

Hybrydowe procesy skrawania wspomagane mediami technologicznymi

Media-assisted machining processes

WIT GRZESIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.186>

Przedstawiono hybrydowe sposoby skrawania, wykorzystujące wspomaganie mediami technologicznymi (*media-assisted machining* – MAM). Omówiono zasady i możliwości technologiczne intensywnego chłodzenia CCS pod dużym ciśnieniem (*high pressure cutting* – HPC), minimalnego chłodzenia (*minimum quantity cooling/lubrication* – MQC/MQL), chłodzenia kriogenicznego (*cryogenic machining* – CM) oraz integracji tych oddziaływań w procesie skrawania w różnych zastosowaniach przemysłowych – zwłaszcza w przypadku kształtowania elementów z materiałów trudnoskrawalnych. Opisano sposoby zasilania mediami technologicznymi oraz rozwiązania narzędzi/systemów narzędziowych i wyposażenie obrabiarek hybrydowych CNC. Podano przykład optymalizacji obróbki MAM z uwzględnieniem chłodzenia kriogenicznego.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka hybrydowa, media technologiczne, obróbka z CCS pod dużym ciśnieniem, obróbka z minimalnym chłodzeniem, obróbka kriogeniczna, materiały trudnoskrawalne

A special group of hybrid assisted processes termed media-assisted processes which various liquid and gaseous media supplied to the cutting zone is highlighted. Special attention is paid on such cooling techniques as high-pressure machining (HPC), high-pressure jet assisted machining (HPJAM), minimum quantity cooling/lubrication (MQC/MQL) and a group of cryogenically cooled machining including such cryogenic media as CO₂, snow and liquid nitrogen (LN₂). Some important effects resulting from the various cooling strategies are outlined and compared. In particular, quantitative effects concerning chip breaking, thermal and tribological behavior of the cutting process as well as burr reduction, surface quality and subsurface layer are presented. The optimization procedure concerning both energy consumption and machining costs in terms of material removal rate (MRR) is presented.

KEYWORDS: hybrid machining, cooling strategies, cooling media, high-pressure machining, minimum quantity lubrication, cryogenic machining, difficult-to-machine materials

* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik (w.grzesik@po.opole.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji Politechniki Opolskiej

Artykuł jest kontynuacją wcześniejszych publikacji autora w miesięczniku *Mechanik* [1–3] poświęconych hybrydowej obróbce ubytkowej i jej znaczeniu w nowoczesnym przemyśle wytwórczym. Rozwija problematykę wspomaganie procesu skrawania przez wprowadzenie do strefy obróbki dodatkowych mediów ciekłych i/lub gazowych.

W ogólnej klasyfikacji hybrydowych procesów kształtowania [1,4], w I grupie wyróżnia się procesy wspomagane (*assisted processes* – podgrupa I.A) i łączone (*mixed/combined processes* – podgrupa I.B). W przypadku konwencjonalnej i niekonwencjonalnej obróbki ubytkowej największe znaczenie ma tworzenie procesów hybrydowych według zasady I.A, czyli wspomaganie różnych sposobów skrawania energią drgań, termiczne laserem oraz mediami ciekłymi i gazowymi. Procesy hybrydowe ze wspomaganie mediami ciekłymi i gazowymi będą oznaczane symbolem CM+TM.

Charakterystykę i efekty zastosowania różnych strategii chłodzenia i smarowania (na sucho, MQL i kriogenicznego) w procesie skrawania przedstawiono w tabl. 1. Wiąże się one nierozdzielnie z tendencją do zwiększania zrównoważoności (ekologiczności/efektywności – *sustainability*) procesu skrawania, co przybliżono w artykule [6].

Na początku lat 70., kiedy na skalę przemysłową zaczęto stosować powłoki narzędziowe, wydawało się, że można będzie w dużo większym zakresie wykorzystywać skrawanie na sucho. Jednakże przez cztery dekady nie udało się osiągnąć wymaganego postępu w inżynierii powierzchni materiałów cienkowarstwowych odpornych na zużycie i na początku lat 90. zaczęto wprowadzać do przemysłu skrawanie na półsucho (*near-dry machining*), zwane powszechnie skrawaniem z minimalnym wydatkiem CCS (MQL – *minimum quantity lubrication*), jako nową strategię obróbki zrównoważonej.

Pozwoliła ona na wydatną redukcję użycia chłodziw/środków smarnych, ale pojawiły się kolejne bariery w poprawie przebiegu procesu skrawania, np. trwałości ostrza czy jakości powierzchni/stanu TWW (technologicznej warstwy wierzchniej). Podobnie jak tradycyjne CCS aerozole też mają negatywny, chociaż mniejszy, wpływ na

TABLICA 1. Charakterystyka i zastosowanie różnych strategii chłodzenia i smarowania w procesie skrawania [5]

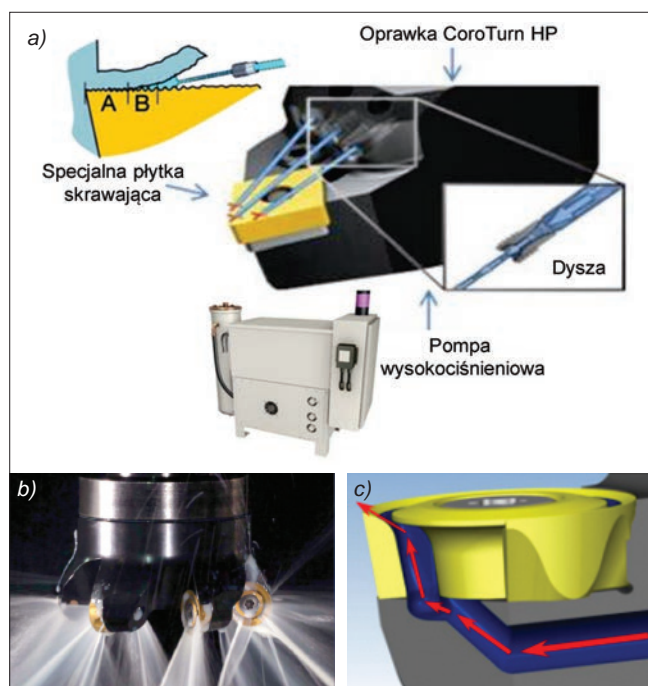
Rodzaj wpływu		Strategia chłodzenia/smarowania				
		Zalewowa (emulsja/olej)	Na sucho (sprężone powietrze)	MQL (olej)	Kriogeniczna (LN ₂)	Hybrydowa (LN ₂ +MQL)
Zasadniczy	Chłodzenie	dobrze	słabe	marginalne	b. dobrze	b. dobrze
	Smarowanie	b. dobrze	słabe	b. dobrze	marginalne	b. dobrze
	Odprowadzanie wióra	dobrze	dobrze	marginalne	dobrze	dobrze
Wtórny	Obrabiarka – chłodzenie	dobrze	słabe	słabe	marginalne	marginalne
	Przedmiot – chłodzenie	dobrze	słabe	słabe	dobrze	dobrze
	Pył/cząstki – kontrola	dobrze	słaba	marginalna	marginalna	dobrze
	Jakość wyrobu	dobrze	zła	marginalna	b. dobrze	b. dobrze

środowisko i zdrowie pracowników [7]. Strategia ta nie sprawdza się w przypadku materiałów trudnoskrawalnych, takich jak stale utwardzone, superstopy czy materiały kompozytowe. Konieczne stało się więc wprowadzenie kolejnej strategii obróbki zrównoważonej, opartej na koncepcji skrawania na sucho z gwałtownym efektem chłodzenia, z zastosowaniem mediów kriogenicznych (ciekłego azotu LN_2 , schłodzonego CO_2 , schłodzonego powietrza) pojedynczo lub hybrydowo, np. LN_2 z MQL (tabl. I).

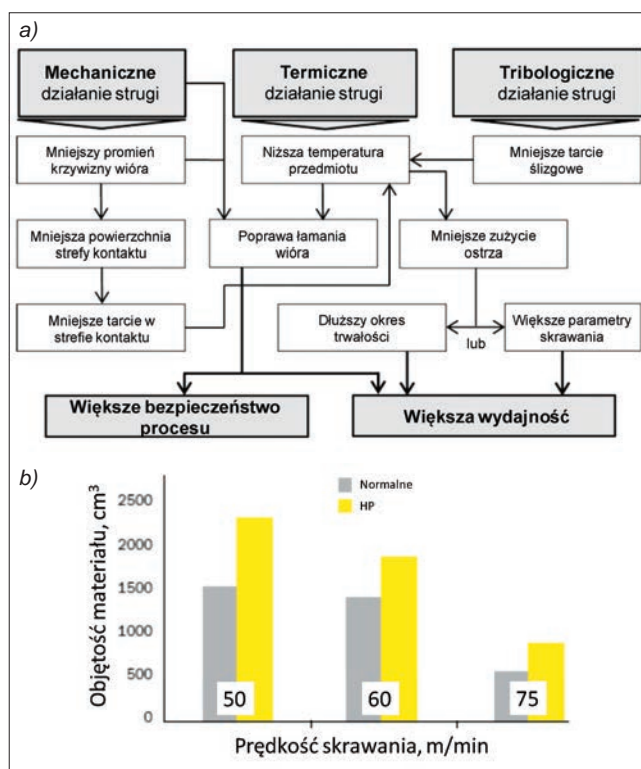
Metody hybrydowego skrawania ze wspomaganie mediami technologicznymi

■ **Obróbka z doprowadzeniem CCS pod dużym ciśnieniem.** Wśród procesów skrawania wspomaganymi mediami technologicznymi istotne znaczenie praktyczne ma doprowadzenie CCS pod dużym ciśnieniem, głównie w celu poprawy skrawalności materiałów trudnoskrawalnych – stopów niklu i tytanu, ceramiki, materiałów kompozytowych i stali odpornych na korozję. Badania w tym zakresie są prowadzone od kilku dekad, a ich zapoczątkowanie przypisuje się firmie Iscar, która na początku lat 90. wprowadziła wysokociśnieniowy system zasilania CCS do przecinaków i narzędzi do rowkowania o nazwie Jetcut. Z kolei rozpowszechnienie koncepcji obróbki HPC jest zasługą firmy Sandvik Coromant, która zastosowała ją w różnych wariantach narzędzi do toczenia, frezowania i wiercenia.

Jak powszechnie wiadomo, efektem skierowania strugi cieczy pod odpowiednim ciśnieniem między wiór i powierzchnię natarcia ostrza jest wytworzenie klina hydrodynamicznego, który zmienia warunki kontaktu w strefie wiór–ostrze (rys. 1a). Wydatek cieczy (natężenie przepływu) i jej ciśnienie są najważniejszymi czynnikami wpływającymi na proces tworzenia wióra, a więc jego kształt i wywołanie efektu jego łamania, oraz na mechanizm zużycia ostrza i jego końcową trwałość. Obserwowane są także



Rys. 1. Zasada tworzenia klina hydrodynamicznego w strefie kontaktu wiór–ostrze (a); konstrukcja głowiczki CoroTurn HP z trzema dyszami (b–c), konstrukcja Beyond Blast PCT (Precision Cooling Technology) głowicy frezowej (b) z doprowadzeniem CCS przez otwory w płytce skrawającej (c) firmy Kennametal [8]



Rys. 2. Wpływ strugi cieczy o dużym ciśnieniu na proces skrawania [14] (a) i porównanie wydajności skrawania stopu Ti6Al4V [8] (b)

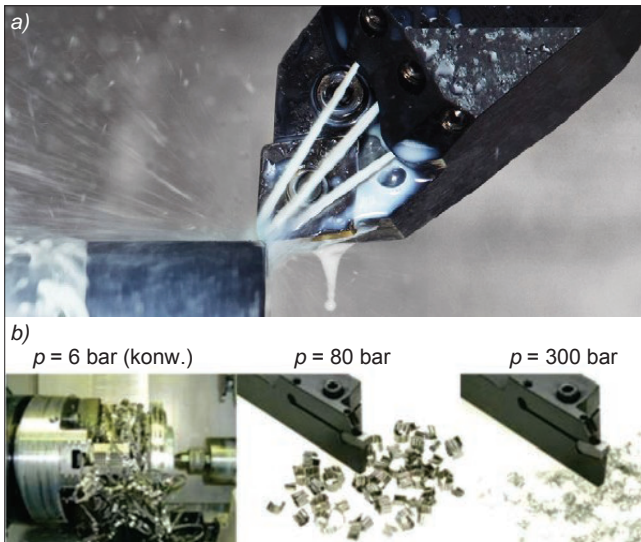
zmiany struktury obrabianego materiału i wióra, związane z istotnymi zmianami mechanicznymi, termicznymi i tribologicznymi procesy (zob. skrócenie długości styku wiór–ostrze na rys. 1a). Efekt tych trzech oddziaływań przedstawiono na rys. 2a.

Można stwierdzić, że efekt hydrodynamiczny jest w skutkach zbliżony do rowkowania płytek skrawających (stosowania narzędzi typu RCT) [7]. Z tego względu ten sposób wspomaganie procesu mediami technologicznymi jest również określane terminem wysokociśnieniowego dostarczania CCS (*high-pressure lubricoolant supply*) [4]. W przypadku głowiczek CoroTurn HP, stosowanych w systemach narzędzi do toczenia i wytaczania, zaleca się dostarczać CCS pod ciśnieniem 70÷80 bar dla stali odpornych na korozję i 150÷200 bar dla stali odpornych na korozję – typu duplex i stopów HRSA [8]. Zalecane natężenie wypływu to 20 l/min. Operacje przeprowadzane pod ciśnieniem powyżej 300 bar nazywa się skrawaniem wspomaganym wysokociśnieniowym strumieniem cieczy (HPJAM) lub strumieniem wody (HPWJAM) [9].

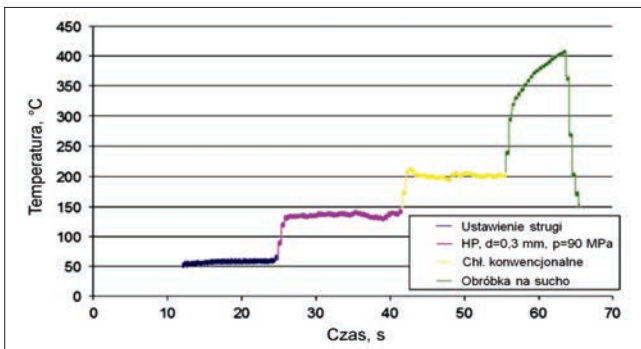
Zasadę procesu HPC i konstrukcję głowiczki przedstawiono na rys. 1a. W przypadku techniki Beyond Blast PCT (Precision Coolant Technology) CCS dostarcza się przez specjalne kanałki w płytce skrawającej pod niskim ciśnieniem ok. 7 bar (rys. 1c), co jednak przynosi podobny efekt jak wzrost ciśnienia do ok. 70 bar w zewnętrznym doprowadzeniu HPC. Rozwiązanie to przyniosło wzrost trwałości ostrza w obróbce stopów tytanu o 70÷100% [8].

Na rys. 3 przedstawiono zmianę kształtu wióra w rowkowaniu stopu Inconel 718 w związku ze zwiększeniem ciśnienia strugi CCS do 80 i 300 bar. Na rys. 3b można zaobserwować, że wzrost ciśnienia CCS do 80 bar powoduje zanik tworzenia się wiórów skłębionych, które zakłócają proces skrawania w obróbce zautomatyzowanej.

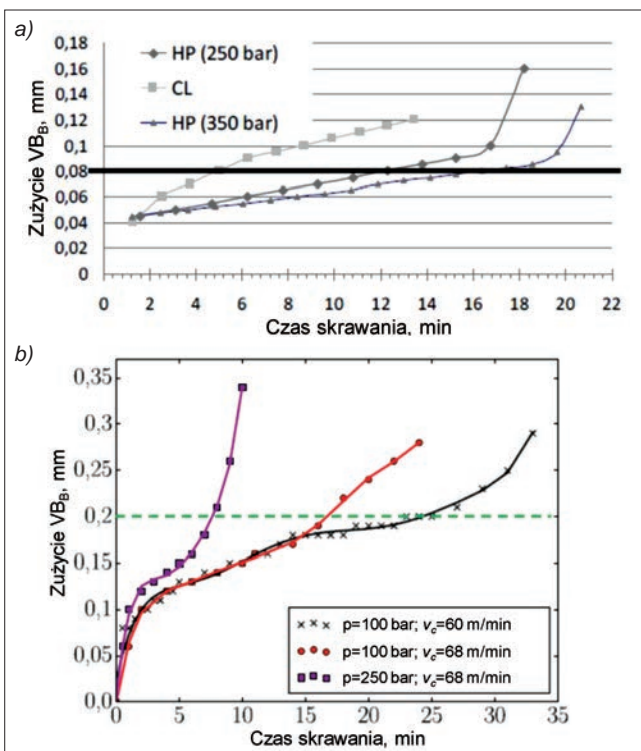
Na podstawie wieloletnich doświadczeń można stwierdzić, że głównym zastosowaniem techniki HPC jest skrawanie materiałów trudnoskrawalnych w przemyśle



Rys. 3. Poprawa łamania wióra przy rowkowaniu Inconelu 718 przez doprowadzenie CCS pod ciśnieniem 80 i 100 bar [4]. Warunki obróbki: materiał ostrza – CBN, CCS – emulsja 8%, $v_c = 250$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr., $b = 6$ mm, $a_p = 5$ mm (chłodzenie konwencjonalne) i 10 mm (HPC)



Rys. 4. Porównanie wartości temperatury w cyklu zmiany warunków chłodzenia przy toczeniu stopu Inconel 718. Warunki obróbki: $v_c = 50$ m/min, $f = 0,224$ mm/obr., $a_p = 2$ mm [9]



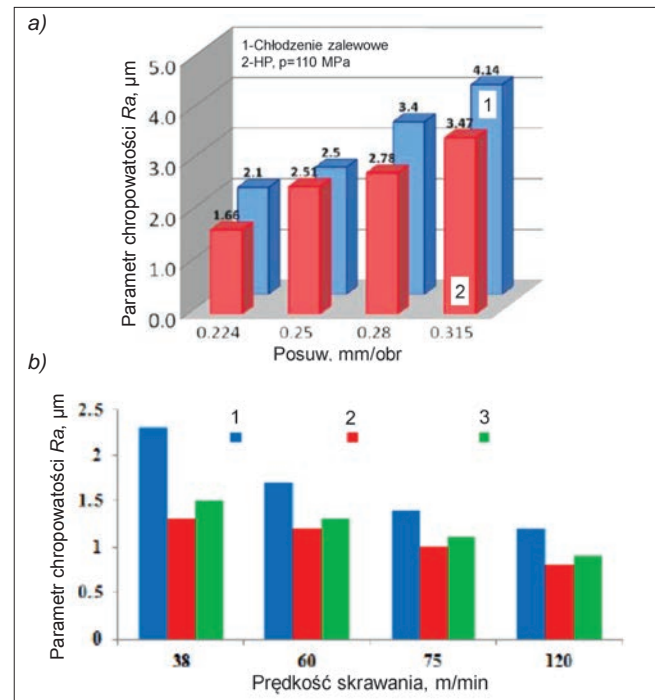
Rys. 5. Wpływ ciśnienia CCS na zużycie ostrza w toczeniu: a) stali duplex X2CrNiMo22-5, $f = 0,15$ mm/obr., $a_p = 0,5$ mm; b) stopu tytanu Ti555-3, $f = 0,1$ mm/obr., $a_p = 1,5$ mm [10, 11]

lotniczym i elementów turbin. Niska przewodność cieplna tych materiałów sprawia, że bez właściwej strategii chłodzenia następuje przyspieszone, a często katastrofalne zużycie ostrza. Ustalono, że temperatura skrawania może być obniżona o 40-50% [4, 9]. Potwierdza to zapis zmian temperatury w różnych warunkach obróbki (podczas skrawania na sucho temperatura wzrasta prawie czterokrotnie, gdy przestanie się dostarczać CCS pod ciśnieniem) – rys. 4. Z tego powodu możliwe jest zwiększenie prędkości skrawania do granic HSM przy toczeniu i frezowaniu stopu tytanu Ti6Al4V i Inconelu 718.

Według danych firmy Sandvik Coromant wydajność skrawania podczas obróbki stopu tytanu Ti6Al4V wzrasta o 50% przy tej samej prędkości skrawania i dodatkowo o 20% jako efekt wzrostu prędkości skrawania [8]. W warunkach obróbki HPJAM z rys. 4 obniżenie temperatury ostrza narzędzia o 30% w porównaniu z chłodzeniem konwencjonalnym jest osiągalne przy obniżeniu natężenia przepływu CCS o 350% [9].

Natomiast w przypadku superstopu Inconel 718 oraz dużej grupy stali zużycie ostrza podczas obróbki wykańczającej może być zmniejszone nawet do 350%. Krzywe zużycia przedstawione na rys. 5 potwierdzają silną zależność zużycia od sposobu i warunków chłodzenia podczas obróbki stali odpornej na korozję typu duplex i stopu tytanu Ti555-3. Towarzyszy temu wyraźny spadek rozciągających naprężeń własnych w warstwie wierzchniej.

Badania potwierdzają poprawę jakości powierzchni po toczeniu (rys. 6) i frezowaniu oraz minimalizację tworzenia się zadziorów. W Polsce technika HPC efektywnie wspomaga m.in. skrawanie superstopów w zakładach lotniczych Pratt & Whitney w Rzeszowie [14].



Rys. 6. Porównanie wartości parametru R_a chropowatości powierzchni po toczeniu: a) stali Ck45 (58 HRC) z chłodzeniem zalewowym i HPJAM z ciśnieniem cieczy $p = 110$ bar, $v_c = 98,5$ m/min, $a_p = 2$ mm [12]; b) stopu tytanu Ti555-3 (sposoby chłodzenia: 1 – strumieniem oziębnionego powietrza, 2 – zalewowo, 3 – strugą oziębnionej wody) [13]

■ **Obróbka z minimalnym wydatkiem CCS/doprowadzeniem aerozolu smarującego (MQL).** Skrawanie na sucho jest w wielu operacjach niemożliwe. W latach 90. prace nad minimalizacją zużycia CCS doprowadziły do wdrożenia przeciwstawnej do HPC techniki minimalnego

smarowania (dokładniej: obróbki z minimalną ilością środka smarnego w medium obróbkowym; MQL) [7]. Należy podkreślić, że w zależności od funkcji dostarczonego medium płynnego występuje tak minimalne smarowanie, jak i chłodzenie (MQC), gdy dostarcza się w minimalnych ilościach emulsję, wodę lub oziębione/skroplone powietrze. Jeśli te dwie funkcje występują jednocześnie – jak w przypadku aerozolu chłodząco-smarującego – to używa się pojęcia minimalnego chłodzenia i smarowania (MQCL – *minimum quantity cooling lubrication*). Zwykle w centrach obróbkowych wydatek cieczy obróbkowej wynosi ok. 20÷100 l/h, podczas gdy w instalacjach MQL jest to tylko 0,03÷0,20 l/h (średnio poniżej 50 ml/h). Podstawowe zastosowania MQL dotyczą obróbki otworów (wiercenia, rozwiercania, głębokiego wiercenia, gwintowania i wygniatania gwintów) oraz cięcia w aluminium, stali i żeliwie szarym. Obecnie jako medium smarujące używa się najczęściej alkoholi tłuszczowych i estrów syntetycznych (olejów estrowych), podawanych w postaci aerozoli lub par [7].

W systemach minimalnego smarowania (MS) są dwa sposoby doprowadzenia medium smarującego do ostrza narzędzia: zewnętrzny i wewnętrzny. W doprowadzeniu zewnętrznym aerozol wytwarzany w specjalnej instalacji jest rozpylany z jednej lub kilku dysz, umieszczonych blisko ostrza narzędzia, a ustawienie dysz jest bardzo ważne dla efektywności smarowania ostrza. Tę technikę stosuje się w obrabiarkach, które nie mają instalacji wewnętrznego doprowadzenia CCS, np. podczas przecinania, frezowania walcowo-czołowego i czołowego oraz toczenia. Przy większych wartościach $L/D > 3$ konieczne staje się wewnętrzne doprowadzenie środka smarnego przez wrzeciono i kanałki w narzędziu. Stosuje się wówczas systemy jedno- lub dwukanałowe.

Zagadnienia techniczne związane z techniką MQL są z pewnością dobrze znane czytelnikom *Mechanika* z wcześniejszych artykułów przeglądowych. W tym opracowaniu skuteczność techniki MQL będzie porównywana z efektami innych sposobów dozowania i doprowadzania CCS.

Jak wspomniano, w obróbce trudnoskrawalnych stopów lotniczych stosuje się zasadniczo strategię HPC, jednakże są obiecujące sygnały wskazujące na pozytywne efekty stosowania techniki MQL (wykorzystywanej na dużą skalę w skrawaniu stopów aluminium) [15]. Jest to możliwe pod warunkiem dobrania odpowiednich materiałów narzędziowych/powłok i geometrii ostrza.

Przykładowo: w wykańczającym toczeniu stopów na osnowie z niklu technika MQL sprawdza się dobrze dla ostrzy z powłoką wielowarstwową TiCN/Al₂O₃/TiN ($v_c = 60$ m/min), a we frezowaniu – dla ostrzy z ceramiki wzmocnionej wiskerami SiC oraz SiAlON ($v_c = 100\text{--}500$ m/min). W przypadku obróbki stopu tytanu Ti6Al4V testuje się połączenie MQL z teksturyzacją (mikrorowkami) powierzchni natarcia ostrza, co powoduje znaczący spadek temperatury skrawania i składowych sił skrawania. W tak wymagającej obróbce jak skrawanie kompozytów CFRP niedopuszczalne jest stosowanie obfitego chłodzenia, możliwe jest jedynie MQL pod warunkiem dostarczenia bardzo małych cząsteczek oleju w strudze z dużą prędkością albo wytworzenia koherentnej strugi z minimalnymi zawirowaniami.

Sposoby obróbki kriogenicznej

Obróbka kriogeniczna (*cryogenic machining/cutting*) jest zaliczana do grupy procesów wspomaganých przez

media gazowe, schłodzone do temperatury kriogenicznej [4]. Przyjmuje się, że początek kriogeniki odpowiada temperaturze -150°C (123 K), chociaż CASA (Cryogenic American Society of America) definiuje ją poniżej 120 K (-153°C), a NIST poniżej -180°C [5]. Odpowiada to temperaturze poniżej punktu wrzenia wielu gazów (helu, wodoru, tlenu, azotu i normalnego powietrza).

Mediami kriogenicznymi o znaczeniu technologicznym są ciekły azot (LN₂) o temperaturze -186°C , hel i oziębiony dwutlenek węgla (LCO₂) o temperaturze ok. $-50\text{--}-78^{\circ}\text{C}$. Oznacza to, że wbrew przyjętym definicjom w praktyce technologicznej kriogenicznej odnosi się do mediów chłodzących o temperaturze poniżej 0°C .

Kriogenika jest uznawana za podstawowy środek w koncepcji czystej/zrównoważonej obróbki (*clean/sustainable machining*) [5, 6, 16]. Takie oddziaływanie termiczne powoduje zmiany właściwości materiału narzędzia i materiału obrabianego z jednoczesną – korzystną dla trwałości ostrza, morfologii wióra i funkcjonalności obrabianej powierzchni (np. powodującą wzrost wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na korozję i zużycie ścierne) – intensywną dyssypacją ciepła ze strefy skrawania. Zastosowanie chłodzących mediów kriogenicznych przynosi podobny skutek jak połączenie obróbki na sucho z gwałtownym chłodzeniem.

Rozwijane są także strategie chłodzenia hybrydowego, w których efekt kriogeniczny jest wspomagany smarowaniem zawieszoną oleju w aerozolu (MQL) ze strumieniem LN₂ lub LCO₂.

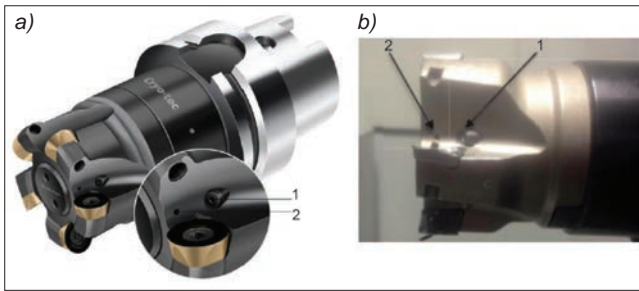
W tabl. II zestawiono zalety i wady obróbki kriogenicznej. Poza dyskusją są korzyści dotyczące ochrony środowiska i aspekty społeczne (najważniejszy dotyczy braku toksycznego wpływu na zdrowie pracowników). Z drugiej strony kwestionuje się ekonomiczną stronę procesu z uwagi na wysoką cenę mediów kriogenicznych (wymagane jest duże natężenie przepływu do oziębienia ostrza, ponieważ efekt ten rozszerza się na przedmiot i elementy obrabiarki) oraz dodatkowe koszty związane z ich magazynowaniem i transportem.

TABLICA II. Wykaz zalet i wad obróbki kriogenicznej [16]

Kryteria	Zalety	Wady
Koszty	Wyższa prędkość skrawania/dłuższy okres trwałości	Koszt medium
Jakość wyrobu	Lepsza jakość powierzchni	Mniejsza dokładność wymiarowa
Środowisko/ społeczeństwo	Czyste środowisko wytwórcze	Odmrażanie/oddziaływanie korozyjne

■ Obróbka kriogeniczna z użyciem oziębionego CO₂.

W tym przypadku wykorzystuje się efekt Joule'a-Thomsona, zgodnie z którym ciekły CO₂ w temperaturze $-78,5^{\circ}\text{C}$ wrze (spienia się) przy ciśnieniu atmosferycznym, tworząc mieszaninę piany śnieżnej CO₂ (60%) i gazu (40%). W stanie ciekłym jest magazynowany pod ciśnieniem ok. 50 bar. Chłodzenie jest wynikiem gwałtownego rozprężania wskutek parowania (sublimacji), kiedy ciekły CO₂ wypływa z dyszy. Z tego względu bardzo istotne jest położenie dyszy względem chłodzonej strefy. Ważnym czynnikiem w efektywnym chłodzeniu strumieniem CO₂ jest natężenie wypływu, którego wzrost powoduje zwiększoną dyssypację ciepła ze strefy skrawania [17].

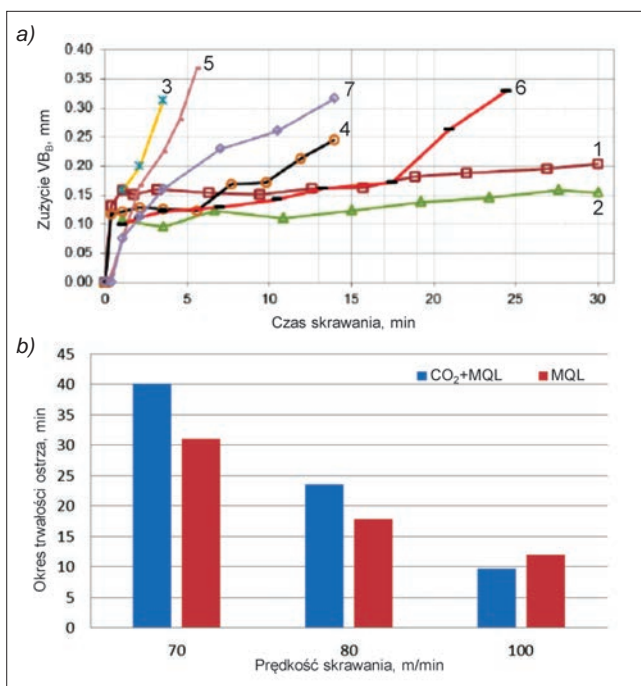


Rys. 7. Rozwiązania konstrukcyjne narzędzi (typu cryo-tec) do opcjonalnego dostarczania różnych mediów przez kanałki wewnętrzne: a) frez do kopiowania (1 – powietrze, emulsja, aerosol, 2 – CO₂) [18], b) frez walcowo-czołowy (1 – MQL i/lub powietrze, 2 – CO₂) [19]

Do obróbki coraz częściej stosuje się takie narzędzia, jak pokazane na rys. 7 frezy typu cryo-tec, z możliwością dostarczania różnych mediów chłodzących/smarujących – powietrza, emulsji, aerosolu czy CO₂.

Krzywe zużycia uzyskane po frezowaniu walcowo-czołowym (frez z rys. 7b) stopu tytanu Ti6Al4V z zastosowaniem różnych technik chłodzenia – chłodzenia zalewowego, MQL, oziębionym CO₂ i hybrydowego (CO₂ + MQL i CO₂ + powietrze) – przedstawiono na rys. 8a.

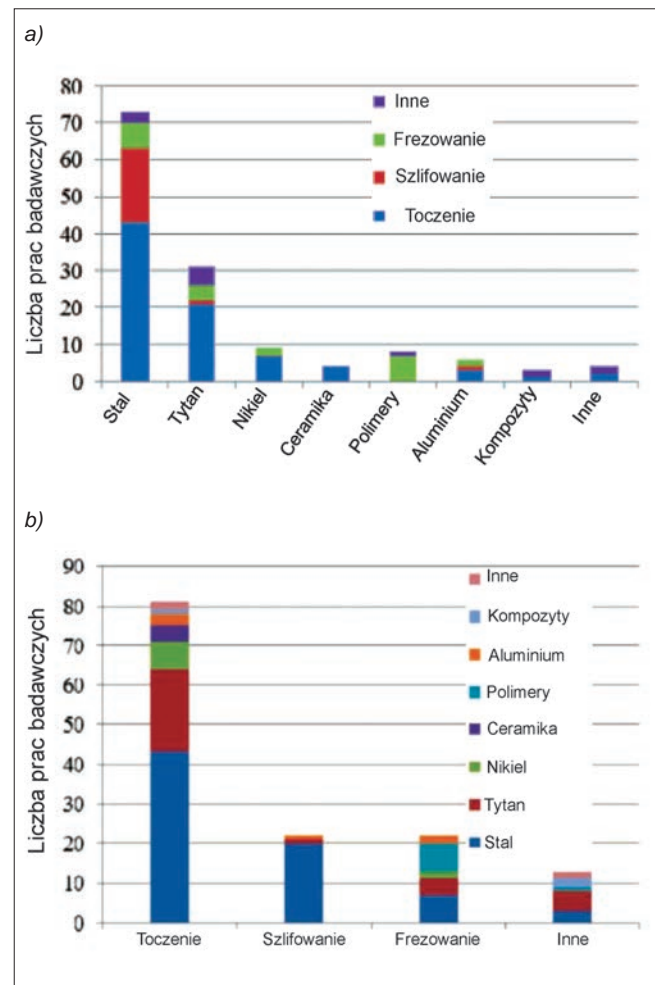
W badaniach porównawczych dla wskaźnika zużycia $VB_B = 0,2$ mm stosowano stałą prędkość skrawania $v_c = 100$ m/min. Z rys. 8a wynika, że okres trwałości $T = 30$ min uzyskano przy chłodzeniu zalewowym emulsją i pod ciśnieniem (krzywe 2 i 1). Chłodzenie kriogeniczne CO₂ (krzywa 5) nie pozwoliło na ograniczenie zużycia ostrza, nawet w porównaniu ze skrawaniem na sucho. Z drugiej strony chłodzenie hybrydowe CO₂ + MQL (krzywa 6) okazało się skuteczne, ale dla krótszego okresu trwałości ok. 15 min [19]. Z tego względu na rys. 8b oszacowano okresy trwałości ostrza dla różnych prędkości skrawania. Można stwierdzić, że dodanie CO₂ do aerosolu zwiększa okres trwałości ostrza średnio o 30%, ale przy mniejszych prędkościach skrawania (dla $v_c = 100$ m/min skuteczniejsza jest metoda MQL).



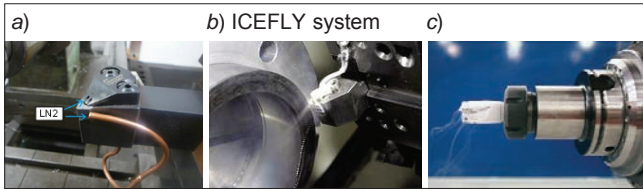
Rys. 8. Porównanie efektów różnych sposobów chłodzenia/smarowania w odniesieniu do zużycia dla prędkości skrawania $v_c = 100$ m/min; oznaczenia sposobów chłodzenia: 1 – HP ze średnim ciśnieniem, 2 – zalewowe, 3 – na sucho, 4 – MQL, 5 – CO₂, 6 – CO₂ + MQL, 7 – CO₂ + powietrze (a) i trwałości ostrza (b) [19]

■ **Obróbka kriogeniczna z użyciem schłodzonego azotu LN₂.** Udokumentowano, że zastosowanie LN₂ w procesie skrawania przyczynia się do redukcji tarcia i tworzenia się krateru na powierzchni natarcia, a także zmniejszenia odkształceń plastycznych oraz zużycia ściernego powierzchni przyłożenia. Dotyczy to obróbki stopów tytanu, superstopów (np. Inconelu 718), stopów z pamięcią kształtu, stopów magnezu, biostopów Co-Cr-Mo, kompozytów na osnowie z metalu, twardych stali i żeliwa oraz materiałów medycznych [5].

Stan rozpowszechnienia techniki chłodzenia kriogenicznego w odniesieniu do gatunku materiału i rodzaju operacji przedstawiono na rys. 9. Dominuje toczenie twardych stali, ale zauważalny jest brak wiercenia z uwagi na trudności w zabudowie dysz doprowadzających medium kriogeniczne do strefy obróbki. Z kolei obróbka ciągliwych materiałów i tworzyw polimerowych (zwykle mikroobrobka) wiąże się z doprowadzeniem materiału do stanu kruche go. Jest nawet koncepcja schładzania tworzącego się wióra, który w stanie kruchym będzie bardziej łamliwy. Bardzo wymagającymi materiałami są stopy tytanu i niklu i tylko – odpowiednio – ok. 13% i 6,5% badań dotyczy ich kriogenicznego frezowania. Są jednak realne przesłanki do poprawy skrawalności i obniżenia kosztów obróbki tych materiałów [20]. Należy również podkreślić, że 68% materiałów stosowanych w obróbce kriogenicznej to węgliki spiekane, z tego 1/3 to węgliki powlekanie. Łatwo to wytłumaczyć uzyskiwanym wydłużeniem okresu trwałości ostrza.



Rys. 9. Rozpowszechnienie skrawania kriogenicznego w odniesieniu do: a) obrabianych materiałów, b) operacji obróbkowych – na podstawie liczby prac badawczych [21]

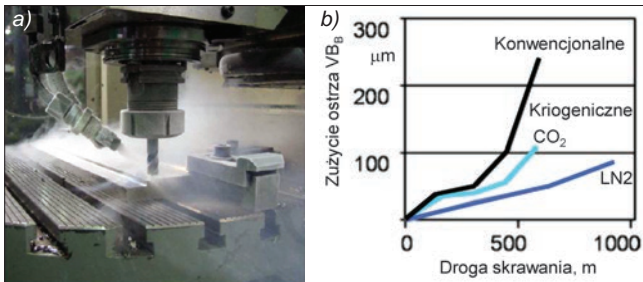


Rys. 10. Sposoby dostarczania LN₂ do strefy skrawania: a) wewnątrz i b) zewnątrz [18]; c) przez wrzeciono w przypadku kriogenicznego chłodzenia typu MQL [21]

Sposoby doprowadzenia ciekłego azotu do strefy obróbki przedstawiono na rys. 10.

Przykładowo w kriogenicznej obróbce stopów tytanu wydajność obróbki może wzrosnąć dwukrotnie. Z jednej strony wzrastają siły skrawania jako efekt utwardzenia materiału obrabianego, a z drugiej wydłuża się okres trwałości ostrza (nawet dziesięciokrotnie) wskutek intensywnego odprowadzania ciepła przez medium kriogeniczne.

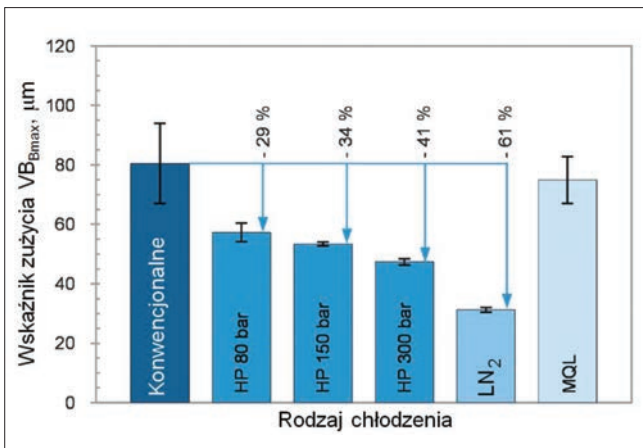
Na rys. 11 porównano intensywność narastania zużycia powierzchni ostrza frezu we frezowaniu kriogenicznym stopu tytanu Ti6Al4V z użyciem LCO₂ i LN₂. Widoczne



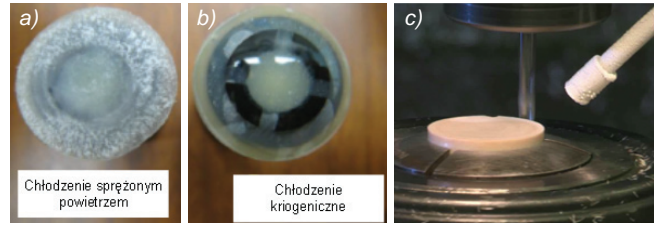
Rys. 11. Frezowanie kriogeniczne stopu tytanu Ti6Al4V ($D_f = 12$ mm, $a_e = 8$ mm, $a_p = 5$ mm, $v_c = 100$ m/min, $f_z = 0,03$ mm) (a) i porównanie narastania zużycia dla chłodzenia strumieniem CO₂ i LN₂ (b) [5, 6]

jest mniejsze i równomierne zużycie, gdy do strefy kontaktu podawany jest ciekły azot zamiast LCO₂. Efekt ten tłumaczy się tworzeniem ciekłych/gazowych warstwek między ślizgającymi się powierzchniami ostrza i wióra, co redukuje tarcie (wartości μ do 0,3÷0,4) [20]. Obróbka kriogeniczna jest efektywnym sposobem poprawy skrawalności materiałów o wyjątkowo złej skrawalności, takich jak intermetaliki (aluminidki tytanu) stosowane coraz częściej na łopatkach turbin gazowych.

Na rys. 12 przedstawiono efekty stosowania różnych strategii chłodzenia (w tym LN₂) na zużycie ostrza (wskaź-



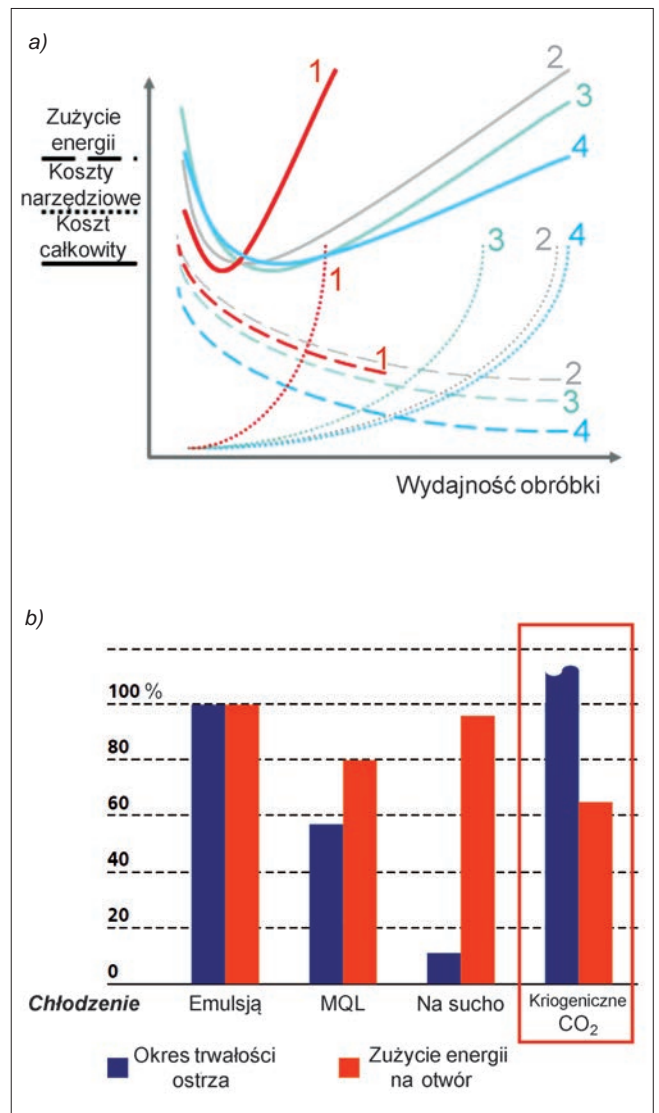
Rys. 12. Porównanie zużycia ostrza w skrawaniu intermetaliku γ -TiAlN ostrzem z węgla HW-P10 z różnymi sposobami chłodzenia; parametry skrawania: $v_c = 80$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 0,25$ mm [6, 8]



Rys. 13. Soczewka wewnątrzgałkowa wykonana z termoplastycznego biopolimeru PMMA po obróbce: a) konwencjonalnej z chłodzeniem sprężonym powietrzem i b) kriogenicznej narzędziem typu ICEFLY z rys. 10b [22]; c) schładzanie kriogeniczne obrabianego elementu

nik VB_{Bmax}) w skrawaniu intermetaliku γ -TiAlN ostrzem z węgla HW-P10. Wyraźnie widać, że doprowadzenie LN₂ spowodowało zmniejszenie zużycia ostrza o ok. 60% w porównaniu z chłodzeniem grawitacyjnym.

Obróbkę kriogeniczną (rys. 9b) stosuje się także do obróbki ceramiki ostrzem z PCBN czy tworzyw polimerowych, np. tworzywa termoplastycznego PMMA – polimetakrylanu metylu, stosowanego na implanty żręcnicy oka, tzw. soczewki zwijalne (*implanted intraocular lens* – IOL). W tych przypadkach wymaga się zdecydowanej poprawy gładkości powierzchni. Efekty kriogenicznego



Rys. 14. Wiercenie żeliwa EN-GJL 250 dla różnych strategii chłodzenia: a) porównanie zużycia energii i kosztów; oznaczenia sposobów chłodzenia: 1 – na sucho, 2 – emulsją, 3 – MQL, 4 – kriogeniczne; b) okres trwałości ostrza [24, 25]

toczenia polimeru PMMA pokazano na rys. 13a i b. Ponieważ materiał w temperaturze -40°C przechodzi w stan szklisty, uzyskuje się lustrzaną hydrofilową powierzchnię (rys. 13b) o dużo mniejszej chropowatości (parametr R_q jest o 40% mniejszy).

■ **Optymalizacja obróbki z zastosowaniem różnych mediów chłodząco-smarujących.** W przypadku wdrażania nowych procesów wytwórczych istotne znaczenie ma dobór optymalnych warunków według różnych kryteriów optymalizacji. W przypadku procesów skrawania mogą nimi być koszty i wskaźnik energochłonności (zwykle zużycie energii) procesu [7, 23]. Interesującym i ważnym praktycznie zagadnieniem jest dodatkowe uwzględnienie strategii chłodzenia.

Na rys. 14a przedstawiono ocenę zużycia energii i koszty w funkcji objętościowej wydajności skrawania dla wiercenia otworów w żeliwie szarym z gatunku EN-GJL 250. Porównawczo zastosowano obróbkę na sucho, chłodzenie emulsją, technikę MQL i chłodzenie kriogeniczne CO_2 .

Większa wydajność obróbki generuje wyższe koszty narzędziowe z powodu skracania okresu trwałości ostrza i w tym aspekcie korzystniejszy jest wybór chłodzenia emulsją lub kriogenicznego CO_2 (ten trend potwierdza się na rys. 14b, ale zużycie energii przypadające na wykonanie jednego otworu jest wyraźnie niższe). Zużycie energii zmniejsza się wraz ze wzrostem wydajności i w tym przypadku zdecydowanie najkorzystniejsze okazało się chłodzenie kriogeniczne. Najniższe koszty całkowite uzyskano dla różnych strategii chłodzenia, ale największa wydajność dla tego kryterium pojawia się również w przypadku chłodzenia CO_2 (dotyczy to także mniejszej wydajności wyznaczonej dla strategii MQL). Obróbka z chłodzeniem emulsją i MQL może być rozważana dla średniej, a na sucho – dla małej wydajności.

Z przytoczonej analizy wynika jasno zrównoważoność obróbki kriogenicznej, gdyż oszczędności dotyczą nie tylko ochrony środowiska i zużycia energii, ale również kosztów i czasu.

Podsumowanie

- Obróbka wspomagana mediami technologicznymi jest wciąż rozwijana i stanowi ważny element hybrydowego kształtowania materiałów. Zwłaszcza stosowanie mediów kriogenicznych – ciekłych i gazowych – przyczynia się do rozwoju czystych, zrównoważonych procesów wytwórczych/obróbkowych.
- Skuteczność różnych strategii chłodzenia/smarowania należy rozpatrywać w kontekście zużycia ostrza. Z tego względu bardzo istotne jest dopasowanie do warunków skrawania efektów chłodzenia i smarowania. Dobrym rozwiązaniem mogą być hybrydowe media oparte na składnikach kriogenicznych, takie jak CO_2 + MQL czy LN_2 + MQL.
- Dobór strategii chłodzenia (potwierdzony dla wiercenia otworów w żeliwie szarym) powinien być rozpatrywany zarówno w funkcji zużycia energii, jak i kosztów. W tym aspekcie chłodzenie kriogeniczne CO_2 jest dobrym wyborem dla dużej wydajności obróbki. Z kolei obróbka na sucho jest zalecana dla małej, a chłodzenie emulsją i MQL dla średniej wydajności obróbki.
- Zrównoważoność obróbki kriogenicznej rozciąga się na oszczędności dotyczące nie tylko ochrony środowiska i zużycia energii, lecz także kosztów i czasu.

LITERATURA

1. Grzesik W. „Hybrydowe procesy obróbki ubytkowej. Definicje, zasady tworzenia i znaczenie w przemyśle”. *Mechanik*. 91, 5–6 (2018): s. 338–341.
2. Grzesik W. „Hybrydowe procesy kształtowania wyrobów, integrujące techniki przyrostowe i ubytkowe”. *Mechanik*. 91, 7 (2018): s. 468–475.
3. Grzesik W. „Polepszanie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych. Cz. I. Obróbka wspomaganą i hybrydową”. *Mechanik*. 7 (2011): s. 564–569.
4. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. “Hybrid processes in manufacturing”. *Annals of the CIRP – Manufacturing Technology*. 63/2 (2014): s. 561–583.
5. Jawahir I.S., Attia H., Biermann D., Dufflou J., Klocke F., Meyer D., Newman S.T., Pusavec F., Putz M., Rech J., Schulze V., Umbrello D. “Cryogenic manufacturing processes”. *Annals of the CIRP – Manufacturing Technology*. 65/2 (2016): s. 713–736.
6. Grzesik W. „Wizje i strategię wytwarzania Cz. I i II”. *Mechanik*. 83, 3, 4 (2010): s. 145–148; 83, 4 (2010): s. 232–239.
7. Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. Warszawa: PWN, 2018.
8. Materiały firmowe: High pressure coolant machining, www.sandvik.coromant.com; Precision Cooling Technology, www.kennametal.com.
9. Courbon C., Kramar D., Krajnik P., Pusavec F., Rech J., Kopac J. “Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: An experimental study”. *Int. J. Machine Tools and Manufacture*. 49 (2009): s. 1114–1125.
10. Braham-Bouchnak T., Germain G., Robert P., Lebrun J.L. “High pressure water jet assisted machining of duplex steel: machinability and tool life”. *Int. Journal of Material Forming*. 3 (2010): s. 507–510.
11. Ayed Y., Germain G. “High-pressure water-jet-assisted machining of Ti555-3 titanium alloy: investigation of tool wear mechanisms”. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 96 (2018): s. 845–856.
12. Globočki Lakić G., Sredanović B., Kramar D., Kopač J. “Possibilities of application of high pressure jet assisted machining in hard turning with carbide tools”. *Tribology in Industry*. 39 (2017): s. 238–247.
13. Wstawska I., Ślimak K. “The influence of cooling techniques on cutting forces and surface roughness during cryogenic machining of titanium alloys”. *Archives of Mechanical Technology and Materials*. 36 (2016): s. 12–17.
14. Laskowski P., Krupa K., Habrat W., Przystacki D., Sieniawski J. „Toczenie stopu Ti-6Al-4V z zastosowaniem wysokiego ciśnienia cieczy chłodząco-smarującej”. *Mechanik*. 87, 8–9 CD (2014): s. 403–410.
15. M'Saoubi R., Axinte D., Leung Soo S., Nobel Ch., Attia H., Kappmeyer G., Engin S., Wei-Ming S. “High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials”. *Annals of the CIRP – Manufacturing Technology*. 64, 2 (2015): s. 557–580.
16. Lu T., Dillon O.W., Jawahir I.H. “A thermal analysis framework for cryogenic machining and its contribution to product and process sustainability”. *Proc. 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Innovative Solutions*, Berlin (2013): s. 262–267.
17. Sadik M.I., Isakson S., Malakizadi A., Nyborg L. “Influence of coolant flow rate on tool life and wear development in cryogenic and wet milling of Ti-6Al-4V”. *Procedia CIRP*. 46 (2016): s. 91–94.
18. Stefansson T. “Application of Cryogenic Coolants in Machining Processes”. Stockholm: KTH, 2014.
19. Tapoglou N., Lopez M.A., Cook I., Taylor Ch.M. “Investigation of the influence of CO_2 coolant application on tool wear”. *Procedia CIRP*. 63 (2017): s. 745–749.
20. Shokrani A., Dhokia V., Munoz-Escalona P., Newam S.T. “State-of-the-art cryogenic machining and processing”. *Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 26 (2013): s. 616–648.
21. Prins C., Treurnicht N.F. “An overview of advanced cooling techniques for titanium alloy machining in aerospace”. *SAT25 Proceedings*, 2013 (online).
22. Knopf J., Grimm L., Ghosh R., Gibson D. “Cryogenic machining of PEEK”. *Proc. 1st PEEK Conf.*, Philadelphia, 2013.
23. Grzesik W. “Energy consumption optimization in machining processes”. Davim J.P. (red.). *Metal Cutting Technologies. Progress and Current Trends*, s. 36–56.
24. Neugebauer R., Drossel W., Wertheim R., Hochmuth C., Dix M. “Resource and energy efficiency in machining using high-performance and hybrid processes”. *Procedia CIRP*. 1 (2012): s. 3–16.
25. Hybrid machining processes in cutting technology, Fraunhofer IWU, www.iwu.fraunhofer.de. ■