu wylotu dyszy od schładzanej powierzchni o wartość  $l = 10$  mm. Niewielka odległość, z której doprowadzano strumień SSP pozwoliła osiągnąć najmniejsze wartości temperatury schładzanej powierzchni ściernicy. Minimalna zarejestrowana wartość temperatury powierzchni ściernicy wynosiła blisko  $-5^{\circ}\text{C}$ , po ponad 8 minutach chłodzenia z użyciem dyszy Vortec, przy ustawieniu pokrętła zaworu regulacyjnego w pozycji średniej. Nieco mniejszą skutecznością chłodzenia odznaczała się dysza WNT, która w warunkach doprowadzania strumienia SSP na powierzchnię boczną ściernicy odsuniętą o 10 mm umożliwiła jej schłodzenie do blisko  $-2,5^{\circ}\text{C}$ .

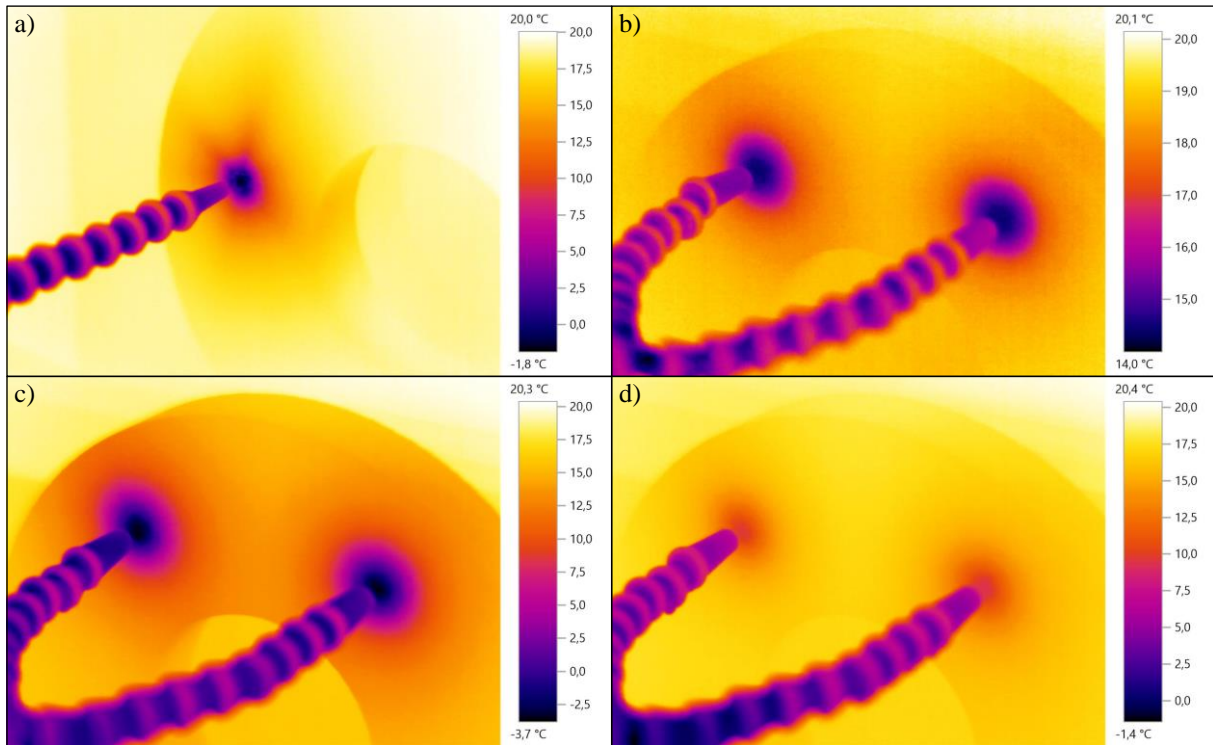


Rys. 7. Wykres zmiany temperatury powierzchni ściernicy w czasie  $t = 10$  min przy odsunięciu wylotu dyszy od schładzanej powierzchni o 10 mm

Fig. 7 Diagram of grinding wheel surface temperature changing in time  $t = 10$  min with 10 mm distance between nozzle outlet and cooled surface

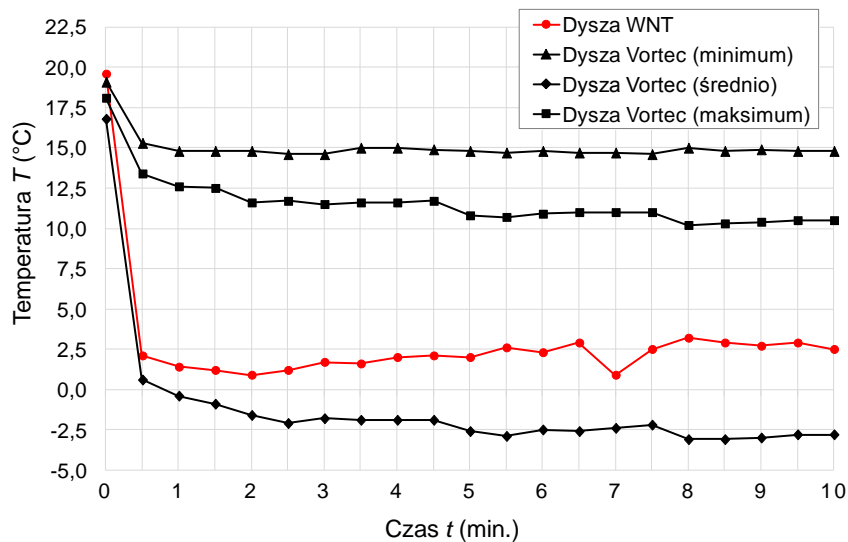
Rysunek 8 prezentuje zbiór termogramów zarejestrowanych podczas pomiaru zmiany temperatury powierzchni ściernicy w czasie  $t = 10$  min, podczas chłodzenia z użyciem badanych dysz CAG, odsuniętych od schładzanej powierzchni o odległość  $l = 10$  mm.

Wykres zamieszczony na rys. 9 przedstawia zmiany temperatury powierzchni ściernicy w czasie  $t = 10$  min, przy odsunięciu wylotu dyszy od schładzanej powierzchni o odległość  $l = 20$  mm. Dwukrotne zwiększenie odległości  $l$  wylotu dyszy od schładzanej powierzchni ściernicy miało istotny wpływ na skuteczność jej chłodzenia. Jedynie dysza Vortec, przy ustawieniu pokrętła regulacji w pozycji średniej, umożliwiła osiągnięcie temperatury na schładzanej powierzchni ściernicy poniżej  $0^{\circ}\text{C}$ . Zaobserwowano ponadto, że czas chłodzenia powierzchni ściernicy z użyciem dyszy Vortec ma wyraźny wpływ na obniżenie jej temperatury – najmniejszą temperaturę odnotowano po około 8 minutach chłodzenia.



Rys. 8. Termogramy zarejestrowane podczas pomiaru skuteczności chłodzenia powierzchni ściernicy z użyciem badanych dysz CAG przy odległości wylotu dyszy od schładzanej powierzchni ściernicy  $l = 10$  mm (stan po upływie czasu  $t = 10$  min): a) dysza WNT; b) dysza Vortec (ustawienie minimalne); c) dysza Vortec (ustawienie średnie); d) dysza Vortec (ustawienie maksymalne)

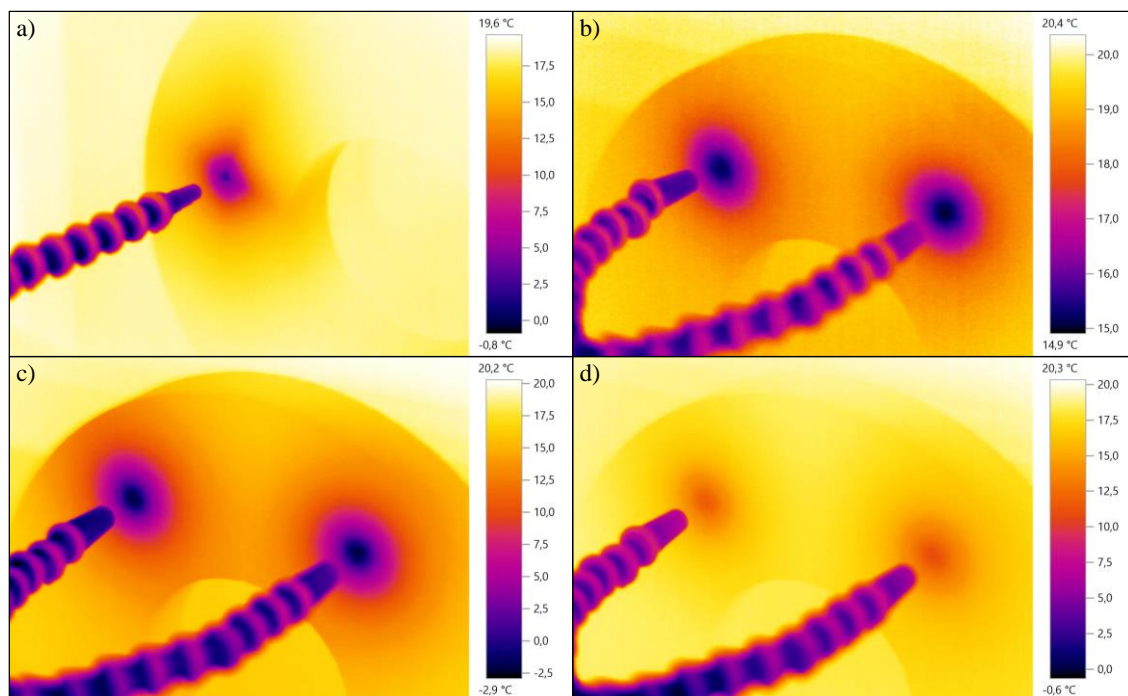
Fig. 8. Thermograms obtained during measurement of the cooling effectiveness of the grinding wheel surface using examined CAG nozzles with distance between nozzle outlet and cooled surface  $l = 10$  mm (state after  $t = 10$  min): a) WNT nozzle; b) Vortec nozzle (minimum setup); c) Vortec nozzle (medium setup); d) Vortec nozzle (maximum setup)



Rys. 9. Wykres zmiany temperatury powierzchni ściernicy w czasie  $t = 10$  min przy odsunięciu wylotu dyszy od schładzanej powierzchni o 20 mm

Fig. 9. Diagram of grinding wheel surface temperature changing in time  $t = 10$  min with 10 mm distance between nozzle outlet and cooled surface

Na rysunku 10 zestawiono termogramy zarejestrowane w trakcie pomiaru zmiany temperatury powierzchni ściernicy w czasie  $t = 10$  min, podczas chłodzenia z użyciem badanych dysz CAG odsuniętych od schładzanej powierzchni o odległość  $l = 20$  mm.

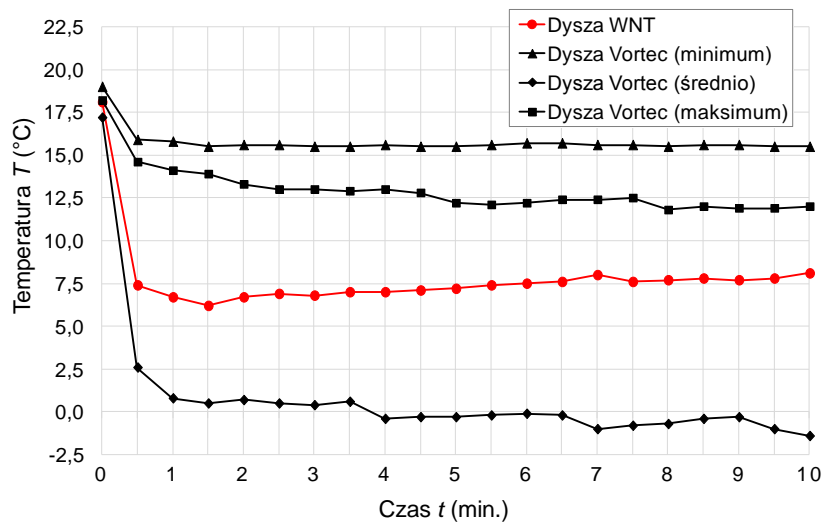


Rys. 10. Termogramy zarejestrowane podczas pomiaru skuteczności chłodzenia powierzchni ściernicy z użyciem badanych dysz CAG przy odległości wylotu dyszy od schładzanej powierzchni ściernicy  $l = 20$  mm (stan po upływie czasu  $t = 10$  min): a) dysza WNT; b) dysza Vortec (ustawienie minimalne); c) dysza Vortec (ustawienie średnie); d) dysza Vortec (ustawienie maksymalne)

Fig. 10. Thermograms obtained during measurement of the cooling effectiveness of the grinding wheel surface using examined CAG nozzles with distance between nozzle outlet and cooled surface  $l = 20$  mm (state after  $t = 10$  min): a) WNT nozzle; b) Vortec nozzle (minimum setup); c) Vortec nozzle (medium setup); d) Vortec nozzle (maximum setup)

Kolejny rysunek (rys. 11) przedstawia wykres zmiany temperatury powierzchni ściernicy w czasie  $t = 10$  min, przy odsunięciu wylotu dyszy od schładzanej powierzchni o odległość  $l = 30$  mm. Odsunięcie wylotu dyszy od schładzanej powierzchni ściernicy o 30 mm miało na celu zbadanie skuteczności chłodzenia rozpatrywanych dysz CAG w warunkach trudnego dostępu przewodu doprowadzającego strumień SSP w okolice strefy szlifowania. W tych warunkach dysza Vortec, przy ustawieniu pokrętła regulacji w pozycji średniej wykazała się zdecydowanie najbardziej skuteczną możliwością chłodzenia i po około 4 minutach pracy, pozwoliła na osiągnięcie temperatury poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  na schładzanej powierzchni ściernicy. W warunkach odsunięcia wylotu dyszy o 30 mm od powierzchni ściernicy dysza WNT umożliwiła obniżenie temperatury schładzanej powierzchni do  $6,2^{\circ}\text{C}$  ( $t = 1,5$  min), po czym nastąpiło powolne zwiększanie wartości temperatury powierzchni ściernicy do około  $8^{\circ}\text{C}$  ( $t = 7$  min).

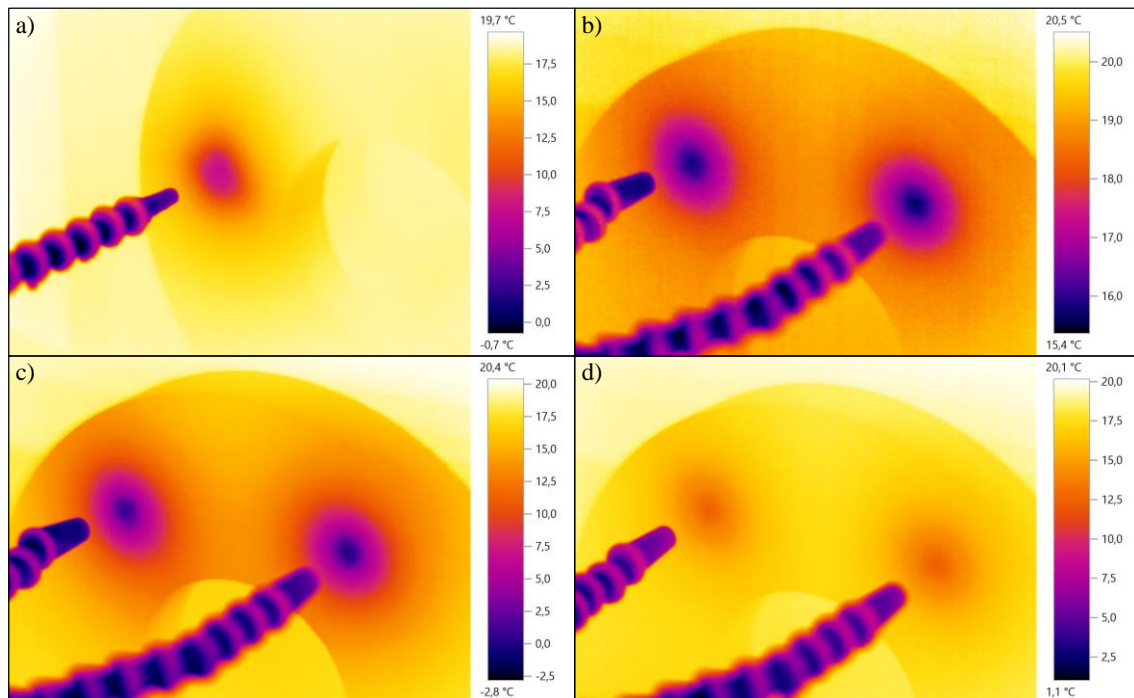
Rysunek 12 przedstawia termogramy zarejestrowane po czasie  $t = 10$  min, podczas chłodzenia dyszami CAG odsuniętymi od schładzanej powierzchni ściernicy o odległość  $l = 30$  mm.



Rys. 11. Wykres zmiany temperatury powierzchni ściernicy w czasie  $t=10$  min przy odsunięciu wylotu dyszy od schładzanej powierzchni o 30 mm

Fig. 11. Diagram of grinding wheel surface temperature changing in time  $t = 10$  min with 30 mm distance between nozzle outlet and cooled surface

Rysunek 12 przedstawia termogramy zarejestrowane po czasie  $t = 10$  min, podczas chłodzenia dyszami CAG odsuniętymi od powierzchni ściernicy o odległość  $l = 30$  mm.



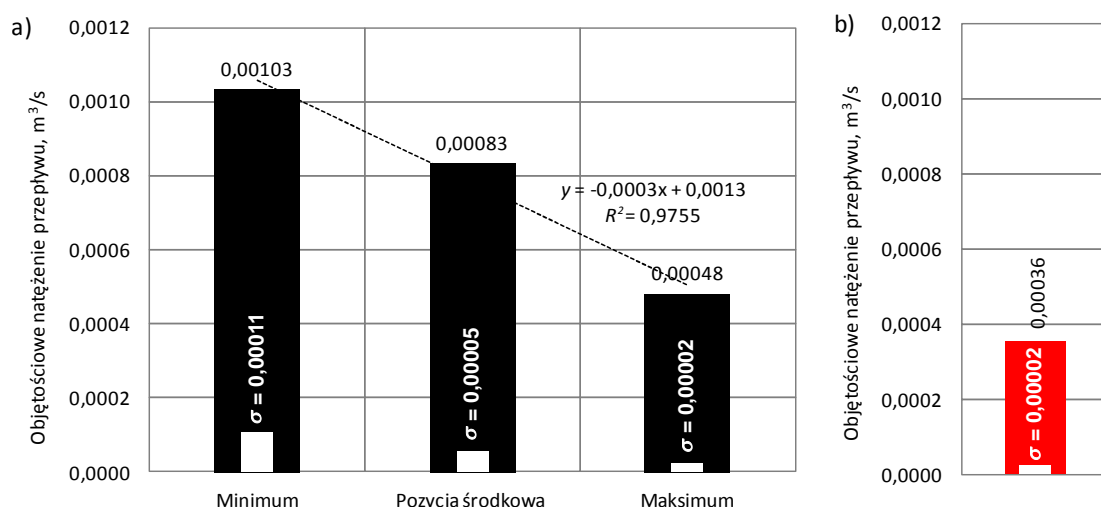
Rys. 12. Termogramy zarejestrowane podczas pomiaru skuteczności chłodzenia powierzchni ściernicy z użyciem badanych dysz CAG przy odległości wylotu dyszy od schładzanej powierzchni ściernicy  $l = 30$  mm (stan po upływie czasu  $t = 10$  min): a) dysza WNT; b) dysza Vortec (ustawienie minimalne); c) dysza Vortec (ustawienie średnie); d) dysza Vortec (ustawienie maksymalne)

Fig. 12. Thermograms obtained during measurement of the cooling effectiveness of the grinding wheel surface using examined CAG nozzles with distance between nozzle outlet and cooled surface  $l = 30$  mm (state after  $t = 10$  min): a) WNT nozzle; b) Vortec nozzle (minimum setup); c) Vortec nozzle (medium setup); d) Vortec nozzle (maximum)



Chłodzenie powierzchni ściernicy z użyciem dyszy Vortec przy ustawieniu pokrętła regulacji w pozycjach skrajnych (ustawienie minimum oraz maksimum) nie było wystarczająco skuteczne. Różnice wartości temperatury schładzanej powierzchni z użyciem dyszy Vortec, przy ustawieniu w pozycji minimum oraz maksimum były niewielkie. Mała skuteczność obniżania temperatury przy zastosowaniu dyszy Vortec i ustawieniu pokrętła regulacji w pozycji maksimum mogła być spowodowana ograniczoną wartością objętościowego natężenia przepływu generowanego strumienia SSP.

Rysunek 13 przedstawia wykres wartości objętościowego natężenia przepływu badanych dysz CAG w zależności od ustawienia pokrętła zaworu regulującego udział ciepłego i schłodzonego powietrza w strumieniu sprężonego powietrza.



Rys. 13. Wykres wartości objętościowego natężenia przepływu dwóch badanych dysz CAG: a) dyszy Vortec przy trzech różnych ustawieniach pokrętła zaworu regulacyjnego; b) dyszy WNT ( $\sigma$  – odchylenie standardowe)

Fig. 13. Diagram of two examined CAG nozzles volume flow rate value: a) Vortec CAG nozzle in three different adjustment knob settings; b) WNT CAG nozzle ( $\sigma$  – standard deviation)

Uzyskane wyniki pomiarów wykazały większe wartości objętościowego natężenia przepływu dla dyszy Vortec we wszystkich badanych konfiguracjach w odniesieniu do wartości wyznaczonej dla dyszy WNT.

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Duża liczba producentów dysz CAG może wpływać na trudność wyboru urządzenia o poszukiwanych parametrach. Przeprowadzone badania efektywności chłodzenia powierzchni ściernicy z użyciem dysz CAG pozwoliły porównać charakterystyki temperaturowe wybranych dysz, przy różnych ich ustawieniach. Dysze CAG mają szansę na rozpowszechnienie ich stosowania w wybranych procesach szlifowania. Analiza literatury w zakresie chłodzenia strefy szlifowania z zastosowaniem dysz CAG oraz przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań pozwoliły na sformułowanie poniższych wniosków:

1. Metoda chłodzenia strefy szlifowania za pomocą strumienia schłodzonego sprężonego powietrza z użyciem dysz CAG stanowi wciąż rozwijającą się dziedzinę badań i zastosowań technicznych.
2. Nie zaobserwowano większego wpływu odległości wylotu dyszy od schładzanej powierzchni, na czas początkowego ustalenia temperatury schładzanej powierzchni ściernicy, który w przypadku badanych dysz wynosił około 2,5 min.
3. Wraz ze zwiększeniem odległości wylotu dyszy od schładzanej powierzchni, zmniejsza się efektywność chłodzenia powierzchni z użyciem dysz CAG, jednak wpływ ten jest najmniejszy, w przypadku chłodzenia z użyciem dyszy Vortec przy ustawieniu pokrętła regulującego dyszy w pozycji średniej.
4. Zmiana ustawienia pozycji pokrętła zaworu regulacyjnego dysz CAG, poza zmianą temperatury SSP wpływa również na jego objętościowe natężenie przepływu, a tym samym na zmianę ilości cząsteczek powietrza biorących udział w chłodzeniu.
5. W przeprowadzonych badaniach porównawczych korzystniejsze wyniki badań uzyskano dla dyszy CAG Vortec 610, dla której zmierzono wartość około  $-5^{\circ}\text{C}$ . W tych samych warunkach zastosowanie dyszy WNT 6910.15.3-7 pozwoliło na schłodzenie powierzchni ściernicy do około  $-2,5^{\circ}\text{C}$ . Należy jednak podkreślić, że na uzyskane wyniki wpływ miały różnice w budowie elastycznych przewodów doprowadzających SSP do strefy obróbki, dlatego dokonano dodatkowych pomiarów objętościowego natężenia przepływu czynnika chłodzącego.
6. W celu ustalenia najkorzystniejszych parametrów konkretnej dyszy CAG za pomocą zaworu regulacyjnego w danej operacji obróbkowej zalecane jest przeprowadzenie wstępnych prób doświadczalnych.

#### LITERATURA

- [1] BRUNO T.J., 1992, *Application of the vortex tube in chemical analysis*, Process Contr. Qual.
- [2] BRÜCHER T., 1996, *Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe*, Ph.D. thesis, Technische Universität Berlin.
- [3] CHUDOBIN L. V., 1980, *Osnovy vybora i primenenija SOZ pri slifovanii*, Vestnik Mašinostroenija, no 7.
- [4] HEINZEL C., 1999, *Methoden zur Untersuchung und Optimierung der Kühlschmierung beim Schleifen*, Ph.D. Dissertation, Universität Bremen.
- [5] KIERAŚ S., NADOLNY K., WÓJCIK R., 2015, *Aktualny stan wiedzy i techniki w zakresie chłodzenia i smarowania strefy obróbki w procesach szlifowania*, Mechanik, 88/8-9, 204-211.
- [6] KLOCKE F., 2009, *Manufacturing processes 2, grinding, honing, lapping*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [7] KÖNIG W., 1980, *Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [8] OCZOŚ K., PORZYCKI J., 1986, *Szlifowanie. Podstawy i technika*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [9] PETERS J., ATRENS S., 1976, *An objective method for evaluating grinding coolants*, Annals of the CIRP, 25, 247-250.
- [10] SHEN B., SHIH A.J., 2009, *Minimum quantity lubrication (MQL) grinding using vitrified CBN wheels*, Transactions of NAMRI/SME, 37, 129-136.
- [11] ŚWIERCZYŃSKI J., 2015, *Wpływ hybrydowego sposobu podawania płynu obróbkowego i sprężonego powietrza na jakość powierzchni uzyskanej w procesie szlifowania*, Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka.
- [12] TÖNSHOFF H.K., SCHULZE R., 1980, *The effect of the coolant in the sawing of hard stone*, Industrial Diamond Review, 7.
- [13] WÓJCIK R., 2008, *Nowe media i sposoby ich doprowadzania do strefy szlifowania*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 28/4, 137-145.
- [14] ZIMMERMANN D., 1982, *Kühlschmierstoffe für die Feinbearbeitung*, TZ. prakt. Metall bearb., 4.
- [15] <http://www.dyzspecjalne.pl>
- [16] <http://www.vortec.com>
- [17] <https://www.wnt.com>
- [18] <https://www.testo.com.pl/resources/2b/ae/3b53c279ec40/Katalog-testo-890.pdf>
- [19] <http://www.farnell.com/datasheets/97870.pdf>

- [20] <http://technicalconsignment.com/wp-content/uploads/2016/06/2016-05-27-2016-05-27-002-038-800x769.jpg>  
[21] <http://www.monarchinstrument.com/pdfs/TableofEmissivity.pdf>  
[22] <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>

#### ANALYSIS OF THE GRINDING WHEEL SURFACE COOLING EFFICIENCY WITH THE USE OF COLD AIR GUNS

One of the newest methods of cooling of the grinding zone is to bring the grinding fluid in the form of cooled air using Cold Air Guns (CAG). The basic advantage of the CAG involves the use of air as the cooling medium, which is connected with the elimination of the costs associated with obtaining and utilization of grinding fluids. The aim of the research presented in this paper was to determine the actual cooling effect obtained on the grinding wheel surface, resulting from the use of CAG's. For testing selected two typical CAG from reputable manufacturers: WNT 6910.15.3-7 and Vortec 610. In conducted comparative studies favorable results were obtained for the Vortec 610 nozzle (measured value of about  $-5^{\circ}\text{C}$ ). Using WNT 6910.15.3-7 nozzle under the same conditions allowed cooling down the grinding wheel surface to about  $-2.5^{\circ}\text{C}$ . It should be noted, however, that the results were influenced by differences in the structure of flexible channels supplying the cold air to the machining area, and therefore additional measurements of volumetric flow rate of the coolant were made.

*Keywords: cooling of the grinding wheel surface, cold air guns, temperature, thermovision*