

	<b>Organizatorzy:</b>  <b>Politechnika Łódzka</b>  <b>Wydział Mechaniczny</b>	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKİ ŚCIERNEJ</b> <b>Łódź - Uniejów</b> 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

## Aktualny stan wiedzy i techniki w zakresie chłodzenia i smarowania strefy obróbki w procesach szlifowania

### State in the art of cooling and lubrication of the machining zone in grinding processes

SEWERYN KIERAŚ  
KRZYSZTOF NADOLNY  
RYSZARD WÓJCİK \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.371

W artykule scharakteryzowano rolę i rodzaje płynów chłodząco-smarujących (PCS) stosowanych w procesach szlifowania. Opisano konwencjonalne metody doprowadzania PCS do strefy szlifowania, takie jak metoda zalewowa, strumieniowo-ciśnieniowe doprowadzenie PCS, dysze trzewikowe oraz sposoby odśrodkowego podawania chłodziwa. Na tle tej charakterystyki przedstawiono metody umożliwiające zminimalizowanie wydatku PCS oraz chłodzenie strefy obróbki z użyciem dysz podających schłodzone sprężone powietrze. W podsumowaniu wskazano trendy rozwojowe wynikające z przedstawionej analizy.

**SŁOWA KLUCZOWE:** płyn chłodząco-smarujący, chłodzenie strefy szlifowania, smarowanie strefy szlifowania

*The article describes the role and types of grinding fluid (GF) used in the grinding processes. Described the conventional method of supplying GF into the grinding zone, such as flood method, pressure nozzles, shoe nozzles, and methods of centrifugal coolant provision. On the basis of these characteristics were presented methods to minimize the expenditure of GF as well as cooling the machining zone using cold air guns. In summary the trends of development arising from presented analysis were indicated.*

**KEYWORDS:** grinding fluid, cooling of the grinding zone, lubrication of the grinding zone

Proces szlifowania wiąże się ze znaczącym wzrostem temperatury w strefie obróbki. Rozkład ciepła, który powstaje w obszarach odkształcanych 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 w miejscu styku narzędzia z przedmiotem obrabianym [1]. Ponieważ przestrzeń międzyziarnowa jest stosunkowo mała a utrzymanie zdolności skrawnej na wysokim poziomie wymaga, aby była ona wolna i sprawnie wspomagała transport produktów szlifowania ze strefy obróbki, w większości procesów szlifowania stosuje się płyn chłodząco-smarujący (PCS). Głównymi jednak powodami stosowania PCS są: smarowanie strefy kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym, mające na celu zmniejszenie tarcia ostrzy o niezidentyfikowanej geometrii i często ujemnym kącie natarcia, oraz chłodzenie tej strefy [2].

Do podstawowych zadań płynów chłodząco-smarujących w procesie szlifowania należy zaliczyć [3]:

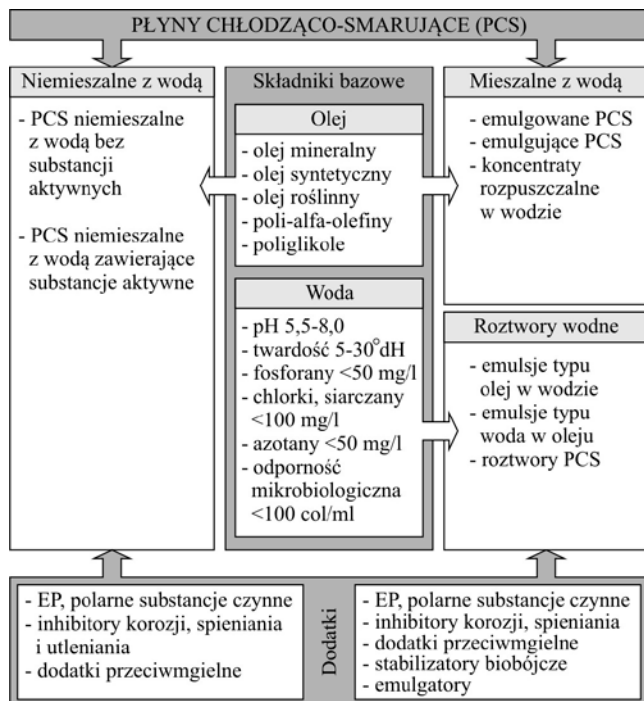
- tworzenie stabilnej warstewki smaru, która zmniejsza tarcie między ziarnem ściernym i PO oraz między spoiwem i PO,
- chłodzenie powierzchni PO i czynnej powierzchni ściernicy (CPS), poprzez przejmowanie i odprowadzanie ciepła,
- zwilżanie i czyszczenie ściernicy,
- wypłukiwanie wiórów ze strefy szlifowania,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

Niezwykle istotny dla poprawnego przebiegu procesu szlifowania jest dobór odpowiedniego PCS ze względu na znaczne zróżnicowanie w ich właściwościach biologicznych, fizycznych i chemicznych [3-5].

**Płyny chłodząco-smarujące stosowane w procesach szlifowania**

\* Mgr inż. Seweryn Kieras (seweryn.kieras@gmail.com), dr hab. inż. Krzysztof Nadolny, prof. PKo (krzysztof.nadolny@tu.koszalin.pl), dr hab. inż. Ryszard Wójcik, prof. PŁ (ryszard.wojcik@p.lodz.pl)

Podstawowym i kluczowym kryterium podziału PCS jest występowanie w nim wody [3, 6-9]. Na rys. 1 przedstawiono ogólne zestawienie głównych typów PCS, które stosuje się we wszystkich procesach skrawania, także w szlifowaniu.



Rys. 1. Podział i skład płynów chłodząco-smarujących stosowanych w procesach szlifowania [9]

### ■ Płyny chłodząco-smarujące niemieszalne z wodą

Bazowymi składnikami PCS niemieszalnych z wodą są oleje mineralne, które charakteryzują się doskonałymi właściwościami smarnymi. W zależności od szczegółowej specyfikacji, ich lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C wynosi  $\nu = 20 - 60 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . To wartość ponad pięćdziesiąt razy większa od lepkości wody. Ponadto, oleje mineralne charakteryzują się właściwościami antykorozyjnymi a przy ich użytkowaniu nie ma konieczności stosowania substancji grzybobójczych czy inhibitorów korozji w celu ochrony obrabianki i PO, z uwagi na ich jałowy charakter. PCS bazujące na olejach mineralnych nie są pozbawione wad. Niekiedy wymagają one dodatkowego stosowania substancji zapobiegających powierzchniowemu spienianiu się. Oleje mineralne charakteryzują się ponadto mniejszym działaniem chłodzącym niż PCS na bazie wody. Pojemność cieplna olejów wynosi zaledwie około 1,95 kJ/(kg·K), natomiast ich przewodność cieplna to około 0,13 W/(m·K). Dla polepszenia smarnych właściwości olejów stosuje się chemicznie aktywne oleje hipoidalne (*Extreme Pressure*), substancje lub środki wiążące film smarujący, dodając je do oleju bazowego [3, 6, 9-11].

### ■ Wodne płyny chłodząco-smarujące

Do wodnych PCS zalicza się wodne emulsje olejowe oraz inne roztwory wodne. Emulsjami nazywa się układy dyspersyjne, powstające podczas mieszania dwóch nie mieszających się ze sobą cieczy, przy czym fazą rozpraszającą jest woda a fazą rozpraszoną olej [3]. Wodna emulsja olejowa (WEO) powstaje po rozcieńczeniu koncentratu olejowego (wzbogaconego o dodatki) wodą. WEO stosuje się jako PCS wówczas, kiedy bardziej istotne niż smarujące, są właściwości chłodzące płynu a kwestia ekonomii procesu jest równie ważna. Równomierne zmieszanie się oleju w całej objętości wody umożliwiającą tzw. emulgatory. Zawar-

tość oleju w emulsji wynosi z reguły 2-5% a jej właściwości fizyczne są wyraźnie korzystniejsze niż właściwości wody. WEO charakteryzują się blisko dwukrotnie większą, niż w przypadku oleju, właściwą pojemnością cieplną, która wynosi 4,18 kJ/(kg·K). Przewodność cieplna emulsji wynosi 0,63 W/(m·K) i jej wartość również jest znacznie wyższa niż dla oleju [6].

W skład nie emulgujących, wodnych PCS wchodzi: wodne roztwory substancji powierzchniowo-aktywnych, elektrolity oraz zawiesiny. W praktyce przyjęto się również stosowanie zestawów kombinowanych, w skład których wchodzi wodne roztwory soli i dodatków powierzchniowo-aktywnych jednocześnie [3].

### Konwencjonalne metody doprowadzania płynów chłodząco-smarujących do strefy szlifowania

Zarówno wydajność jak i sposób doprowadzenia PCS do strefy szlifowania mają istotny wpływ na efekt procesu szlifowania. Zaprojektowano wiele różnych typów dysz w celu sprostania licznym wymogom dotyczącym sposobu aplikacji PCS do strefy obróbki. Ogólnie rzecz biorąc istnieją trzy kryteria podziału typów układów dysz [12]:

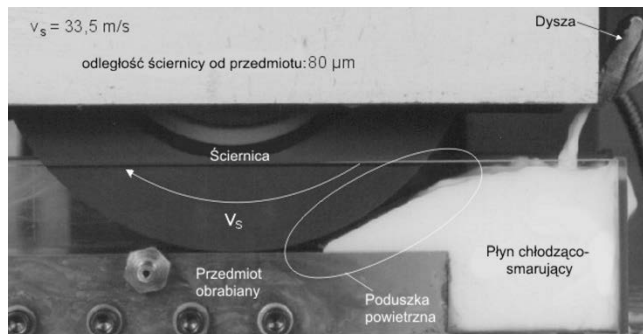
- ze względu na funkcję (zalewające, nie zalewające),
- ze względu na metodę skupienia (dysze o strumieniu swobodnym, dysze o strumieniu skupionym, dysze spiętrzające – ang. *swell nozzle*, dysze rozpylające),
- ze względu na geometrię dyszy (dysze w kształcie ściętej rury – ang. *squeezed pipe*, dysze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

Podstawowym zadaniem wszystkich typów dysz jest doprowadzanie PCS do strefy szlifowania. Dysza realizuje to zadanie poprzez skupienie i skierowanie strumienia PCS jak również przez jego przyśpieszenie. Zaobserwować można korzystny wpływ na wydajność chłodzenia poprzez skoncentrowanie strumienia płynu, co wiąże się ze zminimalizowaniem zaburzeń przepływu przez ostre krawędzie na wylocie z dyszy lub przez wydłużony, równoległy wylot z dyszy. Ponadto, spełniony musi zostać warunek osiągnięcia minimalnej wartości prędkości wypływu PCS z dyszy. Efekt taki uzyskuje się poprzez zmniejszenie powierzchni przekroju poprzecznego na wylocie dyszy w celu zwilżania CPS za pomocą płynu chłodząco – smarującego [13].

### ■ Metoda zalewowa

Metoda zalewowa jest powszechnie stosowanym sposobem dostarczenia PCS do strefy szlifowania. Płyn chłodząco-smarujący tłoczony jest za pomocą pompy i kierowany do strefy szlifowania przez dyszę ze szczelinowym otworem. Prędkości wypływu cieczy osiągają wartości rzędu  $v_c = 1 \text{ m/s}$ . Wraz ze wzrostem powierzchni styku pomiędzy PO a ściernicą, szerokości ściernicy i gęstości struktury ściernicy a także wraz ze zmniejszaniem się wielkości ziaren ściernicy, intensywność dostarczania PCS powinna wzrastać. Ponadto, im większe są wymagania dotyczące jakości powierzchni, oraz im większa złożoność kształtu PO i cieńsze jego ścianki (w przypadku przedmiotu wydrążonego), tym intensywność doprowadzenia PCS musi być większa. W przypadku szlifowania walcowego oraz szlifowania powierzchni płaskich obwodem ściernicy zużycie płynu nie powinno być mniejsze niż 8-10 l/min. Przy szlifowaniu bezkłowym wartość wydatku PCS nie powinna być mniejsza niż 3-6 l/min na każde 10 mm długości styku CPS z powierzchnią obrabianą, natomiast w przypadku szlifowania czołowego powierzchni płaskich, wartość ta powinna wynosić 10-15 l/min dla każdego 10 mm szerokości pierścienia lub segmentu ściernego [3].

Znaczny wpływ na efektywność działania PCS w postaci swobodnego strumienia doprowadzanego z niską prędkością do strefy szlifowania wywiera wirujący strumień powietrza, którego źródłem jest obracająca się ściernica [14]. Jest to zjawisko tzw. poduszki powietrznej (rys. 2), która otacza ściernicę wokół jej obwodu a już przy prędkości obwodowej ściernicy  $v_s = 20$  m/s powoduje odchylenie i rozpylenie strumienia płynu [14].



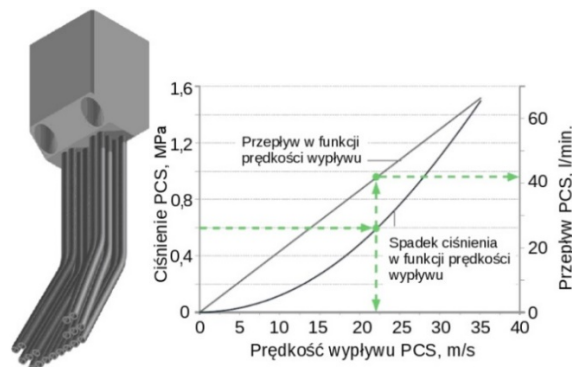
Rys. 2. Widok powietrza wirującego wokół CPS i ograniczającego dostęp PCS do strefy szlifowania [14]

Poduszka powietrzna jest dla PCS główną przeszkodą, która podczas szlifowania utrudnia jego współdziałanie z CPS oraz ogranicza dostęp PCS do strefy szlifowania (rys. 2). Zwiększenie ciśnienia doprowadzanego płynu chłodząco-smarującego jest jednym ze skutecznych sposobów zapobiegania temu zjawisku. Ponadto opracowano jeszcze inne metody eliminacji poduszki powietrznej takie, jak stosowanie dysz trzewikowych, dysz strumieniowo-ciśnieniowych, pozastrefowe doprowadzanie PCS czy też odśrodkowe doprowadzanie PCS poprzez ściernicę [3, 12-23].

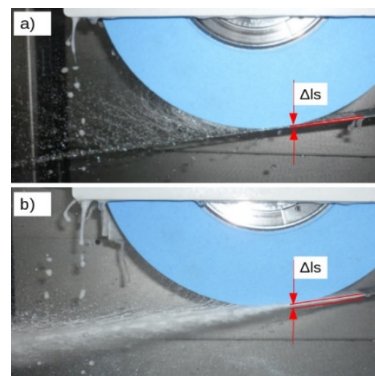
### ■ Strumieniowo-ciśnieniowe doprowadzanie płynu chłodząco-smarującego

Metoda strumieniowo-ciśnieniowego doprowadzenia PCS różni się od metody zalewowej zwiększonym ciśnieniem PCS do wartości przekraczającej 1-1,5 MPa. Podwyższone ciśnienie pozwala na zwiększenie prędkości doprowadzanego płynu, a tym samym na pokonanie oporów strumienia powietrza. Dzięki temu PCS przenika do strefy szlifowania a intensywność smarowania i odprowadzania ciepła ze szlifowanej powierzchni wyraźnie się zwiększa [3]. W celu uzyskania lepszych efektów oddziaływania płynu należy dobrać minimalną odległość dyszy od ściernicy oraz ustalić optymalny kąt położenia dyszy względem ściernicy [3]. Strumień PCS powinien być skierowany stycznie do powierzchni obwodowej ściernicy, natomiast wartość jego prędkości wypływu  $v_{PCS}$  powinna oscylować w okolicach wartości prędkości obwodowej ściernicy  $v_s$ . Gdy warunek ten nie jest zachowany i różnica pomiędzy  $v_{PCS}$  i  $v_s$  jest znaczna, wówczas laminarny przepływ strumienia PCS w punkcie styku zmienia się w przepływ turbulentny a sam strumień ulega odchyleniu od ściernicy [3].

Istnieje wiele typów dysz do strumieniowo-ciśnieniowego doprowadzania PCS. Jednym z nich są dysze igłowe (rys. 3), które w bardzo precyzyjny sposób doprowadzają PCS do strefy szlifowania. Autorzy badań [15] w swojej pracy wykazali, że prawidłowy dobór wartości prędkości wypływu PCS z dysz ma bardzo duże znaczenie dla uzyskiwanych efektów procesu szlifowania. Przy niskich prędkościach wypływu, na skutek napięcia powierzchniowego i fal osiowych następuje rozwarstwienie strugi PCS (rys. 4a).



Rys. 3. Widok i charakterystyka zespołu dysz igłowych [15]



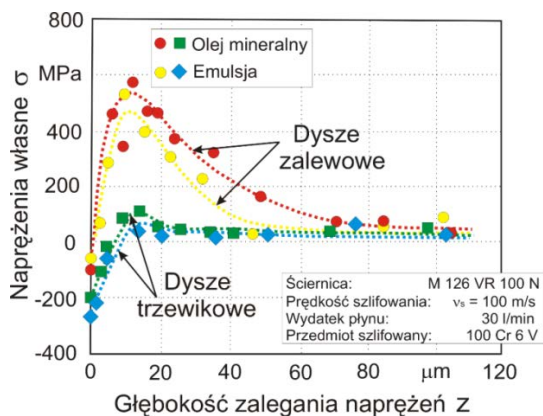
Rys. 4. Widok strumienia PCS podawanego zestawem dysz igłowych przy prędkości wypływu: a)  $v_{PCS}=10$  m/s, b)  $v_{PCS}=30$  m/s [15]

Zwiększanie prędkości wypływu PCS przyczynia się do poprawy chłodzenia w strefie szlifowania oraz do zmniejszenia chropowatości powierzchni PO. Prędkość wypływu PCS musi mieć wartość na tyle dużą, aby móc w odpowiednim stopniu wypełnić pory ściernicy. Jednak podawanie PCS ze zbyt dużą prędkością powoduje rozproszenie strugi chłodziwa, czego skutkiem może być niewystarczająco efektywne wypełnienie porów ściernicy PCS (rys. 4b) [15].

### ■ Dysze trzewikowe

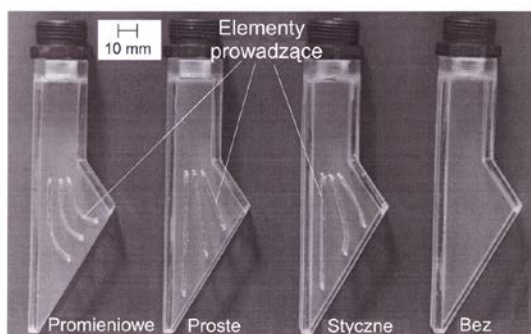
Dysze trzewikowe to alternatywne rozwiązanie konstrukcyjne łączące elementy odpowiadające za odchylenie obracającej się poduszki powietrznej oraz bardzo skuteczne rozprowadzanie płynu w strefie kontaktu PCS z CPS. Dysze tego typu są dokładnie dopasowane kształtem do profilu CPS i otaczają ściernicę z trzech stron. Obracająca się poduszka powietrzna jest odchylana od CPS na wlocie dyszy, umożliwiając całkowite zwilżenie powierzchni ściernicy płynem chłodząco-smarującym w wewnętrznej komorze dyszy trzewikowej. Obrót ściernicy napędza płyn chłodzący do prędkości obwodowej. Całkowita ilość dostarczonego PCS może być ograniczona do objętości niezbędnej do wypełnienia całej przestrzeni porów powierzchni ściernicy, ponieważ dalsze dostarczanie wykazuje tylko nieznaczny wpływ na parametry procesu szlifowania. Geometria dyszy trzewikowej jest określona przez zarys obwodu ściernicy, dlatego wraz ze zmianą wielkości ściernicy wymagane jest równoczesne dostosowanie kształtu dyszy trzewikowej. Z tego powodu elastyczność stosowania takich dysz jest ograniczona. Liczne badania dowodzą, że podawanie PCS z użyciem dysz trzewikowych umożliwia zredukowanie zużycia ściernicy oraz ogranicza termiczną degradację warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego, przy zmniejszonym natężeniu przepływu PCS, w porównaniu z wydatkiem stosowanym w metodzie zalewowej [12, 14, 16-17, 20].

W swoich badaniach [18-19] dowodzą, że wzrost ilości PCS przepływającego przez strefę szlifowania nie ma większego wpływu na uzyskaną chropowatość powierzchni PO, jednak wiąże się ze wzrostem ciśnienia hydrodynamicznego, co w efekcie wywołuje większy nacisk na powierzchnię styku PCS z powierzchnią PO. Prowadzi to do wzrostu siły i mocy szlifowania. Zmniejszenie wydatku PCS poprzez zastosowanie dysz trzewikowych pozwala w znacznym stopniu ograniczyć wielkość naprężeń własnych w warstwie wierzchniej PO  $\sigma$  w stosunku do tych, występujących przy zastosowaniu chłodzenia metodą zalewową (rys. 5).



Rys. 5. Wpływ metody chłodzenia dyszą trzewikową i chłodzenia zalewowego na wielkość naprężeń własnych  $\sigma$  w warstwie wierzchniej PO [19]

Rozwój konstrukcji dysz trzewikowych skierowany jest na wprowadzanie i modyfikację kształtów wewnętrznych elementów prowadzących PCS do strefy szlifowania (rys. 6).



Rys. 6. Geometria wnętrza dyszy trzewikowej [20]

### ■ Odśrodkowe doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego przez ściernicę

Znanych jest wiele metod odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania, stosowanych zarówno w przypadku relatywnie dużych ściernic w procesach szlifowania powierzchni płaskich, kształtowych oraz walcowych zewnętrznych, jak i w ściernicach małogabarytowych, przeznaczonych do szlifowania otworów. Wybrane rozwiązania z tego zakresu przedstawiono schematycznie na rysunku 7 [3, 14, 19, 21-23].

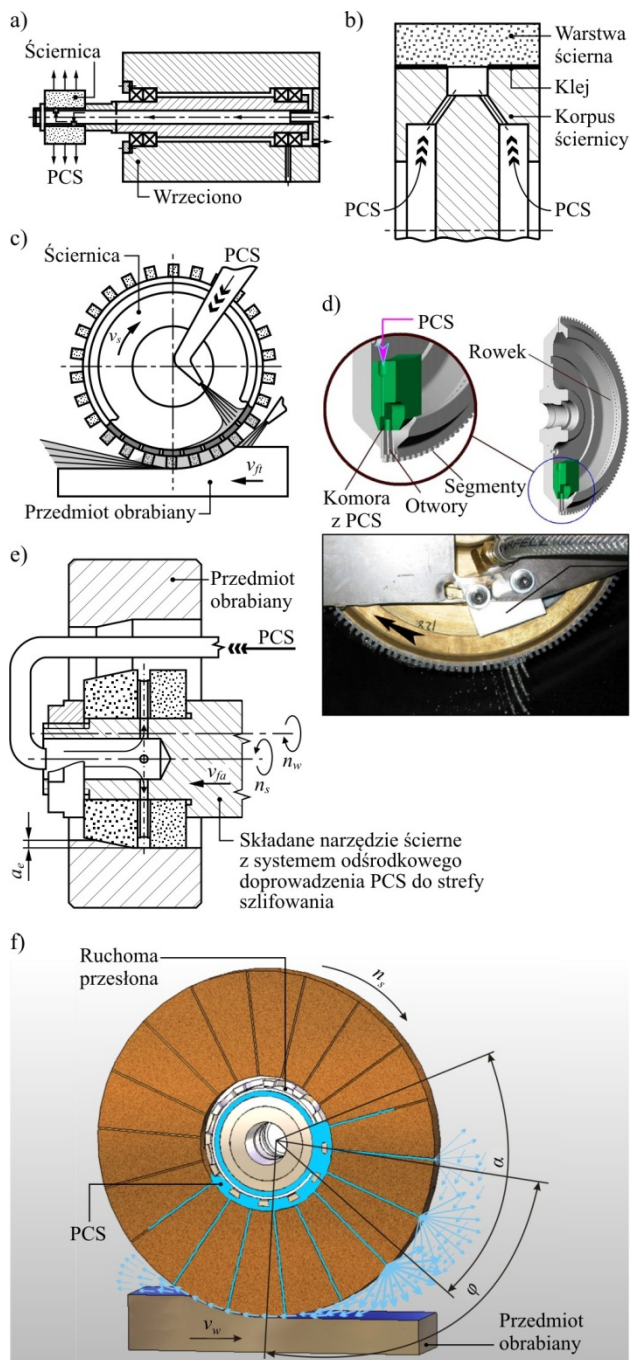
Do najważniejszych zalet odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym można zaliczyć:

- dużo skuteczniejsze docieranie PCS do strefy szlifowania, umożliwiające ograniczenie lub wyeliminowanie defektów cieplnych powierzchni obrobionej;
- zdecydowaną poprawę chłodzenia i smarowania strefy szlifowania w porównaniu z najczęściej stosowaną metodą zalewową;

- możliwość zmniejszenia wydatku PCS przy spełnieniu wymagań technologicznych obróbki, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie korzystnego efektu ekonomicznego i ekologicznego.

Metody te posiadają jednak również kilka wad, z których najważniejsze to:

- konieczność stosowania specjalnych systemów podawania PCS;
- przy podawaniu PCS przez pory ściernicy skuteczność chłodzenia zależy w dużej mierze od otwartości struktury ściernicy;
- w wielu przypadkach potrzeba stosowania nietypowej konstrukcji korpusu ściernicy.



Rys. 7. Przykłady systemów odśrodkowego doprowadzenia PCS do strefy szlifowania: a) poprzez wrzeciono szlifierskie i ściernicę [3]; b) poprzez kanały w korpusie ściernicy i pory ściernicy [19]; c-d) poprzez kanały w korpusie ściernicy i przestrzenie pomiędzy segmentami ściernicymi [14, 21]; e) poprzez kanały w przekładce rozdzielającej ściernice elementarne [22]; f) z użyciem systemu odśrodkowego strefowego podawania PCS [23]

Płyn chłodząco - smarujący należy poddać dokładnej filtracji, aby uniknąć zatykania się porów ściernicy. Dopuszczalna koncentracja mechanicznych zanieczyszczeń w cieczy nie może przekraczać 0,03%, natomiast przy szlifowaniu ściernicami drobnoziarnistymi wartość ta powinna być jeszcze mniejsza. Zachowanie tego warunku jest ważne zarówno, ze względu na utrzymanie odpowiedniego natężenia przepływu cieczy, jak i w celu uniknięcia niewyrównoważeń strukturalnych, zwiększających drgania układu wrzeciona, do którego dochodzi przy zatykaniu się porów ściernicy [3].

Metoda odśrodkowego doprowadzenia PCS zalecana jest w przypadku szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych a efekty są najkorzystniejsze przy szlifowaniu otworów nieprzelotowych, otworach o znacznej długości a także w sytuacji ograniczonej przestrzeni pomiędzy PO a trzpieniem ściernicy [3, 22].

### Metody minimalizowania wydatku płynów chłodząco-smarujących

PCS zawierają substancje niebezpieczne dla środowiska a ich utylizacja polega na unieszkodliwianiu chemicznemu (metodą re-rafinacji a także krakingu termicznego) lub poprzez biodegradację. Mogą być one również spalane oraz odzyskiwane poprzez oczyszczanie. Procesy te są kosztowne i często znacząco obciążają środowisko naturalne swoimi produktami. Ponadto wiele PCS ma negatywny wpływ na zdrowie operatorów maszyn, którzy narażeni są na stały z nimi kontakt. Te negatywne aspekty stosowania PCS przyczyniły się do obecnego trendu minimalizacji ich wydatku w procesach szlifowania [2, 24, 25].

### ■ Smarowanie z minimalnym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego (MQL)

Nawet niewielka ilość PCS dostająca się do strefy kontaktu między PO a CPS może korzystnie wpływać na efektywność procesu szlifowania. Takie podejście było podstawą do opracowania metody smarowania strefy szlifowania z minimalnym wydatkiem PCS (MQL – ang. *minimum quantity lubrication*) mającej na celu zmniejszenie zagrożenia dla środowiska oraz obniżenie kosztów utylizacji, poprzez ograniczenie ilości stosowanych PCS [26]. W dyszach MQL PCS w postaci mgły pod wpływem energii sprężonego powietrza natryskiwany jest na CPS ściernicy. Tylko cienka warstewka PCS pokrywa powierzchnię ściernicy przed jej wejściem do strefy kontaktu z powierzchnią obrabianą (rys. 8).



Rys. 8. Widok sposobu doprowadzenia mgły olejowej metodą MQL w procesie szlifowania [19]

Jak sama nazwa wskazuje, obróbka MQL charakteryzuje się bardzo małą ilością PCS biorącą udział w procesie obróbki (wydatek rzędu 7,2-97,2 ml/h, blisko 1000 razy mniej niż przy konwencjonalnej metodzie zalewowej), która dostarczana jest precyzyjnie do strefy kontaktu CPS z powierzchnią obrabianą [27]. Wióry powstałe podczas szlifowania są praktycznie suche, a taki mechanizm i precy-

zja tej metody skutecznie redukuje wydatek PCS, i co się z tym wiąże, koszty produkcji.

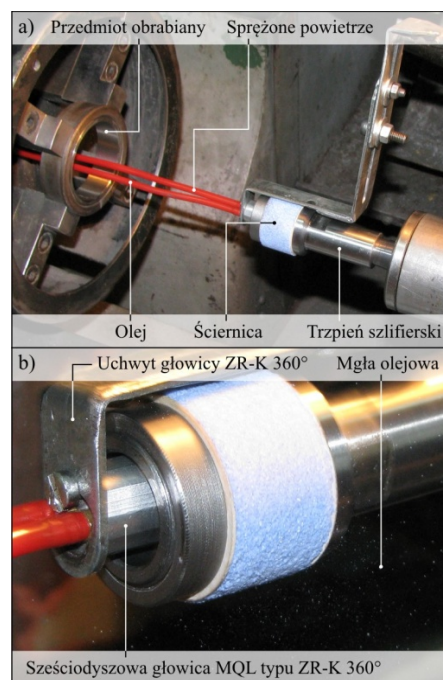
W metodzie MQL funkcja smarowania zapewniona jest przez olej, natomiast funkcja chłodzenia odbywa się głównie za sprawą sprężonego powietrza (tab. 1). Ta bardzo mała ilość PCS doprowadzana do strefy szlifowania pozwala w znacznym stopniu zredukować tarcie w strefie kontaktu CPS z powierzchnią obrabianą oraz ogranicza adhezję produktów szlifowania do powierzchni ściernicy [28]. Wydajne smarowanie jest zapewnione ponieważ strumień powietrza przenosi krople PCS bezpośrednio do strefy szlifowania, natomiast w przypadku obróbki z użyciem konwencjonalnej metody zalewowej należy stosować szczególne procedury, aby PCS skutecznie dotarł do strefy szlifowania [29].

Tab. 1. Pojemności cieplne czynników stosowanych w obróbce z minimalnym wydatkiem olejowym MQL [30]

Rodzaj medium	Pojemność cieplna $C_p$ , kJ/kgK
Woda	4,18
Olej	1,92
Powietrze	1,04

W wielu pracach [14, 31-42] autorzy wykazują znaczny potencjał ograniczenia wydatku PCS przy zastosowaniu metody MQL w procesach szlifowania. Prowadzone są również prace w zakresie zastąpienia oleju innymi środkami smarnymi o mniejszej szkodliwości dla środowiska, takimi jak np. glikol propylenowy [39, 43].

Najczęściej spotykane w literaturze przykłady stosowania metody MQL dotyczą podawania aerozolu metodą MQL punktowo, co znacznie ogranicza jej użycie, ponieważ wymaga swobodnego dojścia do strefy szlifowania, które występuje np. w procesach szlifowania powierzchni płaskich i powierzchni walcowych zewnętrznych. W pracy [44] autorzy opisali system MQL przeznaczony do obróbki wewnętrznych powierzchni walcowych, charakteryzującej się długą drogą styku ściernicy z materiałem obrabianym oraz bardzo ograniczoną przestrzenią wokół ściernicy (rys. 9).



Rys. 9. Widok systemu odśrodkowego podawania PCS metodą MQL: a) widok obszaru roboczego szlifierki; b) sposób zamocowania głowicy MQL typu ZR-K 360° wewnątrz drążonego trzpienia ściernicy [44]

Badania zrealizowane z jego zastosowaniem potwierdziły skuteczność tego rozwiązania w procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych. Duża otwartość struktury ściernicy oraz specjalna konstrukcja trzpienia szlifierskiego umożliwiły przedostawanie się PCS od wnętrza ściernicy, bezpośrednio do strefy szlifowania. W porównaniu do rezultatów otrzymanych z zastosowaniem chłodzenia metodą zalewową uzyskano niemal dwukrotnie wydłużenie okresu trwałości ściernicy i znaczące ograniczenie jej zużycia objętościowego, a także nieznaczne zmniejszenie chropowatości powierzchni obrabianej oraz mocy szlifowania. Zdecydowane ograniczenie wydatku PCS w metodzie MQL spowodowało jednak, że większa część strumienia ciepła powstającego w procesie szlifowania akumulowana była przez przedmiot obrabiany [44].

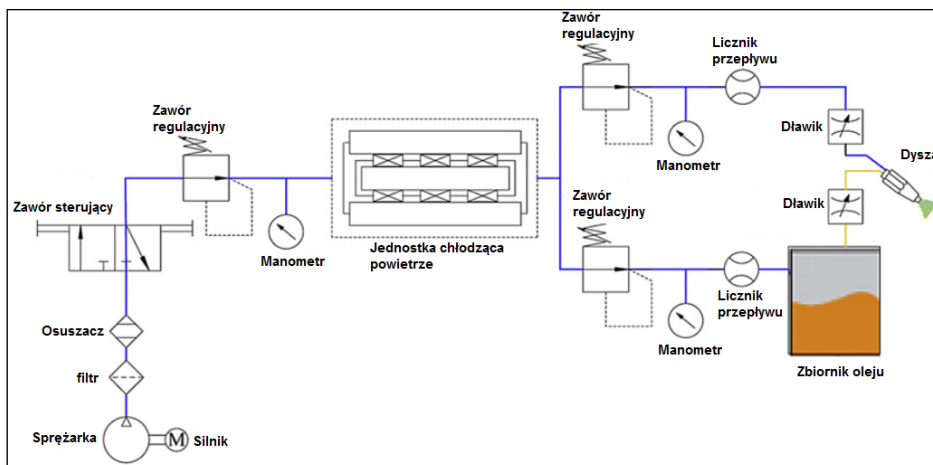
#### ■ Chłodzenie z minimalnym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego (MQC)

W przypadku konieczności zapewnienia odpowiedniego chłodzenia, jako PCS zamiast oleju stosuje się emulsje w połączeniu z wodą. Znajdują one zastosowanie w przypadku, gdy chłodzenie nie może być realizowane za pośrednictwem oleju. W odniesieniu do tej metody autorzy pracy [30] używają terminu obróbki z minimalnym wydatkiem cieczy chłodzącej MQC (ang. *Minimum Quantity Cooling*). Właściwości smarne emulsji są wyraźnie mniejsze niż oleju. Obróbka z udziałem MQC stosowana jest znacznie rzadziej niż ta, z udziałem MQL, jednak metoda ta ma znaczny potencjał w zakresie problematyki wpływu temperatury na charakterystykę narzędzia oraz PO podczas procesów szlifowania bez udziału PCS.

W odróżnieniu od techniki MQL, metoda MQC, jak dotąd znajduje znacznie mniejsze zastosowanie w praktyce. Z tego powodu nie jest jeszcze rozwiniętym zagadnieniem powszechnie wykorzystywanym w przemyśle [45].

#### ■ Metoda minimalnego wydatku płynu chłodząco-smarującego o obniżonej temperaturze (MQCL)

Metoda minimalnego wydatku PCS o obniżonej temperaturze (MQCL – ang. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*) polega na doprowadzeniu specjalnego oleju (rzadziej emulsji) w środowisku niskiej temperatury do strefy szlifowania [46]. Wykorzystywane w tej metodzie PCS muszą odznaczać się niskim współczynnikiem lepkości i małą gęstością w ujemnych temperaturach. Wartość temperatury powietrza, którego zadaniem jest transport kropli PCS wynosi  $-30^{\circ}\text{C}$ , co wpływa również na spadek temperatury PCS. Metoda MQCL umożliwia zarówno smarowanie w strefie szlifowania jak i chłodzenie PO i narzędzia. Rysunek 10 przedstawia



Rys. 10. Schemat budowy systemu podawania PCS za pomocą metody MQCL [46]

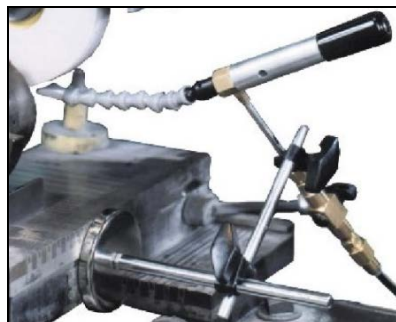
schemat budowy systemu MQCL [46].

Używając jako PCS oleju wykorzystuje się jego dobre właściwości smarujące, które pozwalają na redukcję tarcia i zjawiska adhezji pomiędzy PO, CPS oraz wiórami obrabianego materiału. W rezultacie ilość ciepła powstałego w wyniku tarcia zostaje ograniczona a PO i ściernica są utrzymane w niższej temperaturze, niż w przypadku obróbki na sucho [47].

Autorzy badań opisanych w pracy [46] wykazują korzystne zmniejszenie wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej przedmiotów wykonanych ze stali węglowej za sprawą obniżenia temperatury powietrza transportującego PCS do ponad 20% – porównując do metody obróbki z chłodzeniem sprężonym powietrzem bez użycia PCS. W porównaniu do metody obróbki na sucho, długość pracy narzędzia przy zastosowaniu metody MQCL zwiększyła się o 52% oraz zmniejszeniu uległy wartości siły szlifowania [46].

#### Chłodzenie schłodzonym sprężonym powietrzem (SSP)

Metoda chłodzenia strefy obróbki za pomocą strumienia schłodzonego sprężonego powietrza (SSP) stanowi wciąż rozwijającą się dziedzinę badań naukowych i zastosowań technicznych. Wykorzystanie tej techniki w procesach szlifowania opisano w pracach [39, 48-50]. Podstawowa zaleta metody SSP polega na wykorzystaniu powietrza jako medium chłodzącego, co wiąże się z redukcją kosztów związanych z pozyskaniem i utylizacją PCS. Ponadto urządzenia służące do pozyskiwania i dostarczania SSP do strefy szlifowania odznaczają się nieskomplikowaną budową, niewielkim kosztem zakupu i łatwością obsługi. Uzyskiwane SSP za pomocą urządzeń tego typu może osiągnąć temperaturę do  $50^{\circ}\text{C}$  niższą w stosunku do wartości temperatury powietrza zasilającego urządzenie. Rysunek 11 przedstawia widok ogólny dyszy doprowadzającej SSP do strefy szlifowania.

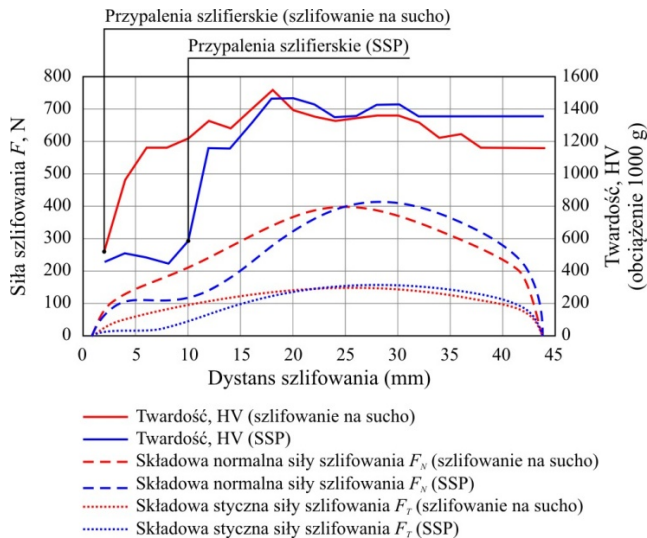


Rys. 11. Widok ogólny dyszy doprowadzającej SSP do strefy szlifowania [51]

W badaniach opisanych w pracy [52-53] wykazano, że wykorzystanie tej techniki pozwala zapobiec powstawaniu zmian w strukturze warstwy wierzchniej materiału obrabianego w postaci przypaleń (rys. 12). Odnotowano spadek siły szlifowania w odniesieniu do metody obróbki na sucho, jednak z powodu braku środka smarnego usuwanie materiału obrabianego ze zwiększoną prędkością nie było możliwe [52-53].

Ponadto, prezentowane bada-

nia [52-53] wykazują, że już niewielki dodatek mgły w postaci olejów roślinnych do strumienia SSP pozwala na przeprowadzenie procesu ze zwiększoną głębokością szlifowania bez występowania przypaleń i przy utrzymaniu jakości powierzchni obrabianej na poziomie obróbki z udziałem PCS. Możliwość oczyszczania powierzchni PO i CPS jest znacznie ograniczona w porównaniu do procesów wykorzystujących PCS, czego efektem jest nieznacznie większa wartość uzyskiwanej chropowatości powierzchni obrabianej [52-53].



Rys. 12. Wykres przedstawiający siły szlifowania oraz twardość powierzchni po procesie szlifowania z wykorzystaniem metody SSP oraz szlifowania na sucho [53]

## Podsumowanie

Rodzaj, wydatek oraz sposób podawania PCS ma niezwykle istotny wpływ na jakość i stabilność procesu szlifowania oraz powtarzalność jego wyników. Obok korzyści wynikających z zastosowania płynów chłodząco-smarujących istnieje jednak szereg problemów natury ekonomicznej i ekologicznej. Chodzi tu z jednej strony o koszty zakupów, zastosowania i pielęgnacji PCS, z drugiej zaś o obciążenie środowiska naturalnego wynikające z ich utylizacji. Jednym ze sposobów ograniczenia wydatku PCS i związanych z nimi kosztów oraz obciążeń środowiska naturalnego, jest podnoszenie skuteczności doprowadzenia PCS do strefy szlifowania.

W niniejszym opracowaniu opisano najważniejsze konwencjonalne metody doprowadzania PCS do strefy szlifowania (metodę zalewową, strumieniowo-ciśnieniowe doprowadzenie PCS, dysze trzewikowe, sposoby odśrodkowego podawania PCS) oraz metody umożliwiające zminimalizowanie wydatku PCS. Z zamieszczonej charakterystyki wynika, że można wyróżnić co najmniej dwa główne trendy w rozwoju tych metod:

- pierwszy dotyczy dążenia do jak najskuteczniejszego docierania PCS do strefy kontaktu aktywnych wierzchołków skrawających z powierzchnią przedmiotu obrabianego w wysokowydajnych procesach szlifowania, bez uwzględnienia czynników ekonomicznych i ekologicznych związanych z dużym wydatkiem PCS oraz wydatkiem energii zasilającej np. wysokociśnieniowe układy pomp PCS;
- drugi trend badań związany jest głównie z ograniczeniem wydatku PCS (metody MQL, MQC i MQCL), w celu ograniczenia skutków środowiskowych oraz kosztów stosowania PCS.

Nowością na tym tle są próby zastosowania dysz podających schłodzone sprężone powietrze (SSP) określane również akronimem CAG (ang. *cooled air guns*). Dysze takie charakteryzują się niewielkim kosztem zakupu i pozwalają na znaczące obniżenie temperatury podawanego powietrza, bez potrzeby stosowania układów chłodzących. SSP podawane do strefy szlifowania z użyciem CAG nie realizuje jednak wielu głównych funkcji PCS, takich jak smarowanie strefy obróbki czy też oczyszczanie jej z produktów szlifowania.

Należy przypuszczać, że w przyszłości pojawią się rozwiązania hybrydowe, łączące zastosowanie dysz SSP z innymi metodami doprowadzenia PCS do strefy szlifowania, które będą pozbawione tych ograniczeń. Prace nad takimi układami trwają już od kilku lat w Instytucie Obrabiarce i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej oraz od niedawna w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej.

## LITERATURA

1. Shen B., SHIH A. J., Minimum quantity lubrication (MQL) grinding using vitrified CBN wheels. Transactions of NAMRI/SME, 37, 129-136, 2009.
2. Klocke F., Manufacturing processes 2, grinding, honing, lapping. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2009.
3. Oczko K., Porzycki J., Szlifowanie. Podstawy i technika. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.
4. Peters J., Atrens S., An objective method for evaluating grinding coolants. Annals of the CIRP, 1, 247-250, 1976.
5. Chudobin L. V., Osnovy vybora i primeneniya SOZ pri slifovanii. Vestnik Mašinostroeniya, 7, 1980.
6. König W., Fertigungsverfahren. Band 2: Schleifen, Honen, Läppen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1980.
7. Tönshoff H. K., Schulze R., The effect of the coolant in the sawing of hard stone. Industrial Diamond Review, 40/4, 252-257, 1980.
8. Zimmermann D., Kühlschmierstoffe für die Feinbearbeitung. TZ. prakt. Metall bearb., 4, 1982.
9. Marinescu I., Handbook of Machining with Grinding Wheels. CRC Boca Raton, London, New York, 2007.
10. Korff, J., Additive für Kühlschmierstoffe. Proc. "Kühlschmierstoffe in der spanenden Fertigung.", Des Deutschen Industrieforums f. Techn., Frankfurt, 1991.
11. König, W. et al., Kühlschmierstoff – Eine ökologische Herausforderung an die Fertigungstechnik. Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Sonderausgabe für AWK, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
12. Heinzel C., Methoden zur Untersuchung und Optimierung der Kühlschmierung beim Schleifen, Ph.D. dissertation, Universität Bremen, 1999.
13. Marinescu I., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I., Tribology of Abrasive Machining Processes. William Andrew Publishing, Norwich, NY, 2004.
14. Brinksmeier E., Heinzel C., Wittmann M., Friction, cooling and lubrication in grinding. Annals of the CIRP, 48/2, 581-598, 1999.
15. Babiarz R., Żyłka Ł., Płodzień M., Badania wpływu parametrów doprowadzenia chłodziwa na proces szlifowania CFG stopu Inconel. Mechanik, 9, 1-3, 2014.
16. Tawakoli T., Hochleistungs-Flachschleifen, Technologie. Verfahrensplanung und wirtschaftlicher. VDI-Verlag, Einsatz 1990.
17. Beck T., Kühlschmierstoffeinsatz beim Schleifen mit CBN, Ph.D. thesis, RWTH Aachen 2001.
18. Klocke F., Schulz A., Gerschweiler K., Saubere Fertigungstechnologie – Ein Wettbewerbsvorteil von morgen? in Wettbewerbs-

- faktor Produktionstechnik – Aachener Perspektive, AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
19. Klocke F., Beck T., Gut geschmiert statt schlecht gekühlt. Kühlschmierstoffreduzierung beim CBN-Hochgeschwindigkeitsschleifen. *Werkstattstechnik*, 88/9-10, 400-404, 1998.
  20. Brinksmeier E., Walter A., Generation of Reaction Layers on Machined Surfaces. *Annals of the CIRP*, 49/1, 2000.
  21. Nguyen, T., Zhang L.C., Performance of a new segmented grinding wheel system. *Int. J. Mach. Tool Manu.*, 49, 291-296, 2009.
  22. Nadolny K., Small-dimensional sandwich grinding wheels with a centrifugal coolant provision system for traverse internal cylindrical grinding of steel 100Cr6. *Journal of Cleaner Production*, 93, 354-363, 2015.
  23. Sieniawski J., Badania efektywności chłodzenia w procesie szlifowania płaszczyzn z użyciem ściernic z otworami technologicznymi i strefowym podawaniem płynu. *Rozprawa Doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2013.*
  24. Oczóś E.K., Obróbka na sucho i ze zminimalizowanym smarowaniem. *Mechanik*, 5-6, 307-318, 1998.
  25. Schnell und trocken, *Werkst. u. Betr.*, 1997, 130/5, 356-357.
  26. Rowe W. B., *Principles of Modern Grinding Technology*. William Andrew Publishing, Burlington, USA 2009.
  27. Sadeghi M.H., Hadad M.J., Tawakoli T., Vesali A., Emami M., An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique. *Int. J. Mater.* 3, 241-251, 2010.
  28. Pusavec F., Krajnik P., Kopac J., Transitioning to sustainable production-Part I: Application on machining technologies. *J. Clean. Prod.* 18, 174-184, 2010.
  29. Oliveira D.J., Guermandi L.G., Bianchia E.C., Diniz A.E., Aguiar P.R., Canarim R.C., Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air. *J. Mater. Process. Technol.*, 212, 2559-2568, 2012.
  30. Weinert K., Inasaki I., Sutherland, Wakabayashi T., Dry machining and minimum quantity lubrication. *Annals of the CIRP*, 53/2, 2004.
  31. Tönshoff H. K., Brunner G., Minimalmengenkühlschmierung bei Schleifprozessen, *Maschinenmarkt*, 101/45, 30-37, 1995.
  32. Brinksmeier E., Walter A., Einsatzbeispiele für Minimalmengenkühlschmierung und Trockenbearbeitung, *Proc. of the Conference on Tribology- Solving Friction and Wear Problems, Technische Akademie Esslingen. Ostfildern, Germany*, 9-11, 23-43, 1996.
  33. Brinksmeier E., Schneider C., Bausteine für einen umweltverträglichen Feinbearbeitungsprozess, *Proc. of the IWF*, 7, 19.01-19.32, 1997.
  34. Tönshoff H. K., Karpuschewski B., Glatzel T., Particle Emission and Immission in Dry Grinding. *Annals of the CIRP*, 46/2, 693, 1997.
  35. Hafenbraedl D., Malkin S., Environmentally-Conscious Minimum Quantity Lubrication (MQL) for internal Cylindrical Grinding. *Transactions of NAMRI/SME*, 28, 149-154, 2000.
  36. Klocke F., Baus A., Beck T., Coolant induced forces in CBN high speed grinding with shoe nozzles. *Annals of the CIRP*, 49/1, 241-244, 2000.
  37. Pan Y., Sasaki T., Ito N., Ohmori H., Yamagata Y., Uehara Y., Lin W., An ELID Grinding System with a Minimum Quantity of Liquid. *Key Engineering Materials*, 23-28, 238-239, 2003.
  38. Silva L. R., et al, Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant-MQL in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47/2, 412-418, 2007.
  39. Wójcik R., Nowe media i sposoby ich doprowadzania do strefy szlifowania. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, 28/4, 137-145, 2008.
  40. Shen B., Shih A. J., Minimum quantity lubrication (MQL) grinding using vitrified CBN wheels. *Transactions of NAMRI/SME*, 37, 129-136, 2009.
  41. Tawakoli T., Hadad M., Sadeghi M. H., Daneshi A., Sadeghi B., Minimum quantity lubrication in grinding, effects of abrasive and coolant-lubricant types. *Journal of Cleaner Production*, 19/17-18, 2088-2099, 2011.
  42. Hadad M., Sadeghi B., Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 63/12, 1-15, 2012.
  43. Rosik R., Badanie wpływu glikolu propylenowego, jako cieczy obróbkowej podawanej z minimalnym wydatkiem, na wybrane właściwości warstwy wierzchniej w procesie szlifowania. *Rozprawa Doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2013.*
  44. Nadolny K., Wojtewicz M., Sienicki W., Herman D., Analiza możliwości odśrodkowego chłodzenia metodą MQL w procesie szlifowania otworów. *Mechanik 8-9*, 299-310, 2013.
  45. Klocke F., Gerschwiler K., Minimalmengenschmierung – Systeme, Medien, Einsatzbeispiele und ökonomische Aspekte der Trockenbearbeitung, *Trockenbearbeitung von Metallen. Proc. of the VDI-Seminar*, 18, 2.1-2.20, Stuttgart, 2003.
  46. Zhang S., Li J.F., Wang Y.W., Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 32, 81-87, 2012.
  47. Chandrasekaran H., Thuvander A., Modelling Tool Stresses and Temperature Evaluation in Turning using FEM. *Machining Science and Technology*, 1/2, 355-367, 1988.
  48. Wójcik R., Wpływ sposobu mocowania i kierunku chłodzenia sprężonym powietrzem na odkształcenia cieplne przedmiotu w procesie szlifowania płaszczyzn. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, 27/2, 33-40, 2007.
  49. Wójcik R., Odkształcenia termiczne w procesie szlifowania płaszczyzn z udziałem sprężonego powietrza, *XXX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów 2007.*
  50. Lee Pil-Ho, Sang Won Lee, Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51, 201-209, 2011.
  51. Vector – Technika Sprężonego Powietrza, <http://www.dyzspecjalne.pl>
  52. Choi H. Z., Lee S.W., Hae Do Jeong, The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 127, 155-158, 2002.
  53. Nguyen T., Zhang L.C., An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 224-230, 2003.