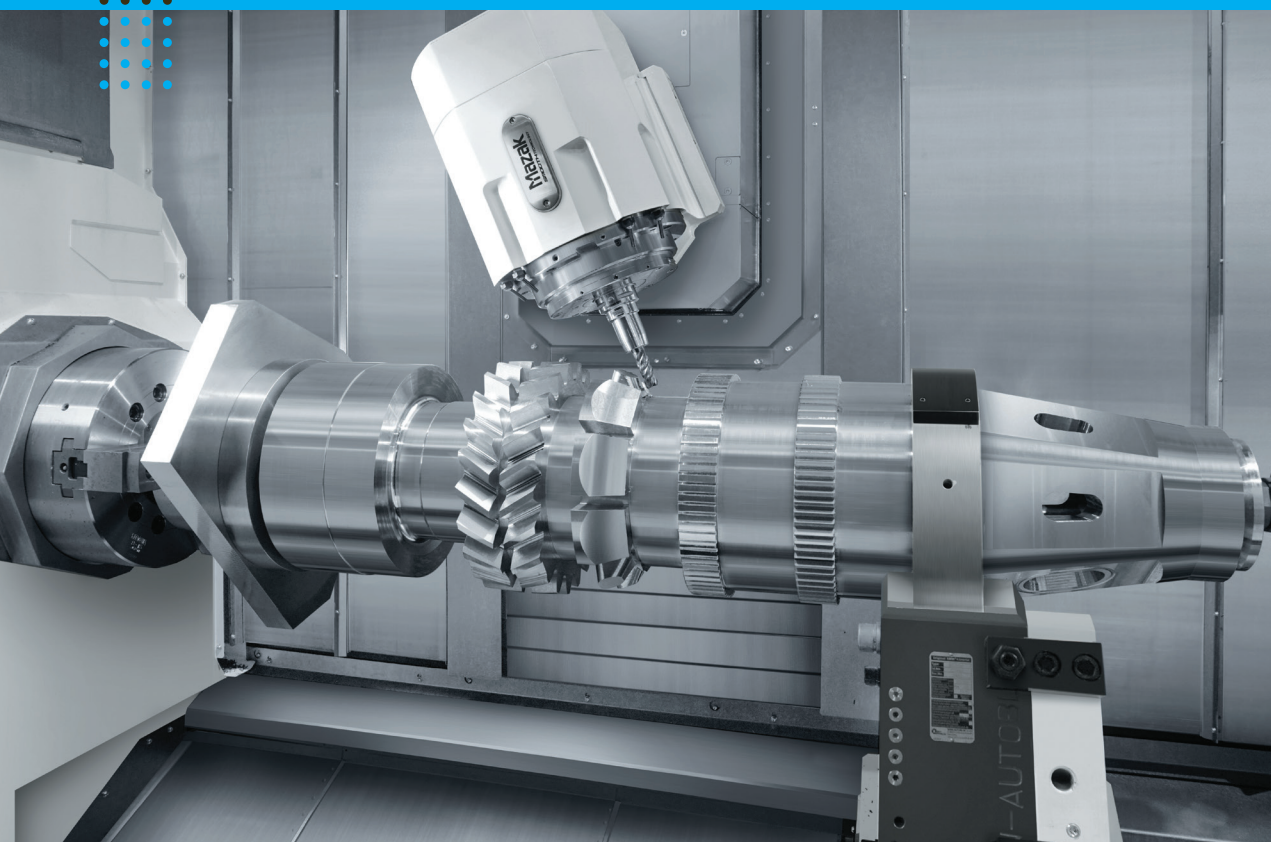


Eugene Feldshtein
Kamil Leksycki

.....

Współczesne trendy rozwoju zautomatyzowanej obróbki mechanicznej

PODRĘCZNIK



Eugene Feldshtein, Kamil Leksycki

**WYBRANE ZAGADNIENIA
WYSOKOWYDAJNEJ
OBRÓBKI MECHANICZNEJ**

Podręcznik

Zielona Góra 2025

RADA WYDAWNICZA

Mariusz Naczka (*przewodniczący*), Paweł Andrzejewski, Andrzej Bisztyga,
Bogumiła Burda, Joanna Dec-Pietrowska, Beata Gabryś, Mariusz Jenek,
Aleksandra Kruk, Franciszek Runiec (*sekretarz*)



RECENZENCI

Stanisław Legutko
Piotr Niesłony

REDAKCJA

Beata Toczewska

KOREKTA

Izabela Bednarz

REDAKCJA TECHNICZNA

Arkadiusz Sroka

PROJEKT OKŁADKI

Marta Surudo

© Copyright by Uniwersytet Zielonogórski
Zielona Góra 2025

ISBN 978-83-7842-586-1

DOI <https://doi.org/10.59444/uz.9788378425861>

OFICyna WYDAWNICZA UNIWERSYTETU ZIELONOGÓRSKIEGO

65-246 Zielona Góra, ul. Podgórna 50, tel. (68) 328 78 64
www.ow.uz.zgora.pl, sekretariat@ow.uz.zgora.pl

SPIS TREŚCI

Wstęp	5
ROZDZIAŁ 1. INTENSYFIKACJA PROCESÓW OBRÓBKİ SKRAWANIEM	9
1.1. Obróbka z dużymi prędkościami (HSC)	10
1.1.1. Informacje ogólne	10
1.1.2. Przebieg procesu deformacji plastycznej i wytwarzania wióra	12
1.1.3. Siły i moc skrawania	16
1.1.4. Wymiana ciepła	21
1.1.5. Zużycie i eksploatacja narzędzi skrawających	22
1.1.6. Podstawowe wymagania względem maszyn i szczegóły ich konstrukcji	25
1.1.7. Uchwyty do mocowania przedmiotów i narzędzi	35
1.1.8. Wskaźniki stanu warstwy wierzchniej	42
1.2. Obróbka z dużą wydajnością (HPC) oraz z dużymi posuwami (HFC)	47
1.2.1. Informacje ogólne	47
1.2.2. Frezowanie głębokie	50
1.2.3. Zwiększenie wydajności obróbki poprzez podział całkowitego naddatku między poszczególnymi ostrzami	56
1.2.4. Wysokowydajna obróbka wykończeniowa	58
1.2.5. Zwiększenie wydajności obróbki poprzez dobór skutecznych ścieżek prze- jazdów narzędzia	59
ROZDZIAŁ 2. INTENSYFIKACJA PROCESÓW OBRÓBKİ SZLIFOWANIEM	69
2.1. Współczesne konstrukcje ściernic	70
2.2. Szlifowanie z dużymi prędkościami (HSG)	78
2.3. Szlifowanie zgrubne	78
2.4. Szlifowanie wysokowydajne (HPG)	80
ROZDZIAŁ 3. ROLA MEDIÓW TECHNOLOGICZNYCH W PROCESACH OBRÓBKİ MECHANICZNEJ	83
3.1. Znaczenie mediów technologicznych	83
3.2. Oddziaływanie mediów technologicznych	84
3.2.1. Efekt smarowania	84
3.2.2. Efekt chłodzenia	85
3.2.3. Oddziaływania tribochemiczne mediów technologicznych	87
3.2.4. Penetracja mediów technologicznych do powierzchni strefy styku	88
3.2.5. Efekty zmywania i płukania	93

3.3. Rodzaje mediów technologicznych	95
3.3.1. Media technologiczne gazowe i stałe	96
3.3.2. Media technologiczne ciekłe	98
3.4. Urządzenia i metody do doprowadzania mediów technologicznych do strefy obróbki	103
3.4.1. Informacje ogólne	103
3.4.2. Doprowadzanie smarów stałych	104
3.4.3. Doprowadzanie środków ciekłych	107
3.4.4. Doprowadzanie cieczy metodą wysokociśnieniową	122
3.4.5. Doprowadzanie środków gazowych	127
3.5. Współzależności między cechami mediów technologicznych a szczegółami procesu produkcyjnego	131
Podsumowanie	135
Literatura	137

WSTĘP

Od wielu lat zarówno w teorii, jak i w praktyce przemysłowej znane jest oznaczenie tzw. układu OUPN (Obrabiarka-Uchwyt-Przedmiot-Narzędzie), którego składowe decydują o przebiegu całego procesu produkcyjnego. Stąd też w sytuacji wystąpienia problemu podczas produkcji wyrobów w inżynierii mechanicznej odpowiedzi na jego źródło należy upatrywać w jednym lub kilku obszarach tego układu.

Ogólnie ujmując, na uczelniach technicznych zagadnienia związane z układem OUPN uznawane są za bardzo ważne, dlatego z ich uwzględnieniem od wielu lat układane są przedmioty na specjalnościach inżynierskich. Należy jednak zwrócić uwagę, że w ostatnich latach nastąpił przyspieszony rozwój technologii stosowanych w obróbce skrawaniem, który spowodował, że rozważania składowych układu OUPN mogą być niewystarczające. Efektem tego może być wyraźne wyhamowanie nowelizacji wiedzy studenckiej, ale także i doktoranckiej, skutkujące jej niedostosowaniem do dynamicznie zmieniających się wymagań współczesnego przemysłu. W rezultacie przyszli inżynierowie mogą nie być w pełni przygotowani do pracy z nowoczesnymi technologiami obróbki skrawaniem, co może ograniczać ich konkurencyjność na rynku pracy oraz zdolność do rozwiązywania problemów technicznych w realnych warunkach przemysłowych.

Trendy rozwoju obróbki mechanicznej jasno pokazują, że przemysł jest na ścieżce ciągłego rozwoju, wdrażania innowacji i adaptacji do stale rosnących wymagań rynkowych. Można wyróżnić pięć ważniejszych trendów kształtujących obecny przemysł i kreujących jego przyszłość, a mianowicie:

1. Rozwój maszyn CNC, które mogą wykonywać zadania z niezwykłą precyzją, powtarzalnością i w krótszym czasie niż kiedykolwiek wcześniej, co daje producentom nowe możliwości w zakresie projektowania i produkcji, a także umożliwia ograniczenie kosztów związanych z wytwarzaniem. Maszyny CNC stają się coraz bardziej samodzielne, zdolne do rozpoznawania i korygowania błędów produkcyjnych w czasie rzeczywistym, co jeszcze bardziej zwiększa efektywność i jakość obróbki mechanicznej.

2. Digitalizacja i integracja systemów produkcyjnych, które w dobie funkcjonowania Przemysłu 4.0 (ang. *Industry 4.0*) stają się coraz bardziej powszechne. Maszyny CNC są coraz częściej integrowane z systemami planowania i sterowania produkcją, co pozwala na lepszą koordynację pracy, monitorowanie jej postępów w czasie rzeczywistym i optymalizację procesów wytwarzania. Ta integracja umożliwi również szybko i skutecznie reagować na zmiany rynkowe i dostosowywać się do indywidualnych potrzeb klientów.
3. Zastosowanie technologii przyrostowych (ang. *Additive Manufacturing*, AM), które aktualnie rewolucjonizują obróbkę mechaniczną, umożliwiając kreowanie skomplikowanych geometrii, trudnych do wykonania tradycyjnymi metodami. AM pozwala na redukcję marnotrawstwa materiałów, skrócenie czasu produkcji i zwiększenie elastyczności projektowania. W połączeniu z obróbką mechaniczną technologie AM otwierają nowe możliwości inżynierom w projektowaniu i kształtowaniu wyrobów.
4. Zrównoważony rozwój i ekologiczne technologie, które wraz z rozwojem maszyn i procesów wytwarzania stały się istotnymi elementami współczesnego przemysłu. Rosnąca świadomość dotycząca ochrony środowiska i regulacje prawne sprawiły, że ważną częścią procesów produkcyjnych stało się ograniczenie negatywnego ich oddziaływania na środowisko przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej efektywności produkcyjnej. Innowacje, takie jak technologie odzyskiwania i recykling metali, minimalizacja odpadów oraz użycie coraz to bardziej ekologicznych środków chłodzących i smarujących, stają się coraz powszechniej rozpatrywane. Te kwestie, choć niezwykle wymagające, mogą istotnie przyczynić się do obniżenia kosztów produkcji.
5. Automatyzacja i robotyzacja produkcji, które stały się kluczowymi trendami w obróbce mechanicznej. Ich stosowanie zdecydowanie pozwala przedsiębiorstwom na zwiększenie wydajności, dokładności i powtarzalności produkcji przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów pracy. Roboty i systemy automatyczne są coraz częściej stosowane do obsługi maszyn CNC, transportu materiałów oraz wykonywania precyzyjnych operacji obróbkowych, co pozwala na realizację produkcji w trybie ciągłym.

Rozważając zatem kierunki przyszłości obróbki mechanicznej, można stwierdzić, że kształtują się one bardzo obiecująco. Stale wdrażane w przedsiębiorstwach produkcyjnych innowacyjne rozwiązania oraz ciągłe doskonalenie istniejących technologii, jak również rozwój sztucznej inteligencji (SI, ang. *Artificial Intelligence*, AI) i uczenie maszynowe (ang. *Machine Learning*, ML) pozwalają sądzić, że postęp w tych obszarach w najbliższych latach znacząco przyspieszy. Jednocześnie oznacza to, jak wcześniej wspomniano, że aktualnie nabywana przez inżynierów wiedza z zakresu składowych układu OUPN może być niewystarczająca i wymagać poważnego uzupełnienia. Dlatego też autorzy opracowali i opublikowali w 2024 r. podręcznik zatytułowany

Wybrane zagadnienia wysokowydajnej obróbki mechanicznej, w którym usystematyzowano aktualny stan wiedzy dotyczący składowych układu OUPN, a także rozpatrzono zagadnienia z obszaru automatyzacji pomiarów, gdyż te obszary tematyczne są ze sobą ściśle powiązane.

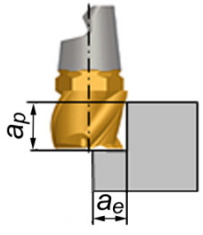


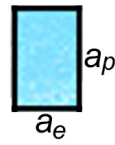
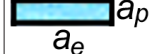

Jednocześnie, opierając się na przytoczonych powyżej trendach rozwoju obróbki mechanicznej, zaobserwowano pewne luki występujące w kartach przedmiotów w kwestiach związanych ze współczesnymi technologiami, jak również w obszarach gwarantujących zapewnienie wymagań ekologicznych w procesach produkcyjnych, które to w zastosowaniu przemysłowym zapewniają wysoką wydajność oraz jakość produkowanych wyrobów. Tak więc, w kontekście przytoczonych obszarów kształtujących i rozwijających efektywność współczesnego przemysłu, główny nacisk dydaktyczny powinien zostać skierowany na rozwój maszyn CNC, narzędzi skrawających i zagadnień ekologicznych, które w ostatnich latach uległy znaczącemu rozwojowi zarówno pod względem stanu wiedzy, jak i rozwiązań praktycznych.

Tym właśnie zagadnieniom autorzy poświęcają niniejszy podręcznik.

INTENSYFIKACJA PROCESÓW OBRÓBKII SKRAWANIEM

Rozwój procesów obróbki skrawaniem ma na celu poprawę wydajności produkcji, jakości wyrobów oraz redukcję kosztów wytwarzania. Aby osiągnąć te cele, prowadzi się szeroko zakrojone badania wysokowydajnej obróbki skrawaniem obejmujące eksperymenty, modelowanie analityczne oraz symulacje komputerowe. Na ich podstawie z końcem XX i od początku XXI w. opracowano wiele nowych technologicznych metod obróbki, które spełniają dwa główne wymagania, tj. maksymalną wydajność i maksymalną jakość. Dla przykładu cechy współczesnych technologii frezowania przedstawiono w tab. 1.1.

Tabela 1.1. Analiza porównawcza współczesnych technologii frezowania (na podstawie materiałów firmy „Seco Tools”)

Schemat i podstawowe cechy	Frezowanie tradycyjne	Frezowanie HSC	Frezowanie HPC	Frezowanie z dużymi posuwami HFC	Frezowanie wysokodoładne
	$a_e \sim D$ $a_p \sim 0,4D$ 	$a_e < D$ $a_p \sim D$ 	$a_e \sim D$ $a_p \sim D$ 		$a_e < D$ $a_p < D$ 
Posuw v_f , m/min	♦♦	♦♦♦♦	♦♦♦♦	♦♦♦♦♦	♦♦
Prędkość obrotowa n , obr/min	♦♦	♦♦♦♦♦	♦♦♦	♦♦♦	♦♦ ♦♦
Prędkość skrawania v_c , m/min	♦♦	♦♦♦♦♦	♦♦♦	♦♦♦	♦♦
Wydajność W , mm ³ /min	♦♦	♦♦♦	♦♦♦♦♦	♦♦♦♦	♦
Siła F_c , N Moc \dot{P} , kW	♦♦ ♦♦	♦ ♦♦	♦♦♦♦ ♦♦ ♦♦	♦♦♦ ♦♦	♦ ♦
Wskaźniki stanu warstwy wierzchniej	♦♦	♦♦♦♦♦	♦♦♦	♦♦	♦♦♦♦♦

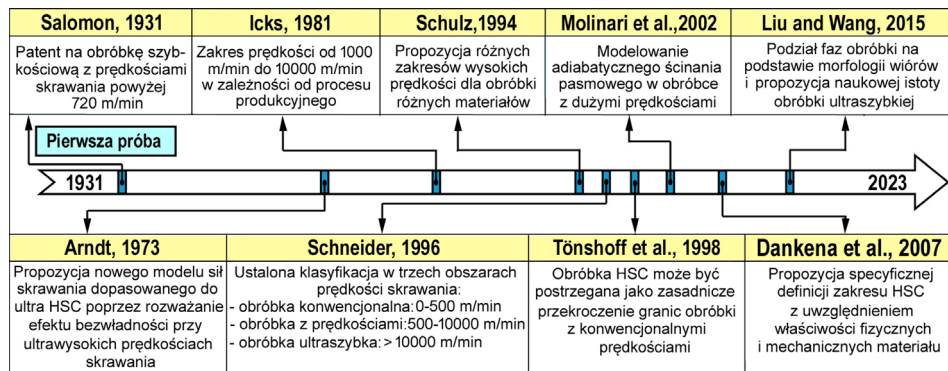
Liczba symboli: ♦ oznacza znaczenie cechy w rozpatrywanej technologii, D – średnica frezu, a_e – szerokość frezowania, a_p – głębokość frezowania.

1.1. Obróbka z dużymi prędkościami (HSC)

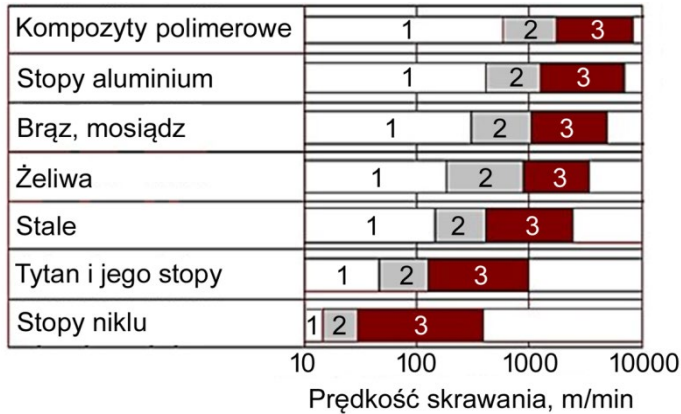
1.1.1. Informacje ogólne

Skrawanie z dużymi prędkościami (ang. *High Speed Cutting*, HSC) od wielu lat należy do wiodących trendów w rozwoju obróbki ubytkowej, ponieważ po raz pierwszy zaobserwowano je na początku lat 30. XX w. Były to badania raczej wizjonerskie, ponieważ nie istniały wówczas niezbędne do realizacji HSC warunki technologiczne oraz ekonomiczne. Po zakończeniu II wojny światowej ówczesne mocarstwa podjęły badania w obszarze HSC, które dotyczyły obróbki stopów lekkich i stopów tytanu, stosowanych w branżach lotniczej i kosmicznej. Prace te dotyczyły fizycznego modelowania procesu, ponieważ wymagane prędkości osiągnąć można wskutek zrzutu próbki lub ostrza z dużej wysokości. Stosowano wówczas również mikroładunki materiałów wybuchowych, a w nielicznych publikacjach metodę taką określano jako skrawanie balistyczne. Dopiero w latach 80. po opracowaniu właściwych konstrukcji obrabiarek CNC przystąpiono do realizacji badań tego procesu w ujęciu tradycyjnym. Warto w tym miejscu nadmienić, że zdefiniowanie obróbki z dużymi prędkościami okazało się dość trudne, ponieważ może ona dotyczyć jednej z wielu operacji lub ich kombinacji. W przeszłości definiowano ją jako obróbkę z dużą prędkością skrawania, obróbkę z dużą prędkością obrotową wrzeczona, obróbkę z dużym posuwem lub także obróbkę z dużą szybkością usuwania materiału. Ostatnio wszystkie te odmiany połączono w jedną, najczęściej używaną, a mianowicie HSC.

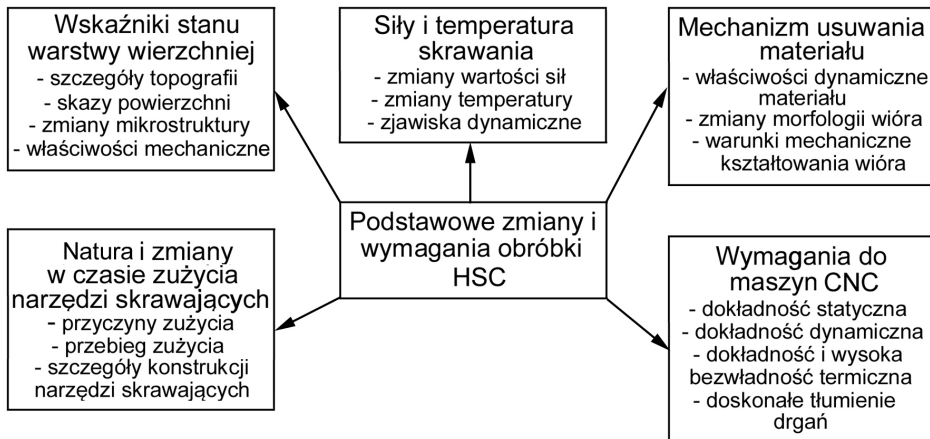
W chwili obecnej rozpatrzono i usystematyzowano wszystkie podstawowe cechy obróbki HSC, aczkolwiek nie odbywało się to jednorazowo, o czym świadczą kolejne lata jej rozwoju pokazane na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Rozwój badań procesu HSC (na podstawie [1])



Rys. 1.2. Zakresy konwencjonalnego (1), przejściowego (2) i ultraszybkiego (3) skrawania typowych materiałów konstrukcyjnych (na podstawie [3, 4])



Rys. 1.3. Podstawowe zmiany i wymagania obróbki HSC (na podstawie [1])

Za znaczące osiągnięcie w badaniach procesu HSC można uznać propozycję C. Schulza o podziale procesów obróbkowych na trzy grupy: konwencjonalną, przejściową z prędkościami 500-10 000 m/min oraz ultraszybka z prędkościami ponad 10 000 m/min (rys. 1.2). Ze względu na niską stabilność procesu uznaje się, że za bardzo duże prędkości skrawania przyjmuje się takie, w których prędkości obrotowe wrzeciona przekraczają wartości 60 000 obr/min [2].

Na podstawie wieloletnich prac badawczych ustalono, że skutek bardzo wysokich prędkości, z jakimi zachodzą procesy fizyczne w strefie skrawania, szczegóły tych procesów w znacznym stopniu różnią się w porównaniu z warunkami konwencjonalnymi.

Niektóre obszary zachodzących zmian i wymagania względem obróbki HSC przedstawiono na rys. 1.3.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono podstawowe informacje dotyczące obróbki HSC, a także porównanie w stosunku do obróbki konwencjonalnej. Zdecydowaną ich większość można rozszerzyć także na obróbkę wysokowydajną.

1.1.2. Przebieg procesu deformacji plastycznej i wytwarzania wióra

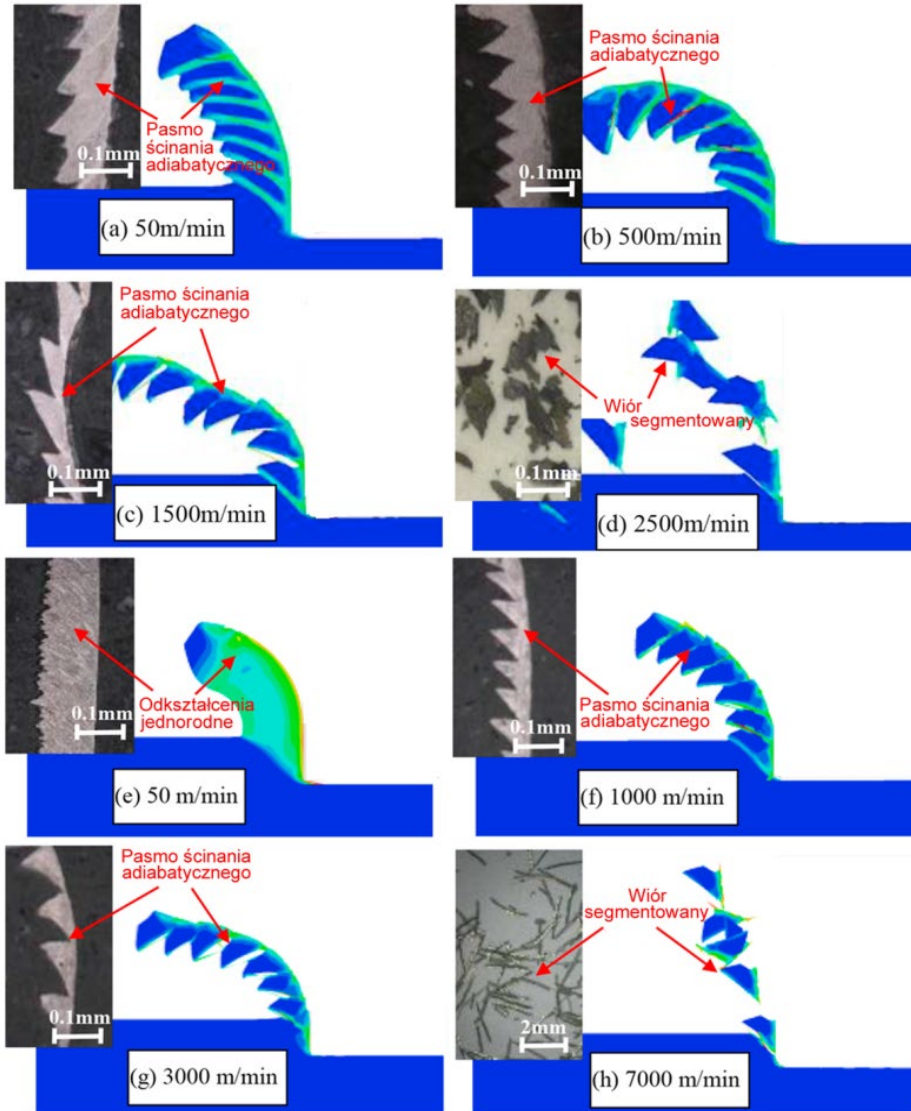
Wyniki ostatnich badań eksperymentalnych, modelowania analitycznego i symulacji komputerowych wykazały, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania morfologia wiórów zmienia się z ciągłej na ząbkowaną, a następnie na segmentowaną (piłokształtną). Z punktu widzenia wielu aspektów przemysłowych, takich jak jakość powierzchni obrabianej, szybkość usuwania materiału, odprowadzanie wiórów i automatyzacja procesu obróbki, ząbkowane i segmentowane wióry są zdecydowanie bardziej korzystne od wiórów ciągłych.

Wyniki symulacji eksperymentalnych i numerycznych procesu kształtowania wiórów podczas HSC stopu Ti6Al4V [5] i Inconel 718 [6] przedstawiono na rys. 1.4. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania morfologia wióra Ti6Al4V, jak i Inconel 718 ewoluuje od ciągłej do ząbkowanej, a następnie do segmentowanej. Szybkość zmiany morfologii wióra zależy od obrabianego materiału, a teorie ścinania adiabatycznego (PA)¹ i okresowego pęknięcia wyjaśniają mechanizm powstawania wiórów ząbkowanych, a następnie segmentowanych. Obserwacja i dokładna charakteryzacja mikrostruktur wiórów pozwala na szczegółowy wgląd w proces tworzenia się wióra, jak również w mechanizm usuwania materiału podczas obróbki HSC. Opierając się na różnych mikrostrukturach podczas tworzenia ząbkowanych wiórów, zidentyfikowano dwa rodzaje pasm ścinania adiabatycznego. A więc odkształcone pasma są generowane przez intensywne ścinanie plastyczne, podczas gdy przekształcone pasma są wytwarzane w procesie rekrytalizacji.

Ponadto w wyniku badań ustalono, że granica plastyczności materiałów zależy od ich submikrostruktury, w tym gęstości dyslokacji i średniego rozmiaru ziaren, a także od wpływu oporu ruchu dyslokacji, dynamicznej regeneracji i dynamicznej rekrytalizacji. Ultradrobne ziarna rozmieszczone w strefach PA ząbkowanych wiórów są charakterystyczne zarówno dla tytanu i jego stopów, jak i dla stopu niklu (rys. 1.5).

Zmiany strukturalno-fazowe są istotnym wskaźnikiem integralności warstwy wierzchniej, a także definiują jej właściwości i zmiany podczas pracy. W wyniku silnych odkształceń plastycznych podczas obróbki skrawaniem formowane są ultradrobne ziarna. Większe odkształcenia plastyczne i zwiększona prędkość odkształceń pla-

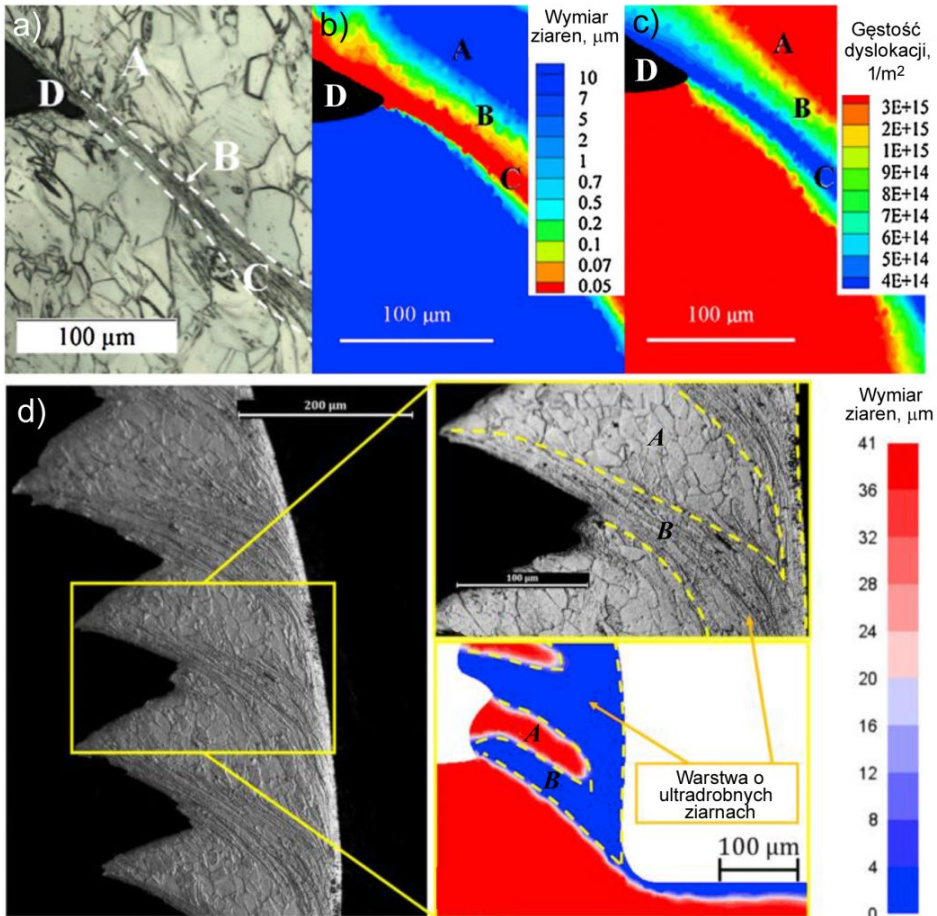
¹ Proces adiabatyczny (PA) – proces termodynamiczny przebiegający bez wymiany ciepła z otoczeniem [7].



Rys. 1.4. Modelowanie MES procesów kształtowania wiórów podczas obróbki HSC stopu Ti6Al4V (a-d) oraz Inconelu 718 (e-h) (na podstawie [1])

stycznych podczas obróbki HSC zapewniają bardziej korzystne warunki do tworzenia się ultradrobnych ziaren w strefie obróbki.

Podczas obróbki HSC na obrabianej powierzchni stopów na bazie niklu i stali hartowanych wytwarza się zmodyfikowana biała warstwa. Warstwa ta jest szkodliwa dla



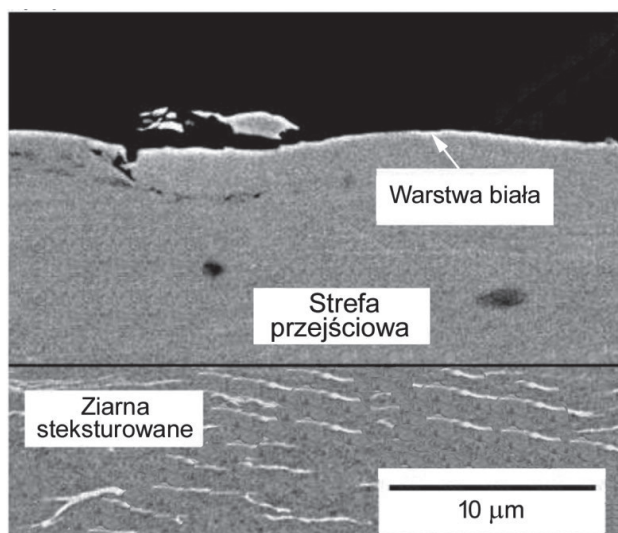
Rys. 1.5. Analiza mikrostruktury wiórów czystego tytanu po obróbce z prędkością skrawania 100 m/min (na podstawie [1]): zgląd (a), symulacje komputerowe zmian wielkości ziaren (b) i gęstości dyslokacji (c), modelowane i doświadczalne zglądy zmian mikrostruktury w ząbkowanym wiórze stopu niklu podczas obróbki z prędkością skrawania 70 m/min (d); oznaczenia A, B, C, D – obszary obliczeń numerycznych

żywności części maszyn. Wyeliminowanie jej powstawania za pomocą doboru właściwych parametrów skrawania zapewnia poprawę właściwości użytkowych obrobionych powierzchni. Biała warstwa może nie być ciągła, aczkolwiek niekorzystne warunki skrawania lub poważne zużycie narzędzia mogą doprowadzić do powstawania ciągłej i grubej białej warstwy.

Zmiany strukturalno-fazowe są istotnym wskaźnikiem integralności warstwy wierzchniej, a także definiują jej właściwości i efektywność podczas pracy. W wyniku

silnych odkształceń plastycznych podczas obróbki skrawaniem formowane są ultradrobne ziarna. Większe odkształcenia plastyczne i zwiększona prędkość odkształceń plastycznych podczas obróbki HSC zapewniają bardziej korzystne warunki do tworzenia się ultradrobnych ziaren w strefie obróbki.

Na podstawie obserwacji przy zastosowaniu większych powiększeń wykazano, że wraz ze wzrostem odległości od obrabianej powierzchni średni rozmiar ziarna w obszarze przejściowym między białą warstwą a steksturowanymi ziarnami wzrasta do około 200 nm, natomiast w obszarze steksturowanych ziaren do około 500 nm (rys. 1.6). Poza tym, jak w przypadku tworzenia się PSA w ząbkowanych wiórach, lokalizacja ścinania adiabatycznego została uznana za dominujący czynnik tworzenia się białej warstwy podczas obróbki różnych materiałów konstrukcyjnych.



Rys. 1.6. Obszary warstwy białej, strefy przejściowej i steksturowanych ziaren w warstwie wierzchniej powierzchni stopu tytanu obrabionego metodą HSC z prędkością 300 m/min (na podstawie [8])

Duża energia odkształceń plastycznych i duża ich prędkość w połączeniu z wysokimi temperaturami skrawania są w stanie wywołać zlokalizowane odkształcenia ścinające w warstwie wierzchniej. W konsekwencji następuje rozdrobnienie ziaren w celu dostosowania się do silnych lokalnych odkształceń plastycznych, co prowadzi do formowania mikrostruktur nanokrystalicznych w warstwie białej. Wyniki badań wykazały, że warstwa ta składa się ze stopniowanej mikrostruktury, która obejmuje dynamiczną warstwę rekrytalizacyjną utworzoną przez nanokrystaliczne ziarna i dynamiczną warstwę regeneracyjną utworzoną przez mikrostruktury subziarniste. Stwierdzono, że biała

warstwa ma mniejszą wytrzymałość i większą ciągliwość w porównaniu z materiałem warstwy wierzchniej. Wskutek tego tworzenie białej warstwy osłabia właściwości mechaniczne obrobionej powierzchni, zatem jej występowania w procesach obróbki skrawaniem należy unikać. Pomiędzy białą warstwą a materiałem przedmiotu znajduje się strefa przejściowa z umiarkowanymi odkształceniami plastycznymi. Odpowiedni dobór parametrów skrawania może zapewnić minimalizację tworzenia się białej warstwy.

Przemiany fazowe także są ważnymi czynnikami wpływającymi na zmiany zachodzące w materiale. Ze względu na krótki czas wzajemnego oddziaływania między narzędziem skrawającym a obrabianym przedmiotem w warunkach HSC przemiany fazowe zachodzące w warstwie wierzchniej mają inne cechy charakterystyczne w porównaniu z konwencjonalnymi procesami obróbki cieplnej i formowania na gorąco.

1.1.3. Siły i moc skrawania

W zakresie HSC zmiękczenie termiczne materiału jest korzystne dla osłabienia odporności na odkształcenia materiału i powoduje mniejsze odkształcenia plastyczne wióra, co następnie zmniejsza siłę skrawania. Gdy prędkość skrawania wzrasta do zakresu ultra-HSC, kruche pękanie materiału również pomaga utrzymać siłę skrawania na niskim poziomie. Zależność siły skrawania F_c i siły posuwowej F_f od prędkości skrawania przedstawiono na rys. 1.7. Zarówno F_c , jak i F_f maleją wraz ze wzrostem prędkości skrawania i zachowują się jako asymptotycznie² stałe po przekroczeniu pewnej prędkości granicznej, oddzielającej zakres HSC od zakresu konwencjonalnego.

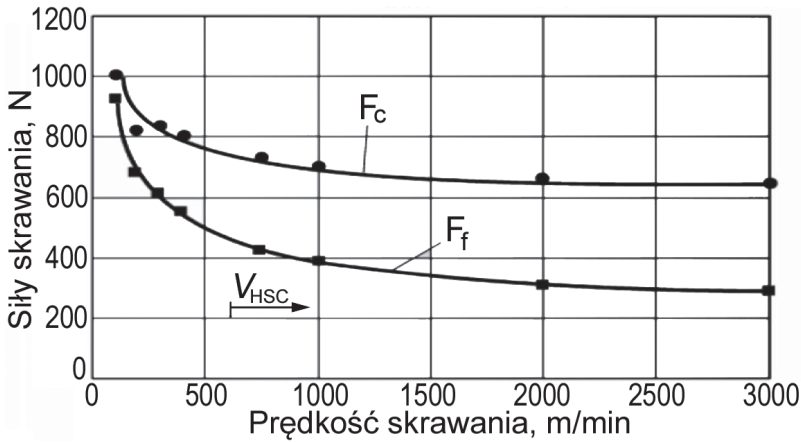
Istnieją pewne zależności występujące między siłą skrawania a prędkością skrawania, które można opisać równaniem [10]:

$$F_c(v_c) = F_{c\infty} + F_{c\text{var}} e^{-(2v_c/v_{HSC})},$$

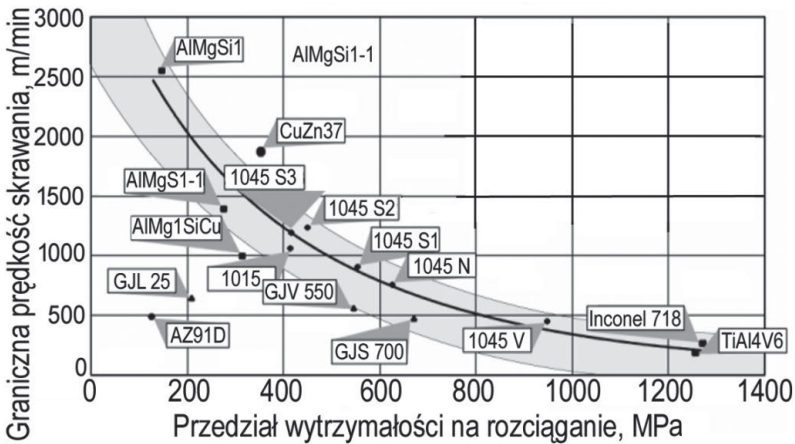
gdzie: siłę skrawania można podzielić na dwa składniki: $F_{c\infty}$ niezależny od prędkości skrawania i składnik zmienny $F_{c\text{var}} e^{-(2v_c/v_{HSC})}$ zależny od prędkości skrawania.

Ponadto graniczna prędkość skrawania jest uzależniona od wytrzymałości na rozciąganie $Rm_{v_{HSC}} = 56e^{-(Rm/400)}$ obrabianego materiału. Zależności wpływu wytrzymałości materiału na graniczną prędkość skrawania podczas HSC dla różnych materiałów pokazano na rys. 1.8. Można zaobserwować, że wartości granicznej prędkości skrawania są zbliżone do wartości uzyskanych podczas tworzenia się ząbkowanych wiórów (zob. rys. 1.4).

² Asymptota – prosta, której odległość od danej krzywej nieograniczenie maleje w miarę posuwania się po tej prostej [9].



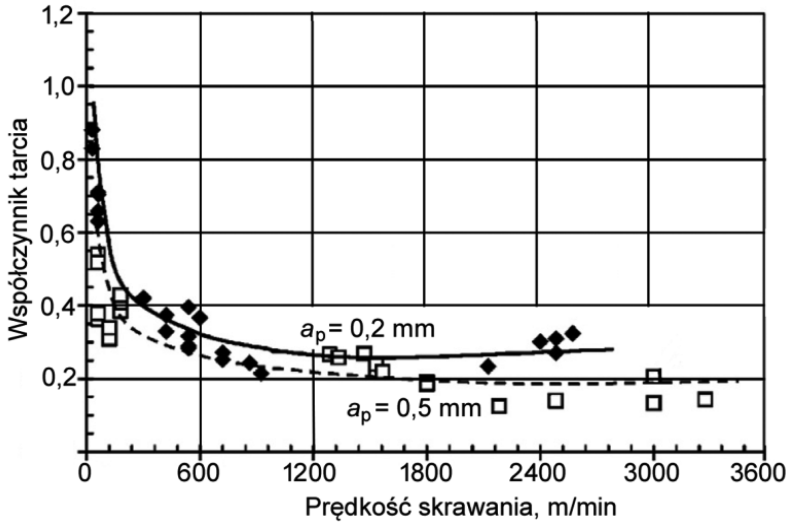
Rys. 1.7. Wpływ prędkości skrawania na składowe siły skrawania (na podstawie [10])



Rys. 1.8. Zależność wpływu wytrzymałości materiału na graniczną prędkość skrawania podczas HSC dla różnych materiałów (na podstawie [10])

Podobne zmiany przy obróbce w warunkach HSC zarejestrowano dla wartości współczynnika tarcia na styku narzędzie-wiór dla prędkości skrawania i różnych głębokości skrawania (rys. 1.9).

Należy zwrócić uwagę, że podane wyżej zależności nie uwzględniają wpływu innych parametrów skrawania, takich jak posuw, głębokość skrawania, a także kątów narzędzia skrawającego. Niemniej jednak stwierdzono, że siła skrawania wzrasta dla



Rys. 1.9. Zmiany współczynnika tarcia na styku narzędzie-wiór dla szerokiego zakresu prędkości skrawania i różnych głębokości skrawania z zakresu HSC (na podstawie [11])

dużych prędkości skrawania po osiągnięciu lokalnego minimum, a przyczyną takiego zachowania są siły bezwładności zauważalne w warunkach HSC.

W konwencjonalnych warunkach skrawania siły te są całkowicie nieistotne, natomiast w warunkach HSC są one większe o 30-50% wartości F_c . Do obliczenia sił bezwładności można wykorzystać wzór zaproponowany przez M. Kronenberga:

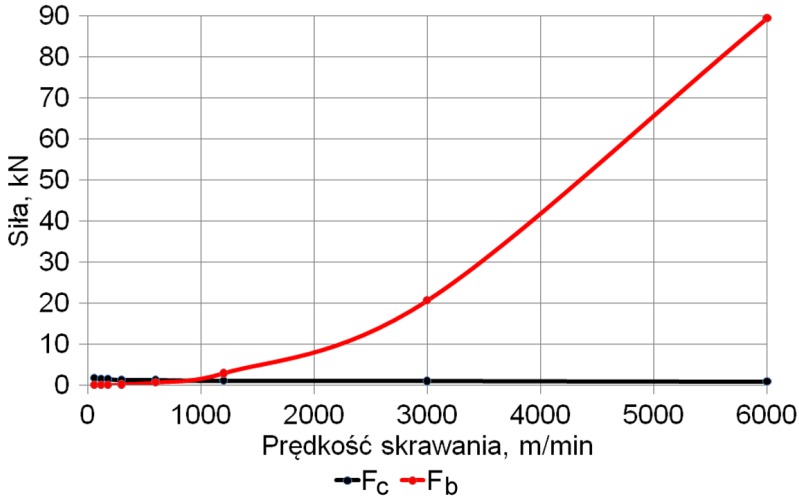
$$F_b = \frac{\rho v^2 h_D b_D \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)} = \frac{\rho v^2 f a_p \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)},$$

gdzie: ρ – gęstość materiału obrabianego; v – prędkość skrawania; h_D , b_D – grubość i szerokość warstwy skrawanej; f – posuw, a_p – głębokość skrawania; γ – kąt natarcia; Φ – kąt ścinania.

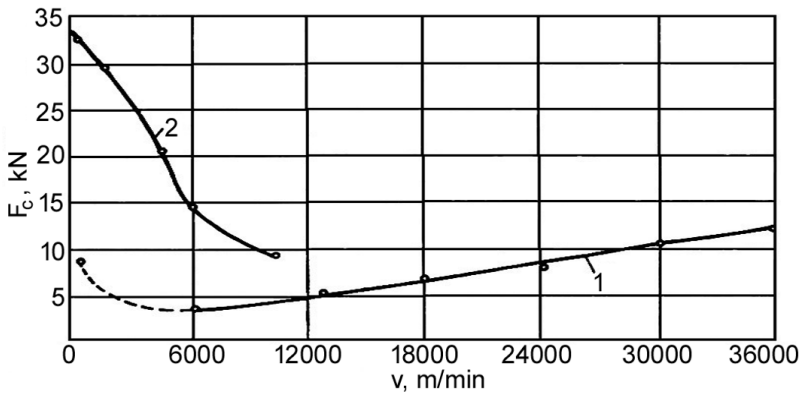
Zmiany wartości siły skrawania i siły bezwładności przy toczeniu stali stopowej obliczone na podstawie powyższego wzoru przedstawiono na rys. 1.10.

Analiza zależności siły skrawania od prędkości skrawania podczas obróbki materiałów o różnych wartościach wytrzymałości (rys. 1.11) potwierdza, że przy obróbce HSC materiałów bardziej wytrzymałych wartości siły skrawania zwiększają się w miarę wzrostu prędkości skrawania.

Energia potrzebna do realizacji procesu skrawania jest uwarunkowana poziomem oporów właściwych skrawania. Opory te maleją wraz ze wzrostem prędkości skrawa-

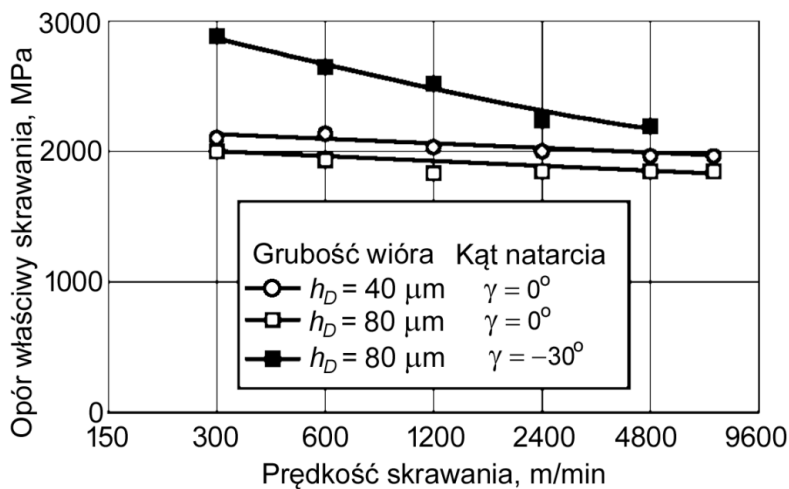


Rys. 1.10. Zależności siły skrawania F_c i siły bezwładności F_b od prędkości skrawania

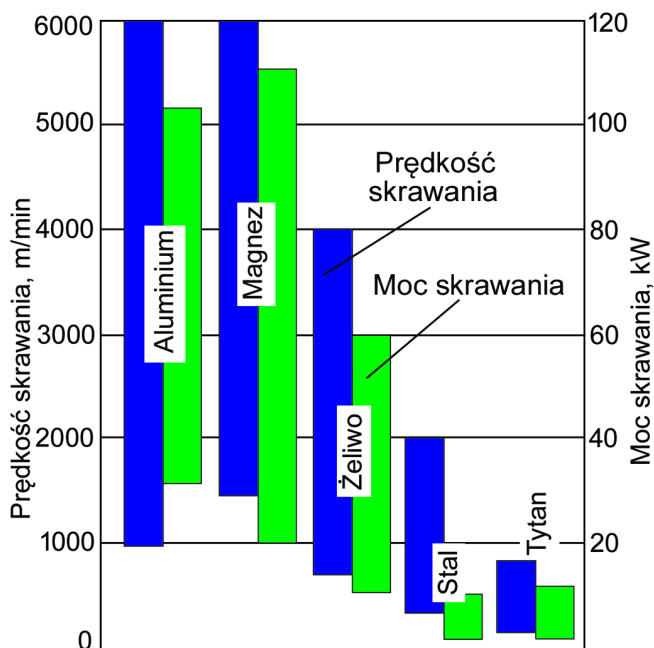


Rys. 1.11. Zależność siły skrawania od prędkości skrawania podczas obróbki HSC:
1 – aluminium, 2 – stali C45

nia (rys. 1.12), choć generalnie ich poziom jest niższy w porównaniu ze skrawaniem konwencjonalnym (dla stopu Ti6Al4V według różnych źródeł mieszczą się w zakresie 1400-1700 MPa). Minimalne wartości sił skrawania niezależnie od grubości wióra i kąta natarcia obserwuje się przy maksymalnych posuwach i prędkościach skrawania, co również potwierdza efekt zwiększenia kruchości obrabianego materiału w warunkach HSC.



Rys. 1.12. Opór właściwy skrawania w zależności od prędkości skrawania przy obróbce HSC stopu tytanu Ti6Al4V (na podstawie [12])

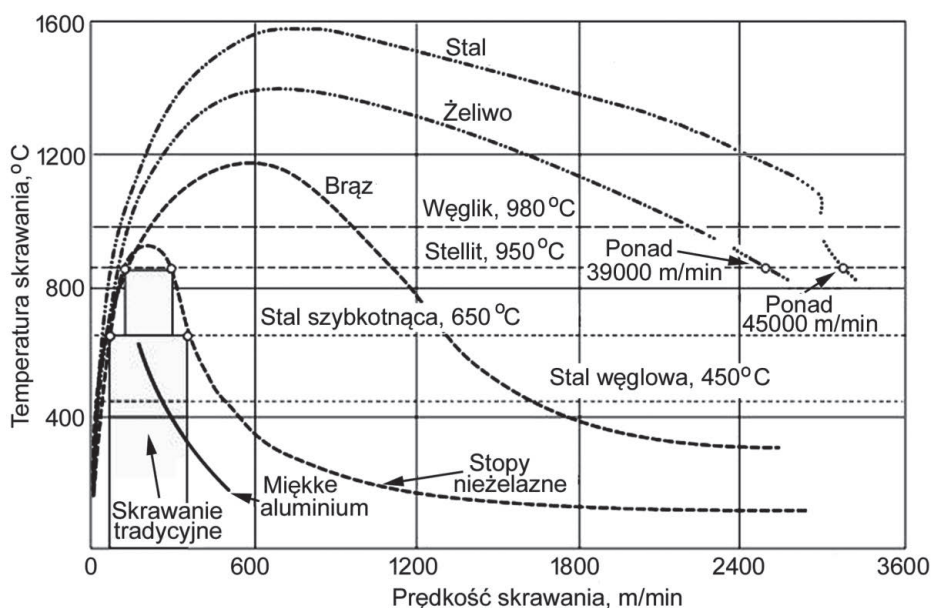


Rys. 1.13. Zmiany mocy i prędkości skrawania dla różnych grup materiałów konstrukcyjnych

Obliczenia pokazały, że przyrost energii spowodowany siłami bezwładności wynosi około 10% całkowitej energii skrawania przy prędkości 10 000 m/min i jest praktycznie równy wartości energii całkowitej przy 30 000 m/min. Zakresy zmian mocy skrawania różnych grup materiałów konstrukcyjnych przy różnych prędkościach skrawania pokazano na rys. 1.13.

1.1.4. Wymiana ciepła

Kwestie wymiany ciepła w warunkach HSC są kluczowe dla realizacji procesu obróbki, ponieważ decydują zarówno o warunkach pracy narzędzi skrawających, jak i o stanie warstwy wierzchniej (jej umocnieniu i topografii powierzchni). Jeszcze w latach 30. XX w. Carl Solomon wysunął tezę, że „Przy pewnej prędkości skrawania, która jest od pięciu do dziesięciu razy większa, niż w przypadku obróbki konwencjonalnej, temperatura usuwania wiórów na krawędzi skrawającej zacznie spadać”. Tezę tę z powodzeniem można uznać za właściwą, co potwierdzono na wykresie zależności temperatury od prędkości skrawania dla różnych grup materiałów konstrukcyjnych (rys. 1.14).



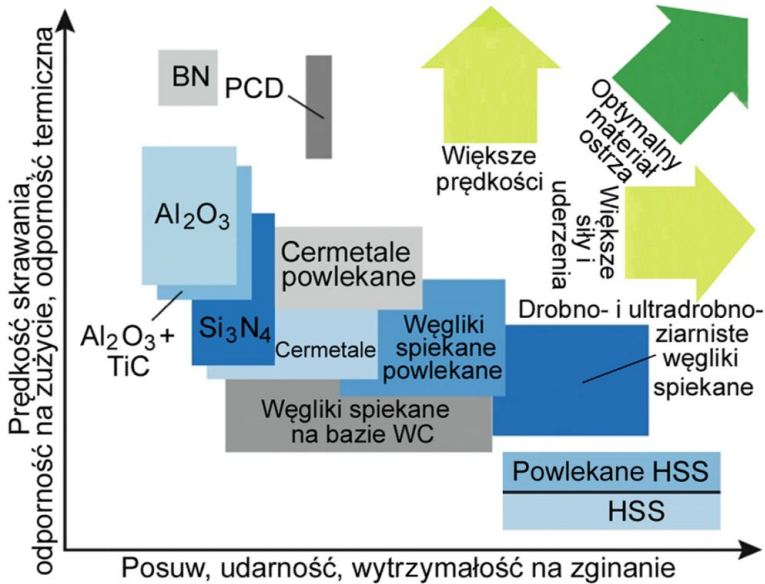
Rys. 1.14. Zmiany temperatury skrawania w zależności od prędkości skrawania dla różnych grup materiałów konstrukcyjnych [13]

Analizując przedstawione zależności, można wyróżnić trzy obszary skrawania: konwencjonalne, przejściowe i z HSC. Przy obróbce konwencjonalnej prędkość skrawania jest mniejsza niż zakres przejściowy, natomiast temperatura skrawania wzrasta wraz ze wzrostem prędkości. Chociaż temperatura skrawania w warunkach konwencjonalnych nie jest zbyt wysoka, to nie jest ona zalecana ze względu na małą wydajność procesu. Z kolei przejściowy obszar skrawania nie nadaje się do zastosowania ze względu na wysoką temperaturę skrawania, która może powodować poważne zużycie narzędzia i pogorszenie dokładności obróbki. Gdy prędkość skrawania przekroczy wartość przejściową, temperatura skrawania spada wraz ze wzrostem prędkości. Takie warunki są pożądane, ponieważ zapewniają zarówno wysoką wydajność, jak i niskie temperatury, aczkolwiek ich zapewnienie jest zadaniem wielokryterialnym. Poza prędkością skrawania powinno uwzględniać się jednocześnie wpływ zmian posuwu i głębokości skrawania, materiału i geometrii ostrza skrawającego, możliwość obróbki cyklicznej (np. frezowania) itp.

1.1.5. Zużycie i eksploatacja narzędzi skrawających

W porównaniu z konwencjonalnymi prędkościami skrawania i posuwami przy wyższych ich wartościach narzędzie jest narażone na znacznie większe obciążenia termiczne i oddziaływania sił tarcia. Twardość narzędzia oraz stabilność chemiczna podłoża i powłoki, a także udarność w podwyższonych temperaturach odgrywają ważną rolę. Właściwości materiałów narzędziowych ze względu na współzależności dotyczące z jednej strony prędkości skrawania, odporności na zużycie i odporności termicznej, z drugiej zaś posuwu, wytrzymałości zmęczeniowej i wytrzymałości na zginanie pokazano na rys. 1.15. Na jego podstawie można stwierdzić, że głównymi ograniczeniami podczas pracy w warunkach dużych prędkości skrawania i wysokich obciążeń są materiały stosowane na ostrza skrawające.

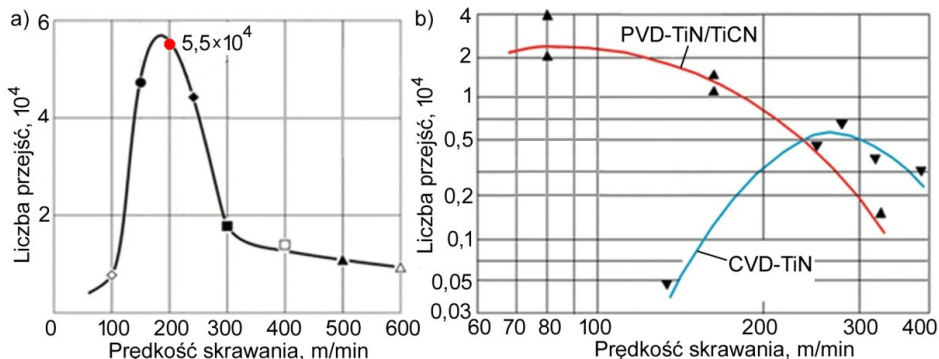
Narzędzia z węglików spiekanych są szeroko wykorzystywane w technologiach HSC i HPC (ang. *High Performance Cutting*), zwłaszcza w przypadku zastosowania materiałów drobnoziarnistych o wielkości ziaren nawet poniżej 1 μm . W przypadku większych prędkości możliwe jest stosowanie wielowarstwowych i diamentowych powłok lub bardzo twardych materiałów, takich jak PCBN, Si_3N_4 itp. Trzeba jednak zwrócić uwagę na mniejszą wytrzymałość tych materiałów oraz ich ewentualne powinowactwo chemiczne z materiałami obrabianymi. Współcześnie stosowane powłoki wielowarstwowe na bazie azotków, węglików i tlenków mogą zapewnić znacznie wyższe prędkości skrawania także w warunkach obróbki udarowej, co potwierdza m.in. doświadczenie firmy „Oerlikon Balzers Coating”.



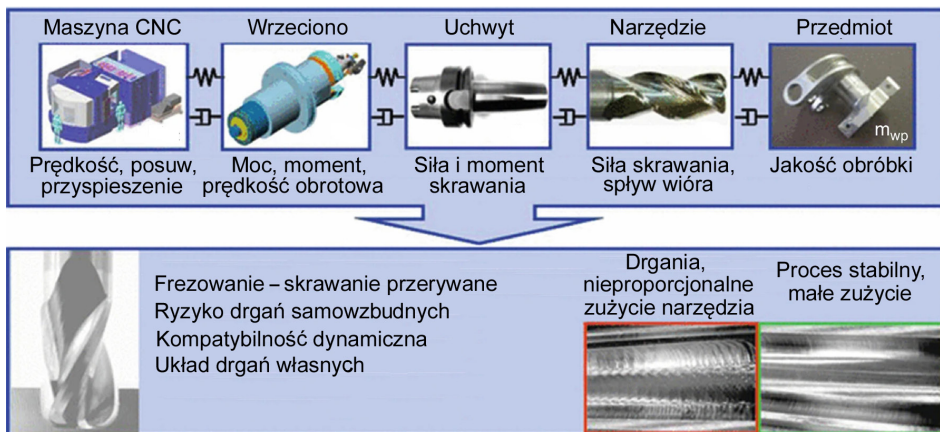
Rys. 1.15. Współzależności prędkości skrawania, odporności na zużycie i odporności termicznej względem posuwu, wytrzymałości zmęczeniowej i wytrzymałości na zginanie materiałów stosowanych na ostrza skrawające (na podstawie [13])

Trzeba jednak zwrócić uwagę, że zastosowanie wyższych prędkości skrawania jest ograniczone nie tylko przez materiał narzędzia, zużycie i trwałość narzędzia, ale także przez liczbę przejść obróbki. Na przykład podczas frezowania stali 42CrMo4V z prędkościami do 600 m/min płytkami z węglika spiekanego z powłoką TiAlN najwyższą efektywność obróbki, około 55 000 przejść, osiągnięto przy prędkości skrawania 200 m/min i zużyciu narzędzia $\sim 0,2$ mm (rys. 1.16 a). W warunkach toczenia przerywanego (rys. 1.16 b) powłoka PVD wykazała znacznie lepszą udarność, ale przy niższej prędkości skrawania wynoszącej zaledwie 100 m/min. Powłoka CVD może być stosowana przy prawie trzykrotnie wyższych prędkościach skrawania, ale znacznie mniejszej liczbie pojedynczych przejść.

W obróbce HSC i HPC istotne znaczenie ma również konstrukcja płytki wymiennej, korpusu narzędzia, a także konstrukcja różnych elementów mocujących, ponieważ złamanie płytki lub narzędzia może doprowadzić do uszkodzenia przedmiotu obrabianego, wrzeczona maszyny CNC lub innych części systemu obróbkowego. Zatem zdolność procesu do zachowania stabilności i eliminacji drgań jest głównym czynnikiem zwiększającym jego wydajność i zapewniającym wysoką jakość powierzchni obrabianej (rys. 1.17).



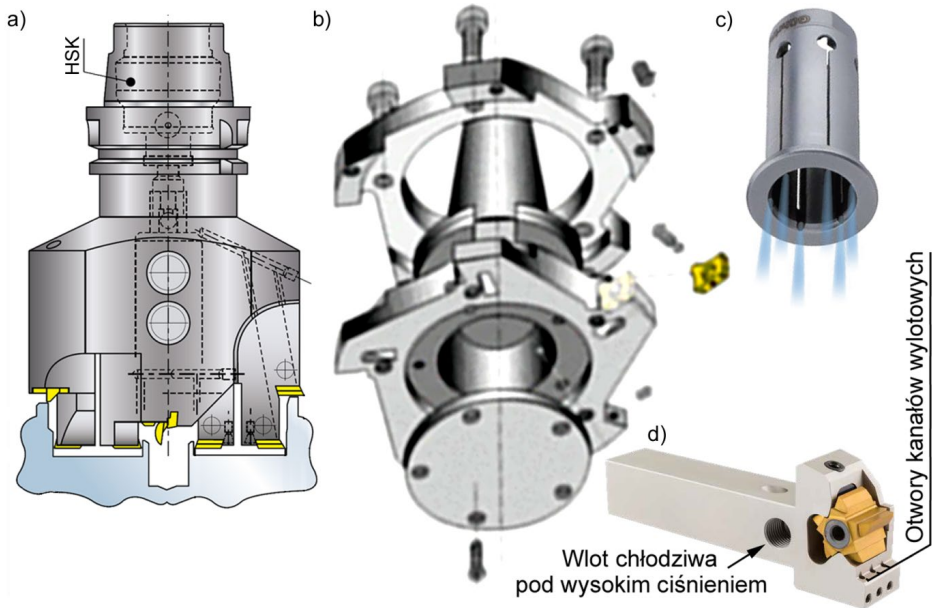
Rys. 1.16. Wpływ prędkości skrawania i rodzaju powłoki przeciwzużyciowej na liczbę przejść narzędzia skrawającego (na podstawie [14])



Rys. 1.17. Czynniki wpływające na dynamikę elementów składowych układu OUPN podczas obróbki HSC i HPC (na podstawie [15])

Warunki obróbki, w szczególności prędkość skrawania i wydajność procesu, zależą w dużym stopniu od właściwości materiału przedmiotu. Na przykład podczas frezowania stopów tytanu ich wysoka wytrzymałość w podwyższonych temperaturach, niski moduł sprężystości i niska przewodność cieplna generują duże siły skrawania i termomechaniczne obciążenia narzędzia, a także wpływają na intensywność adhezyjnego zużycia narzędzia skrawającego. W wyniku tych czynników wydajność obróbki stopu tytanu w porównaniu z obróbką aluminium zmniejsza się ponad 25 razy.

Znaczny wzrost wydajności narzędzia skrawającego można osiągnąć poprzez odpowiednie dostosowanie geometrii ostrza i szczegółów realizacji HSC i HPC, w tym także poprzez doprowadzanie chłodziwa kanałami wewnętrznymi przechodzącymi przez narzędzie (rys. 1.18). To zagadnienie bardziej szczegółowo rozpatrzono w rozdz. 3.



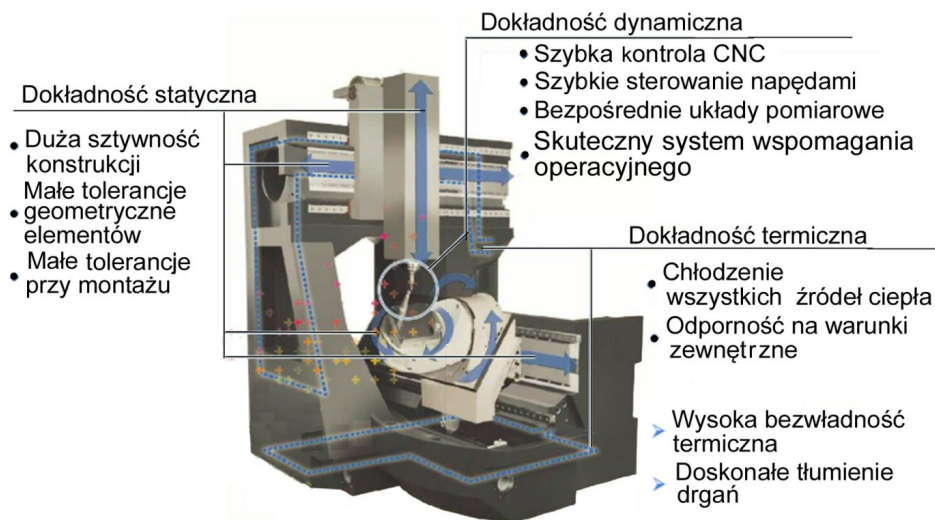
Rys. 1.18. Narzędzia z doprowadzaniem chłodziwa przez kanały wewnętrzne: a) głowica wielonarzędziowa firmy „Gühring”, b) frez czołowy firmy „Gühring”, c) tuleja do mocowania gwintowników firmy „Gühring”, d) nóż do kształtowania bieżni łożyska firmy „Iscar”

1.1.6. Podstawowe wymagania względem maszyn i szczegóły ich konstrukcji

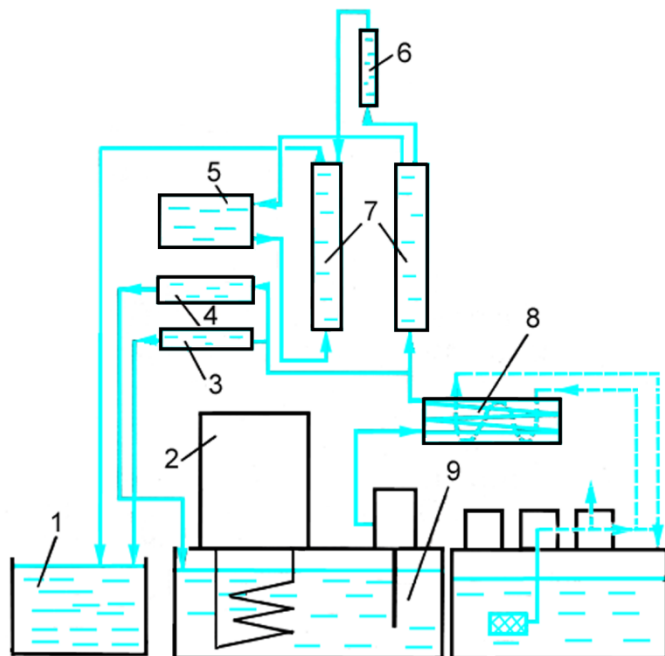
Cechy konstrukcyjne maszyn CNC poważnie różnią się od tych stosowanych przy konstrukcjach obrabiarek konwencjonalnych. Do tych cech zaliczają się przede wszystkim ich dokładność statyczna, dynamiczna i termiczna itd. Szczegóły pokazano na rys. 1.19.

Dokładność statyczną można zapewnić przy zastosowaniu dużej sztywności konstrukcji. W tym celu stosowane są specjalne materiały kompozytowe, m.in. struktury komórkowe, wytwarzane na podstawie technologii drukowania 3D. Kolejną możliwością zwiększenia dokładności statycznej jest zmniejszenie luzów w miejscach styku współpracujących powierzchni, co można zapewnić poprzez zmniejszenie tolerancji geometrycznych elementów, jak i zmniejszenie tolerancji wymaganych do montażu maszyny CNC.

Dokładność dynamiczna może być również zapewniona przez zwiększenie szybkości kontroli CNC, szybkości sterowania napędami, zastosowanie czujników pomiarowych i bezpośrednich układów pomiarowych oraz szybkich systemów wsparcia operacyjnego, tj. zestawu programów, które pomagają monitorować, kontrolować, analizować i zarządzać siecią komputerową. Ponadto efektywne jest zastosowanie umocnionych



Rys. 1.19. Wymagania konstrukcyjne maszyn CNC zapewniające warunki obróbki HSC



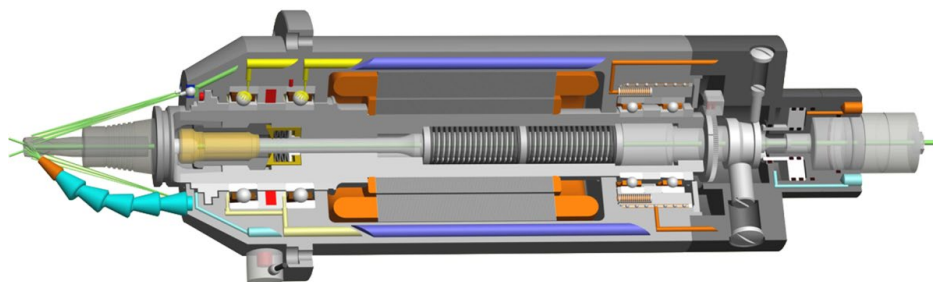
Rys. 1.20. Schemat cyrkulacji medium chłodzącego wewnątrz szlifierki CNC do szlifowania powierzchni płaskich

siluminów i innych stopów lekkich na korpusy frezów czołowych i innych narzędzi o dużej masie (według firmy „Gühring”).

Dokładność termiczna w warunkach obróbki HSC może być zapewniona poprzez zwiększenie odporności konstrukcji na warunki zewnętrzne, a przede wszystkim zmniejszenie przewodności cieplnej materiałów stosowanych w produkcji maszyn CNC, np. tzw. zerodurów oraz efektywnego odprowadzania ciepła z zespołów maszyny i strefy obróbki.

Temperaturę można ograniczyć, stosując cyrkulację medium chłodzącego w konstrukcji nośnej i roboczych zespołach maszyny. Tę kwestię można przeanalizować na przykładzie szlifierki CNC (rys. 1.20). Medium ochładza się w zbiorniku 9 do wymaganej temperatury z zastosowaniem termoregulatora 2 i cyrkuluje w łańcuchu „zbiornik 9 – kolumny 7 – śruby toczne 3, 6 – płyta elektromagnetyczna 4 – wrzeciono ściernicy 5 – łoże I”. Medium służy również do chłodzenia oleju układu hydraulicznego podczas jego przepływu przez wymiennik ciepła 8. W wyniku tego, do siłowników hydraulicznych i przewodnic dostarczany jest olej o temperaturze medium chłodzącego, a w rezultacie odchyłki geometryczne wyrobów po szlifowaniu wynoszą mniej niż 1 μm .

Współczesne maszyny CNC stosowane do obróbki HSC i HPC wyposażone są we wbudowane układy silnik-wrzeciono (S-W), które mają niewielkie wymiary i zapewniają bezstopniowe regulowanie zarówno prędkości obrotowych, jak i momentów obrotowych wrzeciona w dużych zakresach. Podstawowy schemat budowy układu S-W pokazano na rys. 1.21.



Rys. 1.21. Budowa układu silnik-wrzeciono z czujnikami i siłownikami do sterowania procesem podczas obróbki HSC i HPC

W układzie S-W silnik zintegrowany jest z obudową wrzeciona i umożliwia uzyskanie wysokich prędkości obrotowych wrzeciona bez ograniczeń związanych z zastosowaniem przekładni. Wrzeciono silnika składa się z łożyskowanego wału wrzeciona, silnika i systemu mocowania narzędzia. Łożyska są smarowane smarem plastycznym o działaniu permanentnym lub wykorzystywane jest smarowanie olejowo-powietrzne. Przy czym smarowanie olejowo-powietrzne umożliwia osiągnięcie prędkości obroto-

wych wrzeciona wyższych o nawet 20%. Moc układu S-W zależy od mocy silnika, wybór wrzeciona zaś dla konkretnego zastosowania zależy od wymagań stawianych względem obrabiarki, które dotyczą kombinacji prędkości obrotowej, mocy i sztywności.

Jednym z najważniejszych elementów każdego wrzeciona wysokoobrotowego jest układ łożysk. Wrzeciono powinno zapewniać wysokie prędkości obrotowe, przenosić niezbędny moment obrotowy i moc na narzędzie, a także gwarantować dobrą nośność i długą żywotność użytkowania. Łożyska muszą spełniać wszystkie te wymagania. Wielu światowych producentów oferuje wysoce precyzyjne łożyska do obróbki HSC i HPC. Do podstawowych rodzajów łożysk zalicza się łożyska rolkowe, łożyska stożkowe, łożyska kulkowe skośne. Kryteria wyboru łożysk zależą od specyfikacji wrzeciona (tab. 1.2).

Tabela 1.2. Kryteria wyboru łożysk

Wymagania	Szczegóły konstrukcji	Wpływ na parametry pracy
Duża prędkość obrotowa	Mały kąt styku	Mały wał, niska moc
Wysoka sztywność	Duże rolki	Niska prędkość, duży wał
Zdolność do obciążeń osiowych	Duży kąt styku	Zmniejszenie prędkości
Zdolność do obciążeń promieniowych	Mały kąt styku	Zwiększenie prędkości
Duża dokładność	Duże obciążenie wstępne	Duży koszt, niska prędkość

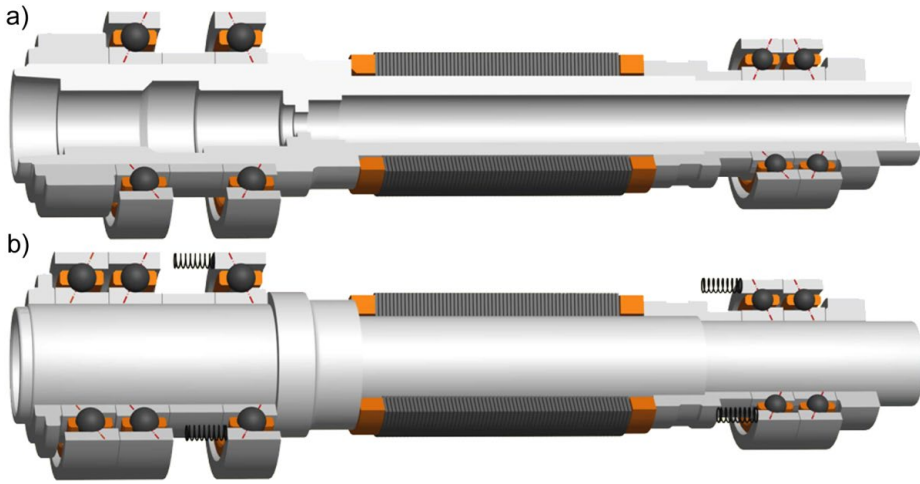
Aby zapewnić wymaganą nośność wrzeciona pracującego z dużą prędkością, węzły łożyskowe (po 2-3 łożyska w każdej grupie) są instalowane w różnych konfiguracjach, co pozwala na rozłożenie obciążenia i zwiększenie sztywności wrzeciona.

Konfiguracja typu „O” (rys. 1.22 a) zapewnia największą dokładność i sztywność wrzeciona. W tej konfiguracji maksymalne prędkości są nieco mniejsze, ale wrzeciono jest równie sztywne w obu kierunkach osiowych. Jednakże w większości przypadków dla wrzecion wysokoobrotowych stosowana jest konfiguracja łożysk typu „Tandem” (rys. 1.22 b). W tym przypadku z przodu i z tyłu wrzeciona są montowane zestawy 2-3 łożysk razem, co zapewnia osiągnięcie najwyższych możliwych prędkości obrotowych.

Podczas pracy układów S-W straty termiczne i rozszerzalność cieplna wału wrzeciona występują w sposób naturalny, powodując utratę dokładności obróbki. Aby skompensować rozszerzalność cieplną, tylne łożyska montowane są na tulei ślizgowej, stałe zaś obciążenie wstępne tylnych łożysk zapewnia sprężyna.

W ostatnich latach coraz częściej do produkcji łożysk stosuje się precyzyjne kulki produkowane z ceramiki. Łożyska ceramiczne mają następujące zalety:

- Masa kulek ceramicznych jest o 60% mniejsza niż masa kulek stalowych. Jest to szczególnie istotne przy stosowaniu wysokich prędkości wrzeciona, ponieważ masa

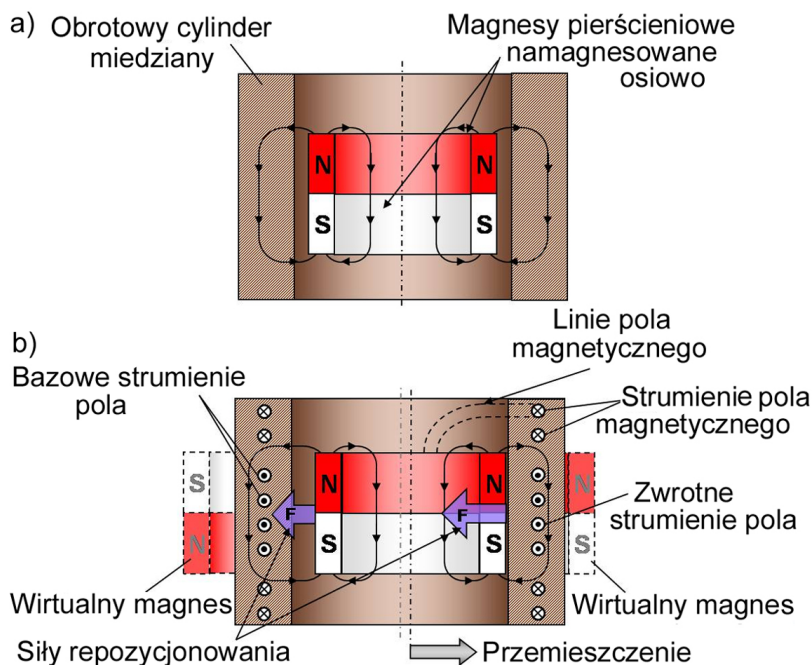


Rys. 1.22. Konfiguracje łożysk typu: a) „O” i b) „Tandem”

określa wielkość siły odśrodkowej, która dociska kulki do pierścienia zewnętrznego. Powoduje to intensywne zużycie, a nawet deformację kulek. Lżejsze kulki ceramiczne są mniej podatne na działanie siły odśrodkowej. Ich zastosowanie pozwala na zwiększenie prędkości obrotowej nawet o 30% bez wpływu na żywotność łożysk o danej średnicy.

- Jedną z najczęstszych przyczyn zużycia i awarii łożysk jest zatarcie na zimno materiału kulek z materiałem pierścieni łożyska. Powoduje to zmianę chropowatości powierzchni kulki i pierścienia, co z kolei prowadzi do zwiększonego wytwarzania ciepła i uszkodzenia łożysk. Zastosowanie kulek ceramicznych praktycznie eliminuje ten efekt, co skutkuje znacznym wydłużeniem żywotności łożysk.
- Łożyska z kulkami ceramicznymi generują mniej ciepła. Kulki ceramiczne mają niemal idealnie kulisty kształt. W konsekwencji wytwarzanie ciepła przy wysokich prędkościach jest poważnie zredukowane, co dodatkowo zwiększa żywotność smaru.
- Łożyska ceramiczne znacznie redukują vibracje wrzeciona.

Łożyska magnetyczne i elektromagnetyczne są rozwojowym podejściem w konstrukcjach układów S-W i pozwalają osiągnąć najwyższe prędkości obrotowe wałów praktycznie bez ograniczeń. W łożyskach pasywnych wykorzystywane są magnesy stałe, a ich zasilanie jest zbędne. Łożyska aktywne są stosowane, gdy występują trudno-

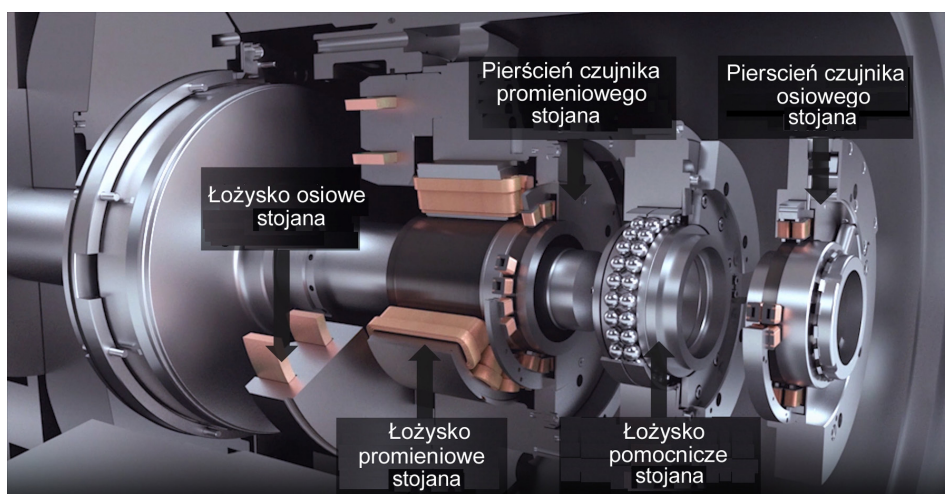


Rys. 1.23. Schematy łożyska magnetycznego: a) pasywnego i b) aktywnego

ści z utrzymaniem lewitującego obiektu w optymalnej pozycji. Łożyska takie zwykle wymagają łożyska zapasowego na wypadek zaniku zasilania (rys. 1.23). Podstawowa zasada ich działania polega na stabilizacji położenia obiektu w jednakowej odległości od obu siłowników. Rozstaw siłowników oraz rozmiar wirnika determinują w odziaływań obszar dopuszczalny przemieszczeń wirnika.

Obecnie przewagę mają łożyska aktywne, w których stabilne położenie rotora zapewniają siły przyciągania magnetycznego. Siły te oddziałują na rotor od czoł elektromagnesów, w których prąd elektryczny jest regulowany układem sterowania automatycznego na podstawie sygnałów elektronicznego bloku sterowania (rys. 1.24). Aktywne łożyska magnetyczne cechują się bardzo dobrymi właściwościami dynamicznymi, niezawodnością i współczynnikiem sprawności działania.

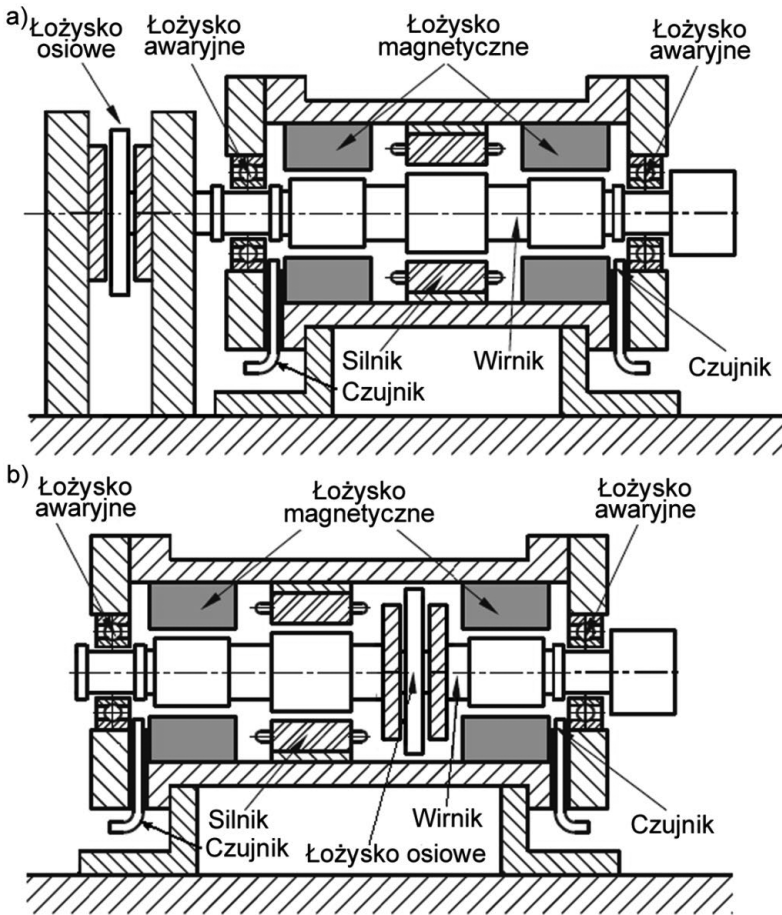
W obrabiarkach stosuje się dwa typy elektrowrzecion z łożyskami magnetycznymi. Pierwszym z nich jest wrzeciono z zewnątrz umieszczonym łożyskiem magnetycz-



Rys. 1.24. Wrzeciono z aktywnym łożyskiem elektromagnetycznym firmy „SKF”

nym (rys. 1.25 a), drugim zaś wrzeciono z wewnętrznym łożyskiem magnetycznym (rys. 1.25 b). W obu rozwiązaniach stosowane są także łożyska toczne, traktowane jako łożyska awaryjne, zabezpieczające stojan silnika i stojany łożysk przed uderzeniem wirnika w momencie, kiedy wypadnie on z pola magnetycznego łożysk promieniowych. Łożyska toczne spełniają także funkcję tzw. leżaka spoczynkowego wału podczas przerw w pracy wrzeciona. W konstrukcjach elektrowrzecion przewidziano zastosowanie różnego rodzaju czujników wiropędowych (lub podobnych) położenia wału w łożyskach magnetycznych. Czujniki te powinny bezpiecznie i z bardzo wysoką dokładnością pracować przy ekstremalnie dużych prędkościach obrotowych wrzeciona.

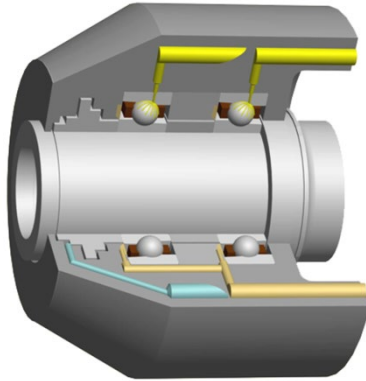
Wyróżnia się różne sposoby smarowania łożysk wrzecion stosowanych do obróbki HSC. Najprostszym jest zastosowanie smaru plastycznego, który zapewnia wypełnienie około 20-30% przestrzeni między kulkami i pierścieniami łożyska i nie traci swoich właściwości przez cały okres użytkowania. Zaletą smaru plastycznego jest niski koszt jego eksploatacji. Smar ten wykazuje jednak wiele ograniczeń, np. wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wzrasta temperatura, co może niekorzystnie wpływać na właściwości użytkowe smaru.



Rys. 1.25. Schematy wysokoobrotowych elektrowrzecion frezarskich [16]

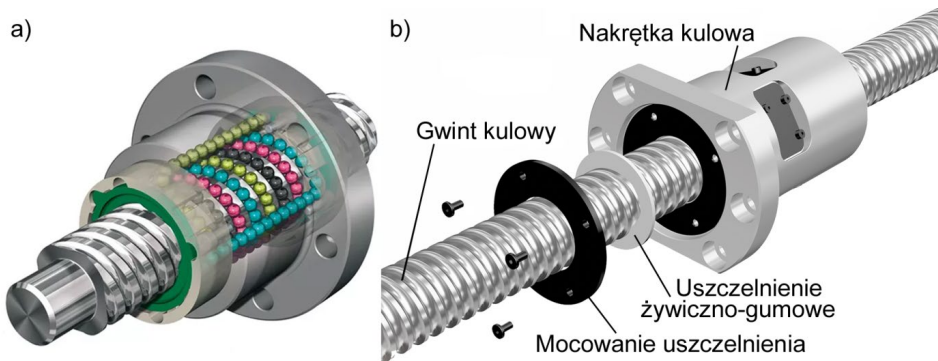
W wielu zastosowaniach, w których wymagane są wysokie prędkości obrotowe wrzecion, smarowanie smarem stałym jest niewystarczające. Zapewnia ono wartość $d \times N^3$ do 850 000, wówczas gdy smarowanie olejowo-powietrzne zwiększa tę wartość do 1 500 000. W tym przypadku precyzyjnie obliczona ilość oleju i powietrza jest wtłaczana pod ciśnieniem do specjalnego mieszalnika mechanicznego, z którego mieszanka olejowo-powietrzna jest doprowadzana do łożysk wrzeciona. W innym wariantcie minimalna ilość oleju jest podawana przez małe otwory bezpośrednio do punktu styku kulki z pierścieniem łożyska (rys. 1.26). Takie rozwiązanie optymalizuje smarowanie łożysk i zmniejsza ich nagrzewanie.

³ d – średnica wrzeciona, N – liczba obrotów na minutę.



Rys. 1.26. Schemat doprowadzania mieszanki olejowo-powietrznej do miejsca styku kulek z pierścieniami łożysk wrzeciona

Śruby pociągowe toczne są najczęściej wykorzystanymi zespołami do zapewnienia ruchu posuwu na maszynach CNC. W tych mechanizmach kulki toczą się pomiędzy śrubą a nakrętką w zapętleniu poprzez układ zwrotny kulek, gwarantując tym samym płynną sekwencję ruchu (rys. 1.27).



Rys. 1.27. Schemat (a) i (b) – ogólna konstrukcja śruby pociągowo-tocznej

Obecnie do zapewnienia ruchu posuwu w maszynach CNC coraz częściej stosowane są napędy liniowe. Nie istnieje w nich efekt luzu zwrotnego, ponieważ pomiar położenia realizowany jest za pomocą liniałów mierzących bezpośrednio przemieszczenia liniowe osi, a ruch powodowany jest w sposób bezdotykowy przez pole magnetyczne. Nie ma też ograniczeń długości ruchu wynikających z obecności śrub. Tego typu napędy uzyskują dokładności na poziomie 0,001 mm. Ponieważ do przeniesienia napędu nie są używane stykające się ze sobą mechaniczne elementy, nie występuje tu zjawisko zużycia i po wielu latach eksploatacji maszyna nie traci swojej dokładności.

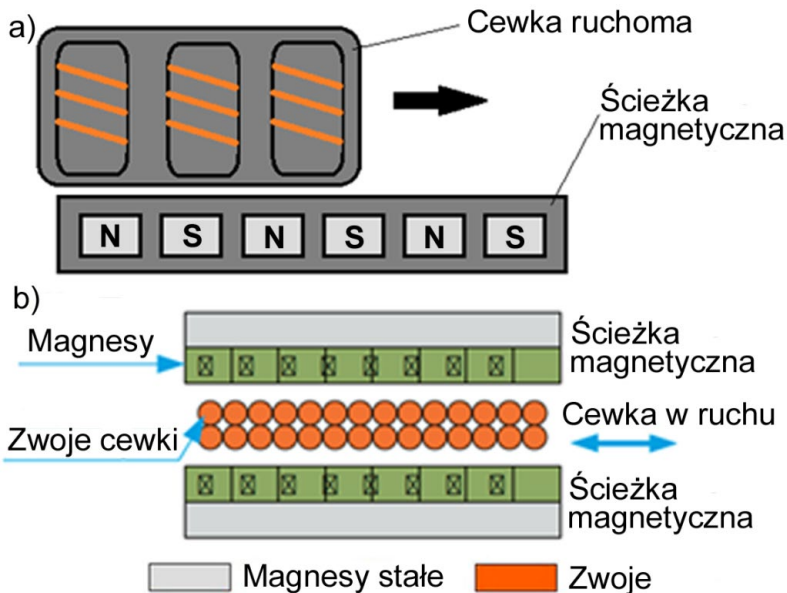
Podobnie jak silniki w napędach tradycyjnych, które zawierają dwie główne części, stojan i wirnik, napęd liniowy zaś ma nieruchomą część (tzw. ścieżkę magnetyczną) i ruchomą część (cewkę ruchomą). Ścieżka magnetyczna stanowi ciąg magnesów trwałych precyzyjnie rozmieszczonych na płytach nośnych. Cewka magnetyczna stanowi rdzeń z laminowanego żelaza, w którym znajdują się rowki. Układa się w nich uzwojenie miedziane, podobnie jak przy tradycyjnym uzwojeniu stojana. Cewka znajduje się na ścieżce magnetycznej, wzdłuż której wykonuje ruch. Istnieją również układy dwustronne, w których ścieżka magnetyczna znajduje się po obu stronach ruchomej cewki. Takie rozmieszczenie elementów maszyny ma na celu bardziej efektywne wykorzystanie strumienia magnetycznego.

Podobnie jak w konwencjonalnym silniku synchronicznym, uzwojenia ruchomej cewki podłączone są do źródła trójfazowego prądu przemiennego, tworząc w ten sposób prostoliniowe stałe pole magnetyczne. Stałe pole magnetyczne wytwarzane przez ścieżkę magnetyczną oddziałuje ze zmiennym polem elektromagnetycznym, w związku z czym następuje przemieszczenie ruchomej cewki. W tym przypadku prędkość pola, a także prędkość samej ruchomej cewki określa się jako:

$$V_s = 2pf_s \text{ [m/s]},$$

gdzie: p – podziałka biegunów, f_s – częstotliwość sieci zasilającej.

Schematy silników liniowych pokazano na rys. 1.28.



Rys. 1.28. Schematy serwonapędów liniowych: a) jednostronny i b) dwustronny (firma „Yaskawa”)

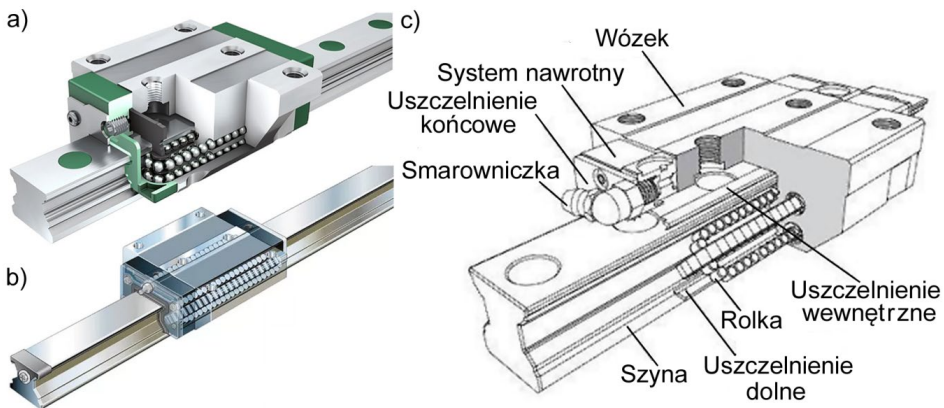
Względem prowadnic maszyn CNC stawia się następujące wymagania:

- zapewnienie dokładności wzajemnego przemieszczenia zespołów maszyny w ciągu całego okresu użytkowania,
- zapewnienie wymaganej nośności,
- zapewnienie minimalnego tarcia i zużycia,
- duża sztywność statyczna i dynamiczna,
- równomierność przemieszczenia zespołów maszyny,
- możliwość regulacji luzów.

Najczęściej stosowane prowadnice toczne kulkowe i rolkowe dodatkowo muszą zapewnić:

- małe siły przemieszczenia (małe straty na tarcie),
- płynny ruch zespołów roboczych na małych prędkościach,
- wysoką dokładność pozycjonowania,
- wysoką niezawodność przy dobrej ochronie od zanieczyszczeń,
- nieznaczne wydzielanie ciepła,
- łatwość smarowania.

Schematy prowadnic tocznych przedstawiono na rys. 1.29.



Rys. 1.29. Prowadnice toczne: a) kulkowa, b) rolkowa, c) konstrukcja ogólna

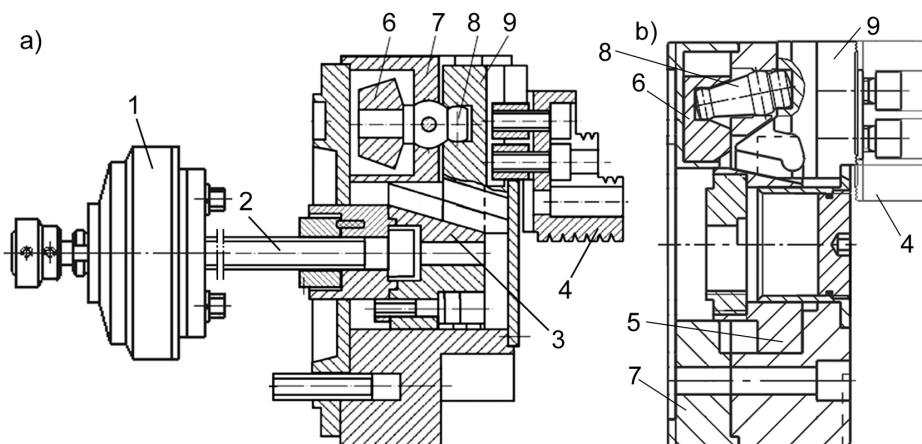
1.1.7. Uchwyty do mocowania przedmiotów i narzędzi

Istotnym problemem w warunkach obróbki HSC i HSP jest mocowanie przedmiotów. Im większa jest maksymalna średnica przedmiotu, który można zamocować w uchwycie, tym mniejsza dopuszczalna prędkość obrotowa uchwytu. Znaczne siły odśrodkowe działające na szczęki wywołują zmniejszanie siły zacisku i pewności mocowania. Żeby temu zapobiec, w konstrukcjach uchwytów tokarskich dodaje się ciężarki o masach

większych niż masy szczęk i tak usytuowanych, żeby różnica w siłach odśrodkowych zwiększała sumaryczną siłę zacisku.

W konstrukcji uchwytu pokazanej na rys. 1.30 a siła zacisku przekazywana jest od siłownika 1 przez tłoczyko 2 do tulejki z rowkami klinowymi 3, a następnie do szczęk stałych 9 i szczęk wymiennych mocujących 4 usytuowanych w korpusie 7. Dźwignie 8 jednym końcem wchodzi w gniazda szczęk stałych, drugim zaś są osadzone w ciężarkach 6.

W konstrukcji uchwytu pokazanej na rys. 1.30 b siła zacisku przekazywana jest od siłownika przez tłoczyko do kompletu dźwigni roboczych 5, przesuwających szczęki stałe 9 i szczęki wymienne mocujące 4 usytuowane w korpusie 7. Dźwignie 8 jednym końcem wchodzi w gniazda szczęk stałych, drugim zaś przesuwają ciężarki 6.



Rys. 1.30. Schematy uchwytów tokarskich stosowanych do obróbki HSC

Obróbka toczeniem w warunkach HSC niesie za sobą wiele dodatkowych trudności, do których należą:

- konieczność uzyskania dużych wartości v_c w przypadku toczenia małych średnic, co wymaga bardzo dużych prędkości obrotowych wrzeciona; obecnie istnieje mocno ograniczona liczba tokarek o takich prędkościach, chyba że w konstrukcji zostaną wykorzystane specjalne elektrowrzeciona, a także uchwyty do mocowania przedmiotów,
- w przypadku przedmiotów o znacznych masach bardzo duża energia kinetyczna szybko wirującego przedmiotu powoduje zagrożenie oraz pojawienie się bariery psychologicznej u operatorów maszyn,
- pogorszenie się kształtu wiórów, które stają się bardziej wstępowe, a więc trzeba je skutecznie łamać,

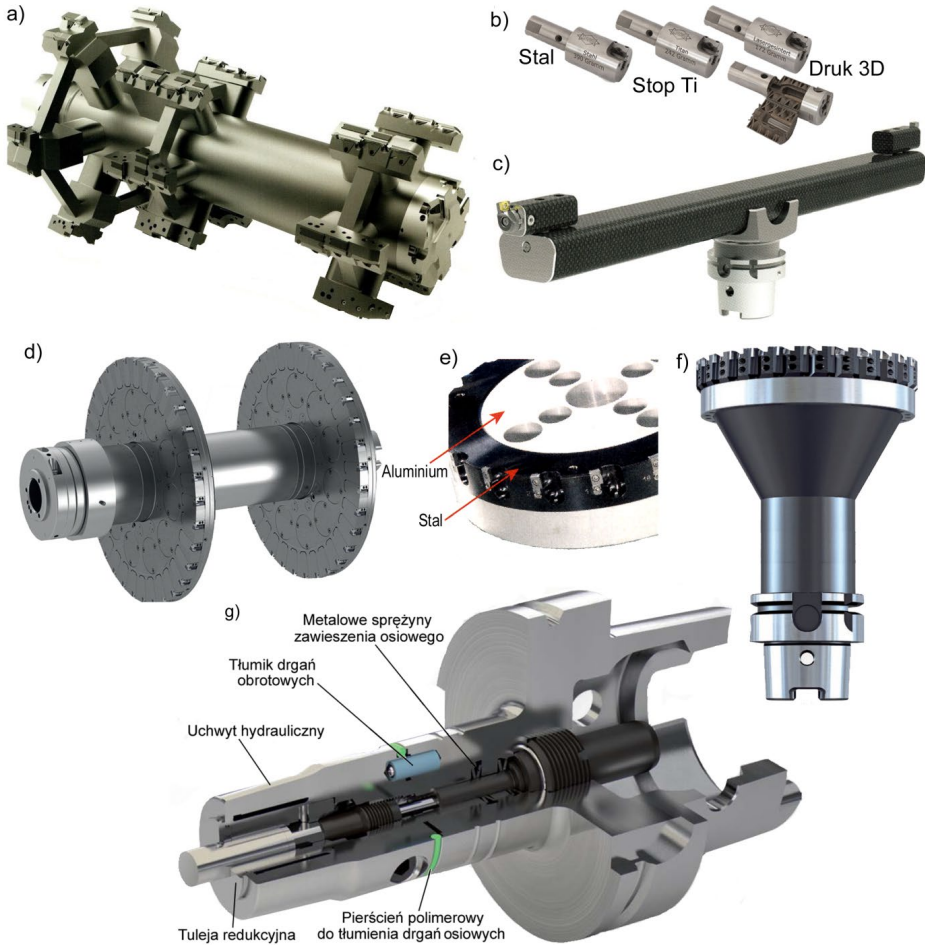
- konieczność posiadania napędów głównych o dużych mocach, zgodnie ze wzorem $P_c = F_c v_c$,
- groźniejsze skutki kolizji,
- długie czasy rozpędzania się i hamowania wrzeciona,
- konieczność dużej sztywności nie tylko napędów głównych, lecz także napędów posuwu,
- bardzo duże problemy z wyważaniem dynamicznym przedmiotu,
- trudności z deformacją przedmiotów wobec dużych sił koniecznych przy mocowaniu.

Powyższe wymagania dotyczą również uchwytów i opravek narzędziowych, ponieważ każde zakłócenie w ich pracy pogarsza zarówno wydajność obróbki, jak i jakość wyprodukowanych przedmiotów. Decydującymi wskaźnikami w tym przypadku są:

- sztywność konstrukcji narzędzia,
- jego minimalna masa,
- zdolność materiału i konstrukcji do eliminacji drgań.

Sztywność układu „narzędzie skrawające – uchwyt obróbkowy” może być zwiększona poprzez zastosowanie materiałów o podwyższonych właściwościach mechanicznych lub też o podwyższonej gęstości. Na rys. 1.31 a pokazano wytaczadło składające się ze stalowych wkładek z płytkami wymiennymi ulokowanych w korpusie z polimerowego kompozytu umocnionego stalowymi włóknami lub cząstkami. Takie materiały, z jednej strony, mają wysokie właściwości wytrzymałościowe, z drugiej zaś niską gęstość, co oznacza podwyższoną zdolność narzędzia do tłumienia drgań. Możliwości zastosowania rozwojowych technologii drukowania 3D SLM (ang. *Selective Laser Melting*) i DED (ang. *Directed Energy Deposition*) pokazano na rys. 1.31 b, c. Ogólnie występują możliwości drukowania narzędzi niewielkich wymiarów o zmniejszonej masie lub też, w przypadku narzędzi o dużych wymiarach, wykorzystanie struktury komórkowej (ang. *Composite Lattice Structures*, CLS). W tym przypadku masa wyrobów zmniejsza się o ponad 50% [17]. Na rys. 1.31 d, f pokazano korpusy narzędzia, które wyprodukowano z siluminu o podwyższonej wytrzymałości i znacznie mniejszej gęstości w porównaniu ze stalą. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie bimetalu (stal i aluminium), co pokazano na rys. 1.31 e. Na rys. 1.31 g zaś przedstawiono konstrukcję oprawy narzędziowej z wbudowanym tłumikiem drgań.

Przy rozważaniu szczegółów konstrukcji narzędzi skrawających stosowanych w warunkach HSC konieczne jest uwzględnienie sposobu mocowania narzędzi obrotowych w oprawkach lub we wrzecionach maszyn obróbkowych. Typowe połączenie poprzez chwyt ze stożkiem SK (7:24) w przypadku prędkości obrotowych właściwych dla HSC nie mogą być stosowane z powodu ewentualnego poluzowania się złącza i utraty pewności mocowania [18]. Wyważenie stożka 7:24 (rys. 1.32 a) jest zbyt skomplikowane i praktycznie niemożliwe do uzyskania wysokiej powtarzalności ze względu na budowę i brak styku kołnierza oprawy z wrzecionem.



Rys. 1.31. Przykłady uchwytów i opravek narzędziowych do obróbki w warunkach HSC i HSP: a) wytaczadło o zmniejszonej masie z korpusem kompozytowym (firma „Mapal”), b) oprawki do mocowania niewielkich narzędzi o strukturze komórkowej (firma „Mapal”), c) wytaczadło o strukturze komórkowej (firma „Mapal”), d) i f) narzędzia z korpusami z umocnionego siluminu (firma „Gühring”), e) korpus frezu na bazie bimetalu (firma „Ceratzit”), g) oprawka z tłumikami drgań osiowych i obrotowych (firma „Gühring”)

Bardziej skuteczne jest zastosowanie stożków typu HSK (rys. 1.32 b). Chwyty (oprawki) tego typu zaprojektowano tak, aby ich znacznie mniejszą masę rozłożyć symetrycznie na stożku 1:10. Pozwala to na bardzo dokładną współosiowość oprawki i wrzeciona oraz ich ustawienia wzdłużnego. W ten sposób zapewniono dużą powierzchnię styku po obwodzie, a także styk kołnierza chwytu z czołem wrzeciona. Mniejsza masa i zredukowana liczba elementów konstrukcji powoduje znaczny wzrost



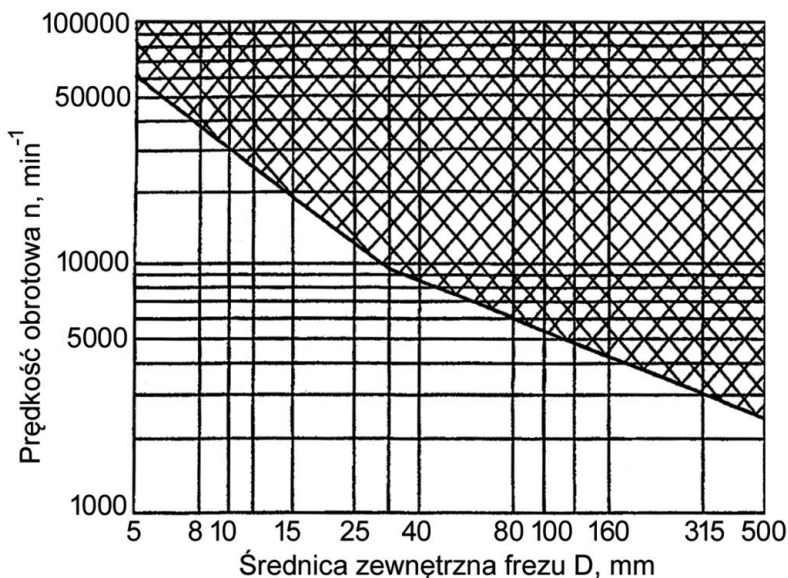
Rys. 1.32. Oprawka z chwytem: a) SK i b) HSK

szttywności, co z kolei zapewnia znacznie mniejsze bicie narzędzia przy dużych prędkościach obrotowych.

W przypadku toczenia występują dodatkowe ograniczenia technologiczne, które wynikają m.in. z dużej energii kinetycznej oraz oddziaływania niewyważonych sił od wirujących przedmiotów. Uznaje się, że jeśli nawet by się udało wyważyć wirujący przedmiot, w którym naddatki byłyby nierównomiernie rozłożone, to już pierwsze zgrubne przejście narzędzia spowodowałoby znaczące niewyważenia układu OUPN i powstanie wyraźnie występujących wirujących sił [19].

Toczenie w warunkach HSC wykorzystuje się zazwyczaj do obróbki materiałów trudnoobrabialnych, dla których prędkości skrawania nie osiągają znacznych wartości i są zdecydowanie mniejsze niż podczas obróbki konwencjonalnych materiałów.

Wykazane problemy nie występują podczas wykorzystania narzędzi obrotowych o niewielkich średnicach. Natomiast narzędzia nastawiane lub regulowane mechatronicznie wyposażone w zespoły przemieszczane w kierunku promieniowym nie mają ograniczeń maksymalnie dopuszczalnych obrotów. O ważności problematyki związanej z zagrożeniami stosowania dużych prędkości obrotowych świadczy norma PN EN ISO, która podaje m.in. zakresy maksymalnych prędkości obrotowych, jakich nie powinno się przekraczać dla określonych średnic frezów (rys. 1.33).



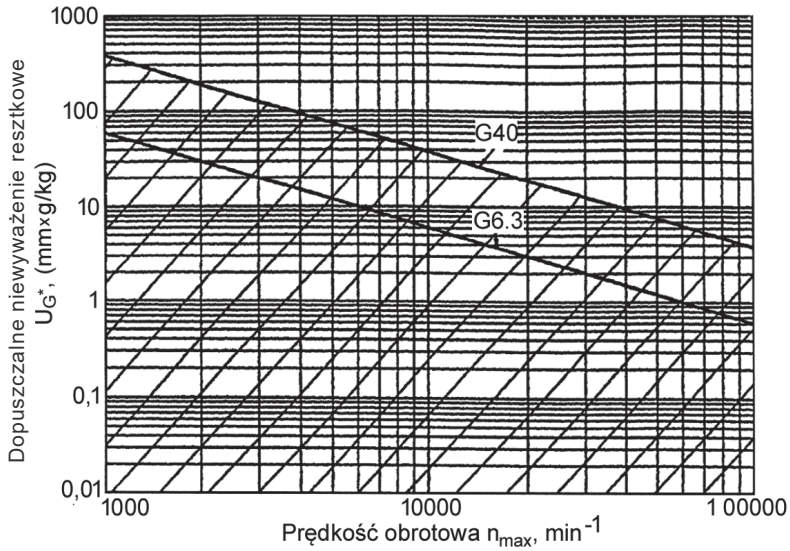
Rys. 1.33. Graniczne prędkości obrotowe wrzeciona (zakreślony obszar zabroniony) w zależności od średnicy zewnętrznej frezu wg normy PN EN ISO [20]

Wzrost siły odśrodkowej znacznie przekracza siły występujące podczas frezowania konwencjonalnego. Dodatkowo wpływ mają także inne siły, które np. powstają podczas przyspieszania frezu do prędkości roboczej, siły zacisku części chwytowej, siły zacisku we frezach składanych, siły hydrodynamiczne inicjowane powietrzem oraz cieczą chłodzącą. Siła odśrodkowa generuje dużą energię i prowadzi do wysokich obciążeń konstrukcji narzędzia, które mogą doprowadzić do rozerwania frezu. Frezy stosowane przy dużych prędkościach obrotowych wykazują wysoką energię kinetyczną. W takim przypadku oderwane części frezu będą poruszały się z dużymi prędkościami po nieprzewidywalnych torach, a ich energia może rozproszyć się podczas ruchu jedynie przez pojedyncze lub wielokrotne zderzenia z obrabiarką lub z jej otoczeniem.

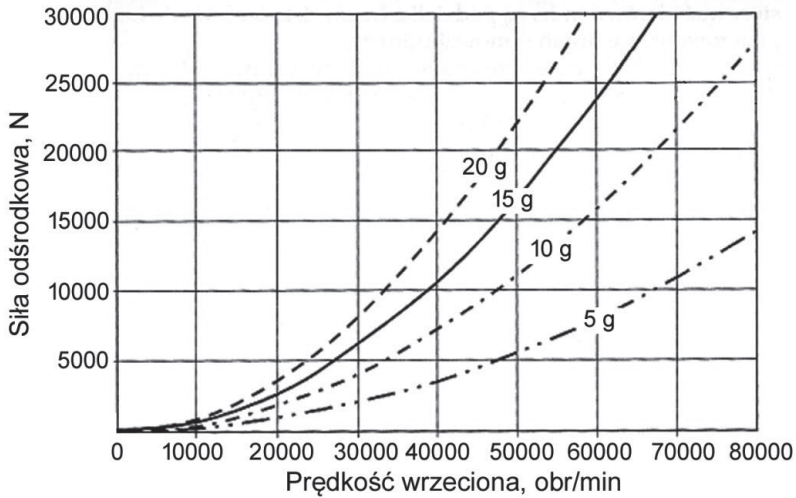
Ze względów bezpieczeństwa przy maksymalnej prędkości obrotowej n_{max} frezy powinny wykazywać klasę dokładności wyważenia równą G 40 lub większą, zgodnie z normą ISO 1940-1:1986 (rys. 1.34). Mniejsze klasy wyważenia (np. G 6.3, G 2.5) również są dopuszczalne, np. z powodu konieczności zwiększenia trwałości ostrza lub obróbki wykończeniowej.

Uszkodzenia frezów stosowanych w warunkach HSC można uporządkować w następujący sposób:

- Uszkodzenia korpusu frezu, tj. jego odkształcenie lub rozerwanie wskutek przeciążenia. Długie, wystające frezy ulegają uszkodzeniu pod wpływem sił skrawania,



Rys. 1.34. Dopuszczalne względne niewyważenie resztkowe w zależności od maksymalnej prędkości obrotowej n_{max} dla klas dokładności wyważenia G6.3 i G40 [20]



Rys. 1.35. Zmiany siły odśrodkowej działającej na płytkę skrawającą w zależności od jej masy i prędkości obrotowej wrzeciona [18]

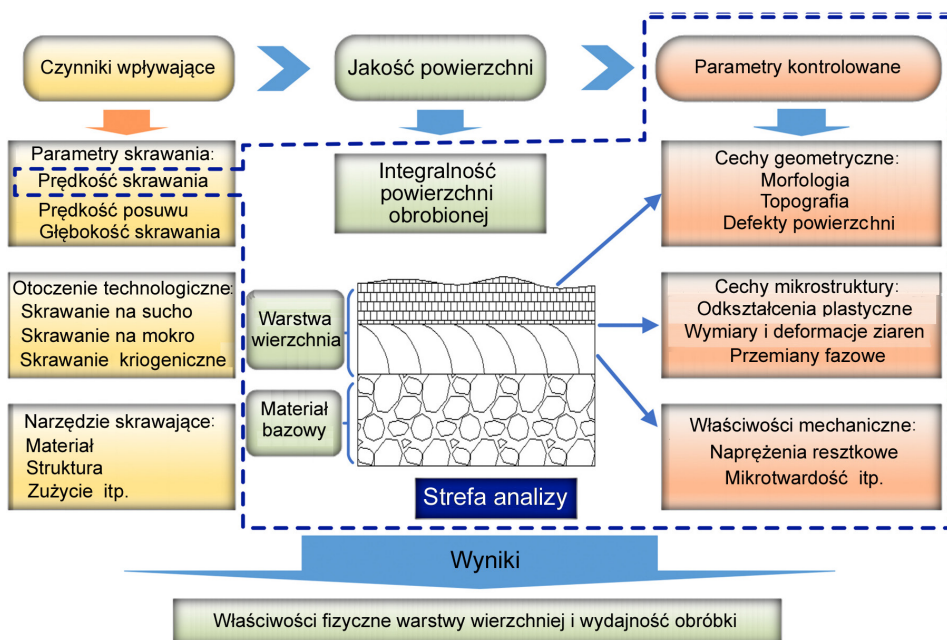
sił odśrodkowych lub wskutek niewyważenia. Krótkie frezy ulegają uszkodzeniu wskutek przekroczenia granicznej wytrzymałości korpusu pod działaniem siły odśrodkowej.

- Uszkodzenie połączenia elementu skrawającego, np. płytki wymiennej lub wkładki z korpusem frezu, zachodzi pod wpływem sił odśrodkowych i/lub sił skrawania, powodujących przeciążenie konstrukcji przez odkształcenie lub pęknięcie.
- Uszkodzenie części skrawającej pod wpływem sił odśrodkowych i/lub sił skrawania.

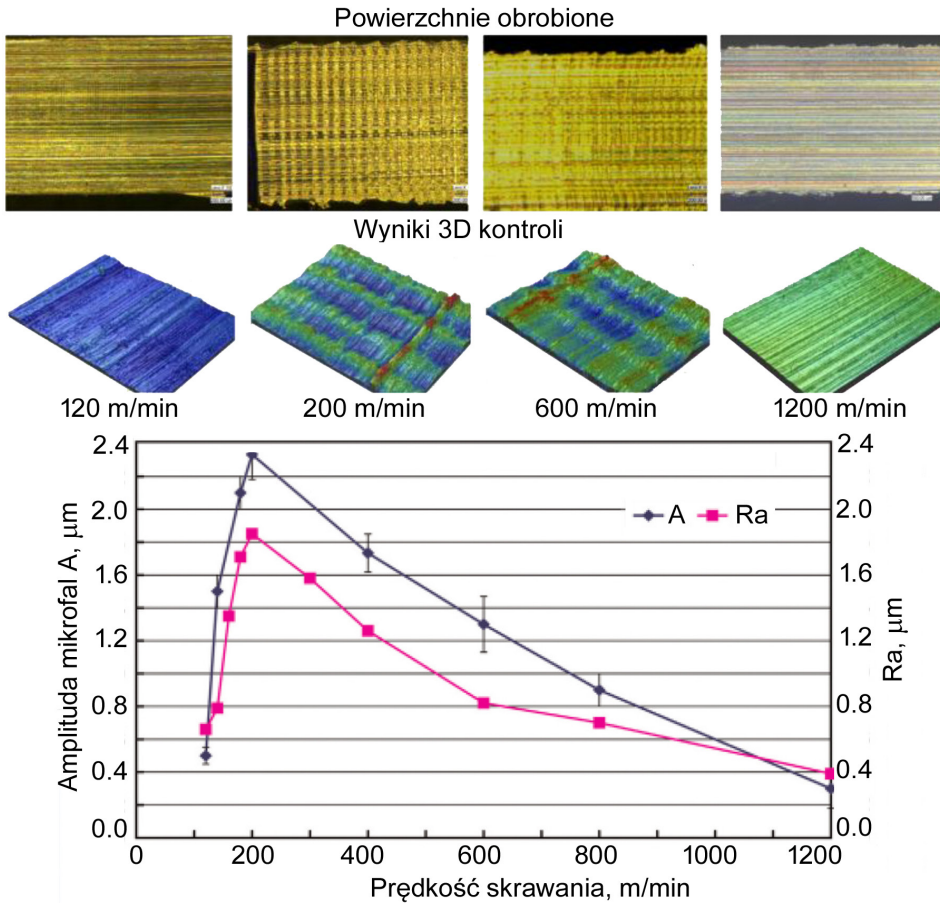
Dla przykładu na rys. 1.35 przedstawiono zmiany siły odśrodkowej działającej na płytkę skrawającą umieszczoną na obwodzie frezu o średnicy 80 mm w zależności od jej masy i prędkości obrotowej wrzeciona.

1.1.8. Wskaźniki stanu warstwy wierzchniej

Główną zaletą procesu HSC to doskonała integralność warstwy wierzchniej obrabianego elementu. Jest ona powszechnie stosowana do oceny jakości obrabianej powierzchni i obejmuje przede wszystkim topografię powierzchni, zmiany materiałowe i właściwości mechaniczne warstwy wierzchniej. Ogólnie rzecz ujmując, topografia powierzchni wpływa przede wszystkim na warunki styku i koncentrację naprężeń w obrabianych elementach. Natomiast zmiany materiałowe określają właściwości mechaniczne warstwy wierzchniej, które będą wpływały na skuteczność pracy części maszyn.



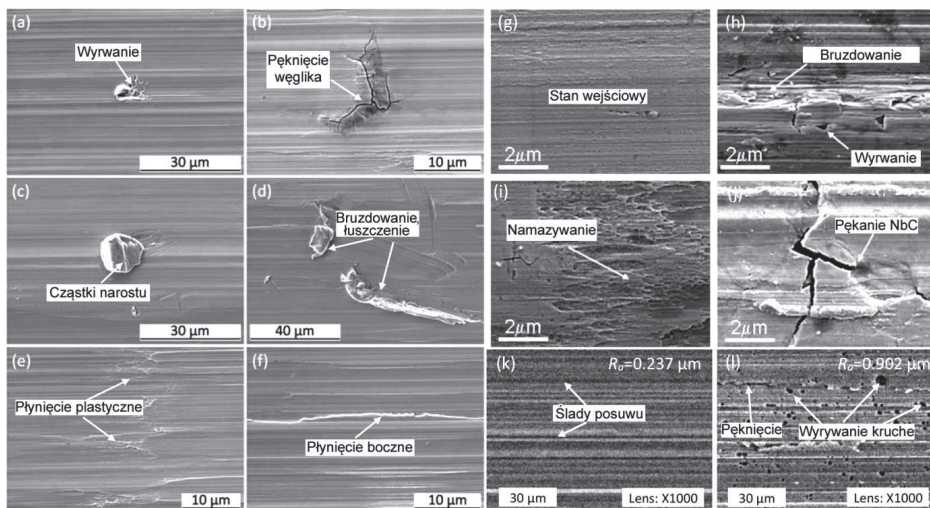
Rys. 1.36. Integralność warstwy wierzchniej w warunkach HSC (na podstawie [1])



Rys. 1.37. Kształtowanie topografii powierzchni podczas toczenia stali stopowej Aermet100 w warunkach HSC (na podstawie [21])

Schemat integralności warstwy wierzchniej w warunkach HSC pokazano na rys. 1.36. Głównym czynnikiem determinującym jakość powierzchni jest prędkość skrawania, a obszary wpływów tego parametru oznaczono linią przerywaną. Duże prędkości skrawania wpływają istotnie na zmiany w cechach geometrycznych, cechach mikrostrukturalnych i właściwościach mechanicznych (głównie naprężeniach resztkowych) powierzchni obrobionych.

Najczęściej używanym parametrem do oceny właściwości geometrycznych obrobionych powierzchni jest jej chropowatość. W węzłach tarcia zbyt duża chropowatość powierzchni może wywołać ekstremalne tarcie i zużycie oraz silniejsze skupienia naprężeń resztkowych warstwy wierzchniej, co z kolei zwiększa predyspozycje powierzchni do powstawania mikropęknięć pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Generalnie,



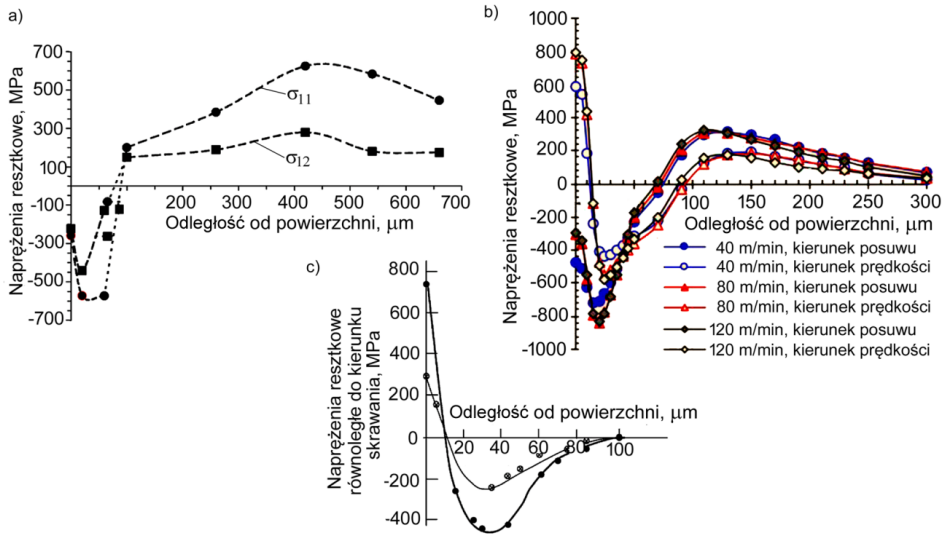
Rys. 1.38. Typowe defekty powstające na powierzchniach obrobionych podczas HSC: (a-f) stop na bazie niklu AD 730[™] [22], (g-j) stop na bazie niklu Inconel 718 z prędkością skrawania 90 m/min (g – obróbka nowym narzędziem, h – obróbka zużytym narzędziem) i 300 m/min (i – obróbka nowym narzędziem, j – obróbka zużytym narzędziem) [23], (k, l) Inconel 718 z prędkością skrawania 800 m/min (k) i 7000 m/min (l) [24]

bardziej gładkie powierzchnie o mniejszej chropowatości są preferowane w przypadku większości części maszyn. Prędkość skrawania jest parametrem procesu, który wpływa na odkształcenie materiału i warunki styku między narzędziem skrawającym a wykończoną powierzchnią.

Jako przykład można wskazać toczenie stali stopowej Aermet100 o wysokiej wytrzymałości w zakresie prędkości od 120 m/min do 1200 m/min [21]. Wyniki przedstawione na rys. 1.37 wskazują, że chropowatość obrobionej powierzchni wzrasta wraz ze wzrostem prędkości skrawania od 120 m/min do 200 m/min, a następnie, gdy prędkość skrawania wzrasta od 200 m/min do 1200 m/min, konsekwentnie maleje. Zmiany chropowatości obrobionej powierzchni są spowodowane przez mikrofalistość powstającą na powierzchni na skutek ząbkowania wióra.

Po obróbce na powierzchniach obrobionych obserwuje się różne wady wywołane interakcją między narzędziem skrawającym a materiałem przedmiotu. Miejscowo występujące wady osłabiają powierzchnię obrobioną i powodują inicjację i propagację pęknięć, co prowadzi do uszkodzenia powierzchni podczas jej pracy.

Znane są badania defektów powierzchni powstających po obróbce w warunkach HSC różnych materiałów, tj. stali, stopów na bazie niklu, stopów tytanu, stopów aluminium itd. Typowe wady powierzchniowe powstające w takich warunkach przedstawiono na rys. 1.38. Wgłębienia (rys. 1.38 a) i pęknięcia węglkowe (rys. 1.38 b) zaliczane



Rys. 1.39. Wpływ prędkości skrawania na naprężenia resztkowe warstwy wierzchniej: a) toczenie ortogonalne stopu tytanu Ti6Al4V (na podstawie [26]), symulacja MES toczenia stopu niklu Inconel 718 (na podstawie [27]), c) frezowanie stopu niklu Inconel 718 (na podstawie [28])

są do głównych rodzajów wad powierzchniowych stopów niklu. Wgłębienia powstają zazwyczaj z powodu wrywania twardych wtrąceń i węglików z powierzchni lub też w trakcie zużycia narzędzia, np. nieregularnego zużycia w pobliżu naroża ostrza skrawającego lub przez adhezję materiału. Cząstki węglików, które pozostają na obrobionych powierzchniach, inicjują powstawanie mikropęknięć i pogarszają jakość obrobionej powierzchni. Oderwane resztki narostu od krawędzi skrawającej (rys. 1.38 c) pozostają na powierzchni i powodują powstawanie defektów. Gdy oderwane pęknięte węgliki lub cząstki narostu są ponownie osadzone na obrobionej powierzchni i po niej wleczone w kolejnych ruchach skrawania, mogą wystąpić pęknięcia powierzchni i plastyczne bruzdowanie materiału (rys. 1.38 d).

Nadmierna temperatura skrawania lub niejednorodność mikrostrukturalna warstwy wierzchniej może powodować płynięcie plastyczne materiału (rys. 1.38 e) lub płynięcie boczne materiału (rys. 1.38 f). Znaczne zużycie narzędzia występujące podczas HSC materiałów trudnoskrawalnych intensyfikuje powstawanie wspomnianych defektów. Gdy prędkość skrawania wzrasta do zakresu ultra-HSC (7000 m/min), zwiększa się kruchość materiału obrabianego, a na powierzchni obserwuje się intensywne kruche pęknięcie (rys. 1.38 l), czego prawie nie widać przy mniejszych i średnich prędkościach (rys. 1.38 g i rys. 1.38 k). Ze względu na kruche pęknięcie, chropowatość powierzchni generowana przy prędkości skrawania 7000 m/min jest znacznie wyższa niż przy 800 m/min.

Naprężenia resztkowe mają również znaczący wpływ na zdolność do pracy elementów obrobionych w warunkach HSC, a w przypadku elementów cienkościennych także na dokładność wymiarową i jakość montażu. Uszkodzenia zmęczeniowe powstają z reguły na powierzchni lub pod powierzchnią obrobionych elementów. Zbyt wysokie naprężenia resztkowe generowane na obrobionej powierzchni prowadzą do przedwczesnego uszkodzenia elementów maszyn. Głównymi przyczynami powstawania naprężeń resztkowych są odkształcenia plastyczne obrobionej powierzchni i ciepło skrawania, które rozprzestrzenia się w obrabianym przedmiocie. Ogólnie rzecz ujmując, ciepło skrawania i związane z nim efekty termiczne mają tendencję do wywoływania naprężeń rozciągających, podczas gdy odkształcenia plastyczne i związane z nimi obciążenia mechaniczne mają tendencję do generowania naprężeń ściskających. Wzrost szybkości odkształcania podczas HSC może generować większą pracę mechaniczną, co skutkowałoby ściskającymi naprężeniami. Tymczasem większe odkształcenia plastyczne podczas HSC generują większe ilości ciepła, co prowadzi do powstawania naprężeń rozciągających [25].

Przykłady rozkładu naprężeń w warstwie wierzchniej materiałów po procesie toczenia i frezowania przy różnych prędkościach skrawania przedstawiono na rys. 1.39.

Tabela 1.3. Zalety, warunki i obszary zastosowania obróbki HSC

Zalety	Warunki stosowania	Obszary wykorzystania
Wysoka wydajność	obróbka przedmiotów ze stali, żeliwa, stopów lekkich	wyroby przemysłu lotniczego i kosmicznego, produkcja form odlewniczych oraz matryc i stempli do obróbki plastycznej
Wysoka jakość i dokładność powierzchni obrobionej	obróbka precyzyjna	produkcja przyrządów precyzyjnych i optycznych, produkcja turbin, produkcja wyrobów medycznych
Małe siły skrawania	obróbka elementów niesztynnych o cienkich ściankach	wyroby przemysłu lotniczego, kosmicznego, motoryzacyjnego, sprzętu AGD itp.
Wysokie częstotliwości drgań w strefie skrawania	obróbka materiałów trudno-skrawalnych bez drgań samowzbudnych	produkcja wyrobów precyzyjnych i optycznych
Niemal pełne odprowadzenie ciepła do wiórów	niskie temperatury w strefie skrawania, brak odkształceń cieplnych	produkcja przedmiotów ze stopów magnezu, produkcja wyrobów precyzyjnych

Niskie wartości naprężeń i niewielka głębokość ich zalegania zostały zarejestrowane przy niskiej prędkości skrawania. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania większe ściskające naprężenia zostają wytworzone w głębszych warstwach, natomiast w górnych warstwach powierzchniowych powstają bardzo wysokie naprężenia rozciągające, które mogą być ukrytym zagrożeniem podczas eksploatacji elementów. Maksymalne naprę-

zenia resztkowe rozciągające wytworzone na obróbjonej powierzchni przy wysokich prędkościach skrawania są prawie trzykrotnie większe niż przy prędkościach niskich.

Podsumowując całość rozważań na temat obróbki HSC, można wyróżnić wiele zalet jej stosowania w porównaniu ze skrawaniem konwencjonalnym (tab. 1.3).

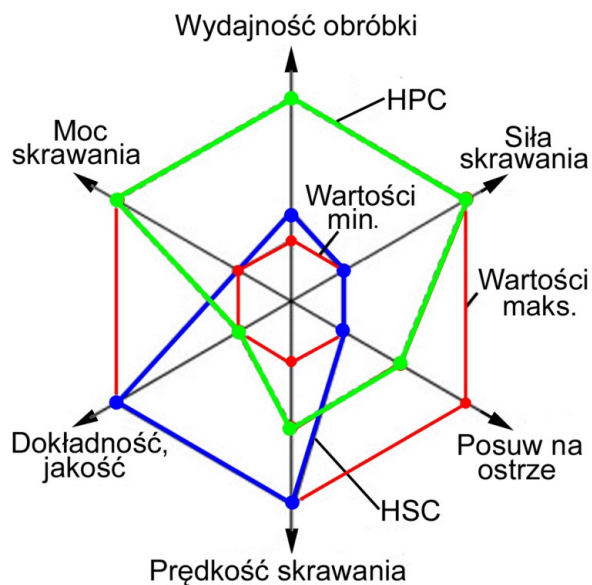
1.2. Obróbka z dużą wydajnością (HPC) oraz z dużymi posuwami (HFC)

1.2.1. Informacje ogólne

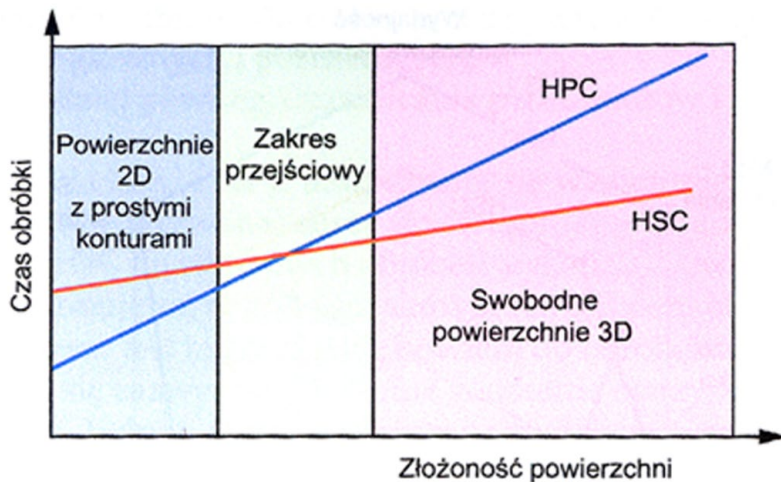
Głównym celem obróbki z dużą wydajnością (HPC) jest zwiększenie skuteczności usuwania nadmiaru, ponieważ wpływa ono na skrócenie czasów obróbki i tym samym zapewnia zmniejszenie kosztów wytwarzania. W porównaniu z technologią HSC w warunkach HPC używa się niższe prędkości skrawania, ale większe przekroje warstwy skrawanej. Dzięki temu wzrasta wydajność chwilowa obróbki, natomiast jednocześnie rosną także siły i moc skrawania, pogarsza się struktura geometryczna powierzchni obrabianych i dokładność wymiarowo-kształtowa. W konsekwencji rosną wymagania do mocy silników stosowanych w maszynach technologicznych oraz sztywności tych maszyn, a także dotyczące skuteczności mocowania przedmiotów w uchwytach obróbkowych, ponieważ HPC służy przede wszystkim do wstępnej zgrubnej obróbki wyrobów. Odmianą obróbki HPC jest obróbka z dużymi posuwami (ang. *High Feed Cutting*, HFC). Charakterystyczne dla strategii HFC jest stosowanie wysokich wartości posuwów na ostrze, wysokiej prędkości skrawania i niewielkich głębokości frezowania. Koncepcja obróbki HFC zakłada wydajną i opłacalną obróbkę frezowaniem kształtów 3D, realizowaną warstwa po warstwie.

Porównanie podstawowych cech metod HSC i HPC przedstawiono na rys. 1.40.

Wybierając do wykorzystania metody obróbki HPC lub HSC, należy uwzględnić stopień złożoności i wymiary przedmiotu oraz właściwości dynamiczne obrabiarki. Na rys. 1.41 porównano czasy obróbki przedmiotów o różnym stopniu złożoności obrabianych powierzchni w zależności od zastosowanej metody obróbki. Jeśli obrabiane są nieskomplikowane przedmioty lub przedmioty o dużych wymiarach, metoda HPC jest wydajniejsza niż HSC. Jeśli zaś powierzchnie obrabiane są skomplikowane i złożone z krótkich odcinków, przewagę ma metoda HSC. Przyczyny są związane z tym, że obrabiarki przeznaczone do zastosowania HSC są zazwyczaj bardziej dynamiczne i mają większe przyspieszenie rozpędzania i hamowania odpowiednich zespołów niż obrabiarki do obróbki HPC o znacznie większej masie. Jest to ważniejsze w produkcji przedmiotów małych. Warto także zaznaczyć, że w przypadku obróbki krótkich odcinków przedmiotów suporty ciężkich obrabiarek mogą nie zdążyć rozpędzić się do maksymalnych prędkości, ponieważ powinny wcześniej zacząć hamowanie, aby zatrzymać się w wymaganej pozycji.

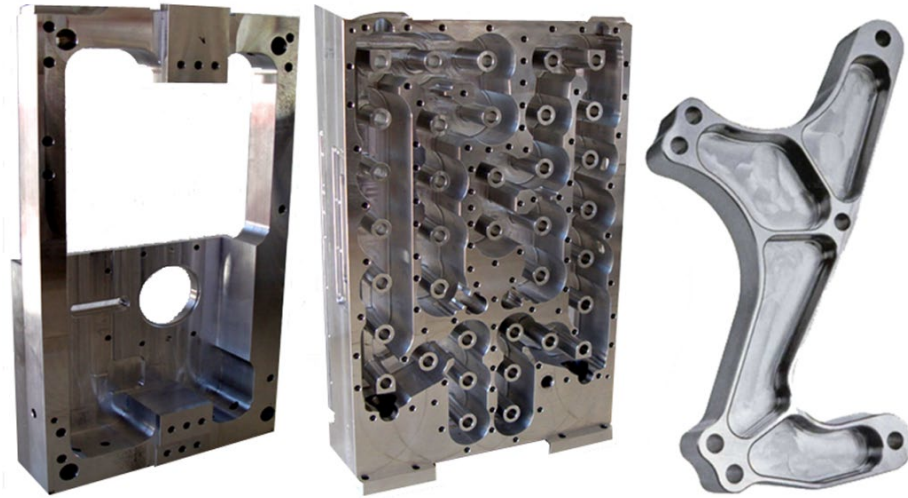


Rys. 1.40. Porównanie podstawowych cech metod HSC i HPC (na podstawie [30])

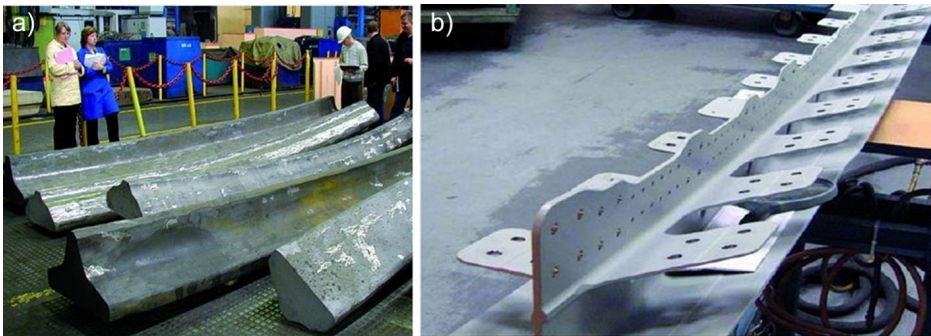


Rys. 1.41. Porównanie czasów obróbki metodą HSC i HPC w zależności od złożoności obrabianych powierzchni [31]

Przykłady części maszyn, które kształtowano metodą obróbki HPC, pokazano na rys. 1.42. W wielu przypadkach masa gotowej części wynosi zaledwie kilka do kilkunastu procent początkowej masy półfabrykatu. W branżach przemysłu kosmicznego czy



Rys. 1.42. Przykłady części maszyn obrabianych metodą HPC (firma „MAPAL”)



Rys. 1.43. Produkcja górnych dźwigarów skrzydeł samolotu „Boeing 787 Dreamliner”:
a) odkuwki, b) dźwigar po obróbce

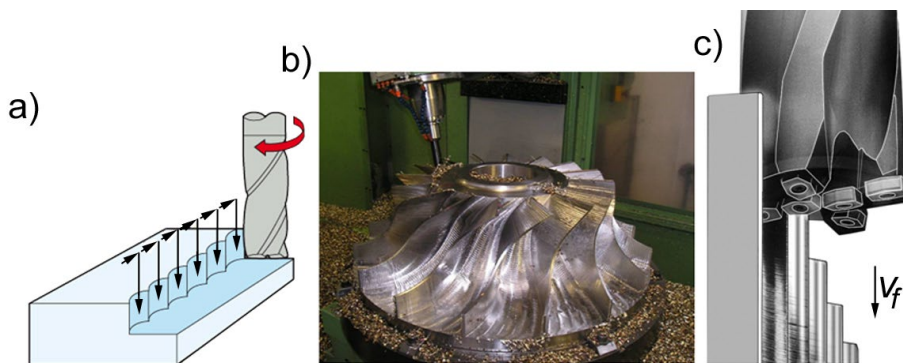
lotniczego od części na ogół wymagany jest wysoki stosunek wytrzymałości do masy oraz jego niezawodna, długotrwała i bezpieczna eksploatacja. Części te zwykle projektowane są jako jednolite i nie wymagają łączenia pojedynczych fragmentów, ponieważ miejsca takich łączeń są najsłabszym ogniwem wyrobu, a tym bardziej w trakcie długich okresów eksploatacji. Obecnie, dzięki stosowaniu wieloosiowych maszyn CNC i nowoczesnych narzędzi obróbkowych, wytwarzanie elementów jednolitych poprzez skrawanie staje się wyjątkowo opłacalne.

Innym przykładem zastosowania HPC jest obróbka górnych dźwigarów skrzydeł samolotu „Boeing 787 Dreamliner” (rys. 1.43). Jako półfabrykaty stosuje się odkuwki ze stopu tytanu, które następnie obrabia się mechanicznie, a ubytek masy osiąga około 88%.

Do metod, które mogą poważnie zwiększyć wydajność obróbki zgrubnej, zaliczyć można frezowanie wgłębne oraz skrawanie HFC, natomiast w przypadku obróbki wykończeniowej zwiększenie wydajności pozwala na zastosowanie specjalnego zarysu ostrzy skrawających. Konieczne jest także podkreślenie ważności wykorzystania specjalnie opracowanych opcji oprogramowania CNC pozwalających na skrócenie długości roboczych ruchów i czasów obróbki.

1.2.2. Frezowanie wgłębne

Przy wykorzystaniu frezów o dużych wysięgach możliwe jest powstawanie drgań samowzbudnych oraz nadmierne wygięcie długiego narzędzia powodujące jego złamanie. Wygięcia i drgania skutkują pogorszeniem się topografii powierzchni obrobionych oraz dokładności wymiarowo-kształtowych. W takich warunkach oraz przy obróbce przedmiotów zawierających cienkie ścianki można się spodziewać znacznych odkształceń obrobionego przedmiotu. Frezowanie obwodem narzędzia powoduje zmniejszenie sił skrawania oraz zmniejszenie przekroju warstwy skrawanej i zmniejszenie wydajności obróbki. W takim przypadku alternatywą staje się zastosowanie tzw. frezowania wgłębnego (rys. 1.44) lub skrawania HFC. W obu tych przypadkach siła całkowita skrawania F działa w kierunku zbliżonym do osi obrotowej (osi symetrii) narzędzia, a nie w kierunku do niej prostopadłym, co powoduje zmniejszenie się odkształceń układu OUPN. Pozwala to na bardziej stabilną pracę, zwiększenie dokładności obróbki, a także na możliwość zwiększenia przekrojów warstwy skrawanej i uzyskiwanie znacznie większej wydajności obróbki.

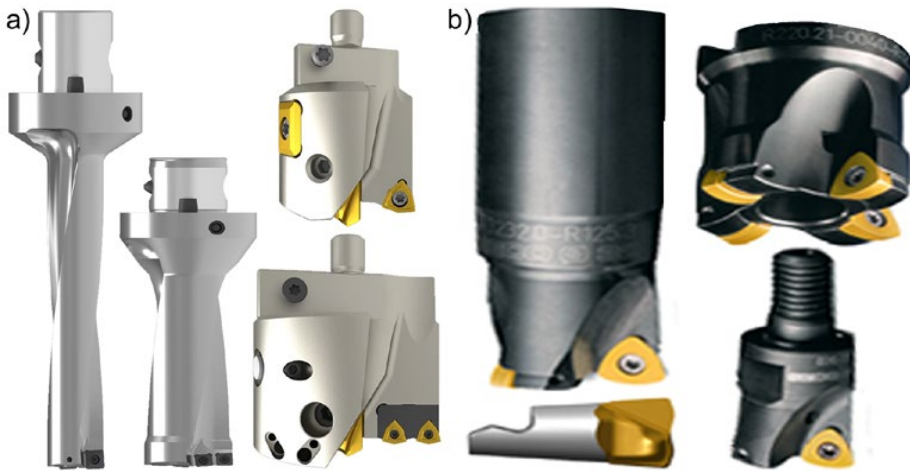


Rys. 1.44. Zasada frezowania wgłębnego (a) i przykłady jego realizacji (b, c)

Uważa się, że czasy obróbki głębokich kieszeni, jakie występują w formach kokiłowych lub matrycach, można skrócić o połowę, stosując frezowanie wgłębne zamiast

obwodowego. Wydajność tej obróbki jest zdecydowanie większa, aczkolwiek jakość i dokładność powierzchni bocznych wymaga dodatkowej obróbki wykończeniowej metodami frezowania obwodowego lub szlifowania.

Narzędzia do frezowania wgłębnego swoim wyglądem i charakterem pracy są podobne do wiertel (rys. 1.45). Niektóre wiertła składane z płytkami wymiennymi wykazują tak dużą sztywność, że są w stanie wiercić otwory w niepełnym materiale z nieco zmniejszonymi parametrami skrawania. W przypadku konieczności mogą one również zastępować frezowanie wgłębne.



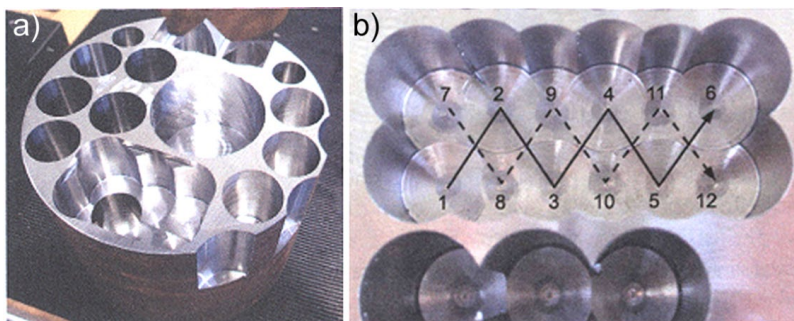
Rys. 1.45. Wiertła (a) i frezy (b) do obróbki HPC różnych firm

Przykłady wiercenia w niepełnym materiale oraz zalecaną kolejność wiercenia podczas wykonywania kieszeni pokazano na rys. 1.46. W pierwszej kolejności wierci się otwory w pełnym materiale, gdyż można wówczas zastosować większe parametry skrawania, a następnie z nieco mniejszą wydajnością wykonuje się wiercenia niepełne.

Metoda frezowania wgłębnego jest przydatna w wielu przypadkach, a mianowicie [19]:

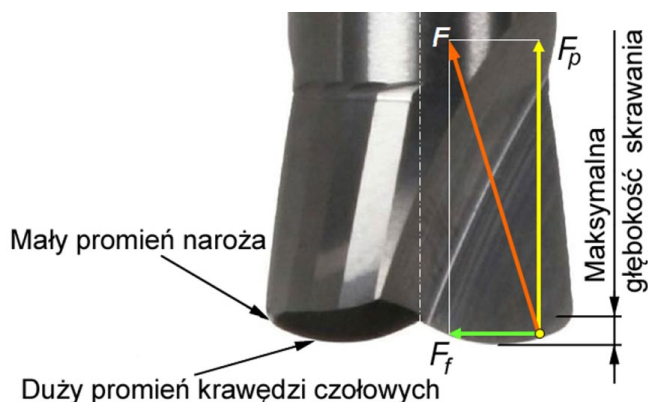
- gdy wymagana jest duża produktywność,
- do kształtowania trudnoobrabialnych materiałów ze średnimi prędkościami skrawania,
- gdy nie jest wymagana duża dokładność i gładkość powierzchni bocznych,
- gdy stosunek głębokości frezowania do średnicy frezu wynosi $l/D > 4$,
- w przypadku stosowania obrabiarek o małej sztywności,
- w przypadku obrabiarek o stosunkowo małej mocy i momencie obrotowym.

W pewnym sensie do metody frezowania wgłębnego jest zbliżona także metoda



Rys. 1.46. Przykłady wiercenia otworów w niepełnym materiale (a) oraz zalecana kolejność ich wykonywania (b) podczas kształtowania kieszeni (wg firmy „Komet”)

skrawania HFS. Przede wszystkim należy zaznaczyć, że przy tej obróbce następuje zmiana kierunku działania siły wypadkowej skrawania F , co pozwala na zmniejszenie siły posuwu F_f działającej w kierunku prostopadłym do osi wrzeciona obrabiarki. W warunkach skrawania konwencjonalnego układ OUPN w tym kierunku ma stosunkowo małą sztywność, co sprzyja powstawaniu drgań samowzbudnych i niestabilnej obróbce. Odpowiednie kształty krawędzi skrawających (rys. 1.47) przy małej głębokości skrawania powodują, że kierunek siły skrawania zmienia się na bardziej spójny z osią obrotową narzędzia, a więc z kierunkiem, w którym układ OUPN ma zdecydowanie większą sztywność. W efekcie można stosować większy posuw, aby zachować, a nawet zwiększyć wydajność obróbki. Duże promienie zaokrąglenia krawędzi czołowych we frezach podczas HFC zapewniają zmniejszenie chropowatości powierzchni obrobionych.










Rys. 1.47. Schemat działania sił przy frezowaniu w warunkach HFC

Występują dwa rodzaje obróbki zgrubnej. W jednym przypadku można stosować znormalizowane płytki wymienne z prostoliniowymi krawędziami skrawającymi położonymi pod niewielkim (mniejszym niż 10°) kątem przystawienia (rys. 1.48). Niewielki kąt przystawienia, oprócz zapewnienia zmiany kierunku działania składowych wypadkowej siły skrawania, zapewnia dodatkowo zmniejszenie grubości warstwy skrawanej, co zwiększa trwałość narzędzia. W wielu przypadkach frezy do skrawania z dużymi posuwami można zastosować także do frezowania wglębnego, jak pokazano w tab. 1.4. W takich warunkach wytwarzają się bardzo szerokie, lecz cienkie wióry. Pozwala to na elastyczną obróbkę we wszystkich kierunkach, w tym także w kierunku odwrotnym w stosunku do obróbki tradycyjnej.

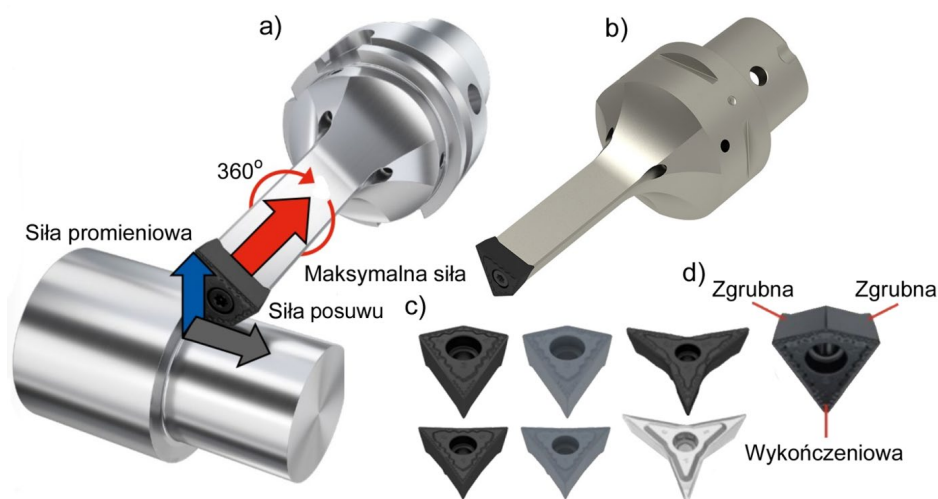


Rys. 1.48. Frezy do obróbki HFC wyposażone w normalizowane płytki wymienne (firma „Iscar”)

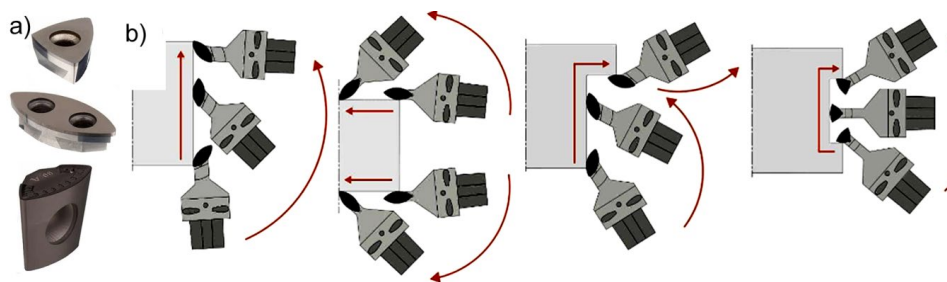
Tabela 1.4. Kształty powierzchni obrabianych w warunkach HFC

Kształt powierzchni obrabianej						
						

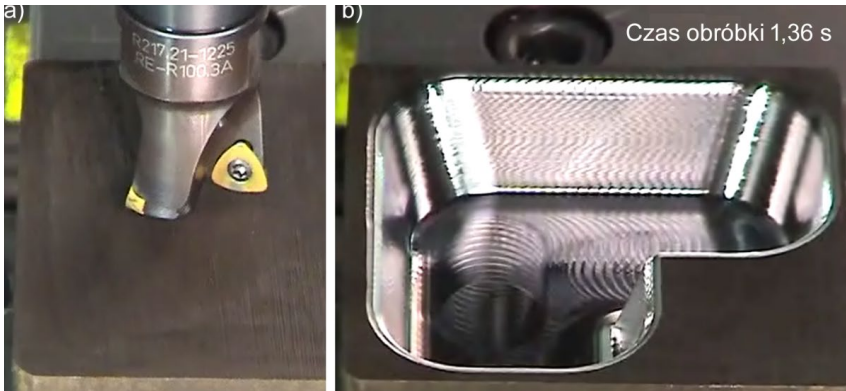
Poza płytkami o kształcie standaryzowanym w obróbce HFC stosuje się płytki o niekonwencjonalnym kształcie. Wyróżnia się dwa sposoby zastosowania takich płytek. W pierwszym do obróbki wykorzystuje się komplet płytek, gdzie każda z nich ma swoje przeznaczenie (rys. 1.49). Dokładne ustawienie płytki w celu obróbki poszczególnych powierzchni zapewnia ruch obrotowy oprawki narzędziowej zamocowanej we wrzecionie maszyny CNC. Zmiana położenia oprawki powoduje poważny wzrost sztywności układu OUPN oraz wzrost dokładności obróbki. W drugim przypadku wykorzystuje się płytki o małych chwilowych kątach przystawienia przy zastosowaniu łukowych krawędzi płytek o dużych promieniach (rys. 1.50 i 1.51).



Rys. 1.49. Zasady toczenia HFC wg firmy „Ceratizit”: a) działanie sił skrawania, b) oprawka narzędziowa o przekroju trójkątnym, c) kształty płytek wymiennych, d) przeznaczenie poszczególnych naroży płytek

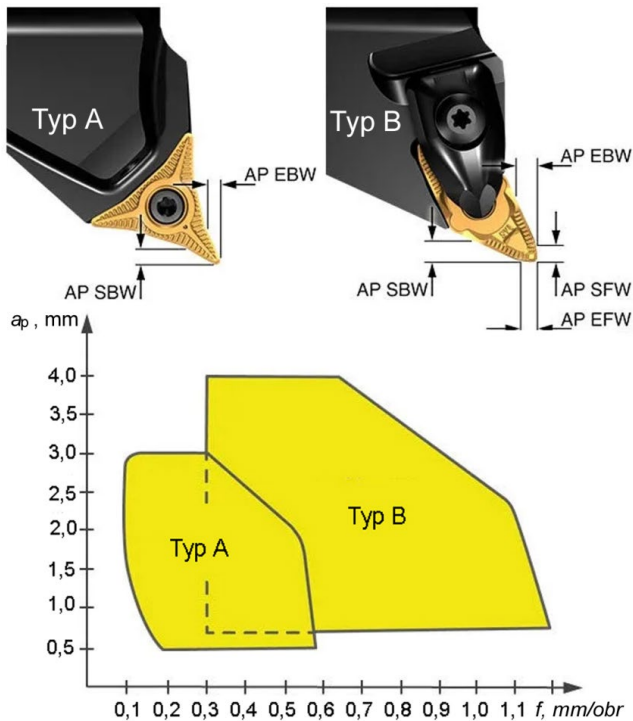


Rys. 1.50. Kształty płytek firmy „Vandurit” z łukowymi krawędziami skrawającymi (a) oraz położenie płytek i oprawek narzędziowych podczas toczenia powierzchni o różnych kształtach (b)



Rys. 1.51. Frez z płytką o łukowym promieniu (a) i kieszeń po frezowaniu HFC (b) (firma „Seco Tools”)

Innym rozwiązaniem frezowania HFC jest zastosowanie płytek o małych kątach naroża (rys. 1.52).



Rys. 1.52. Oprawki z płytkami wymiennymi „CoroTurn® Prime” typów A i B oraz zakresy ich posuwów i głębokości skrawania (firma „Sandvik Coromant”)

- Wykorzystanie oprawek „Prime Turning[™]” i odpowiednich płytek zapewniają:
- możliwość toczenia we wszystkich kierunkach,
 - dwukrotnie wyższe prędkości i posuwy w porównaniu z płytkami tradycyjnymi, co umożliwia osiągnięcie większej wydajności skrawania, ponad 50% w porównaniu z konwencjonalnymi metodami toczenia,
 - dzięki usytuowaniu trzech krawędzi na jednym narożu równomierne rozłożenie zużycia ostrza płytki skrawającej na całej długości, a nie tylko na zaokrąglonym jego fragmencie,
 - wysoką sztywność ich osadzenia w gnieździe oprawki,
 - jednocześnie wraz z wysoką wydajnością, zastosowanie naroża typu Wiper zapewnia niską chropowatość powierzchni obrabianej,
 - możliwość podawania chłodziwa w postaci mgły olejowej przez oprawki, co zapewnia skuteczne odprowadzanie ciepła ze strefy skrawania i przekłada się na zwiększoną trwałość płytek skrawających,
 - dzięki zwiększeniu trwałości płytek unika się wymiany narzędzia w przypadku długiej drogi skrawania, co umożliwia znaczące skrócenie czasu jednostkowego jego pracy,
 - z uwagi na obróbkę w odwrotnym kierunku, eliminuje się możliwość zakleszczania wiórów, często występującą podczas konwencjonalnego toczenia w kierunku wzdłużnym w stronę uchwytu.

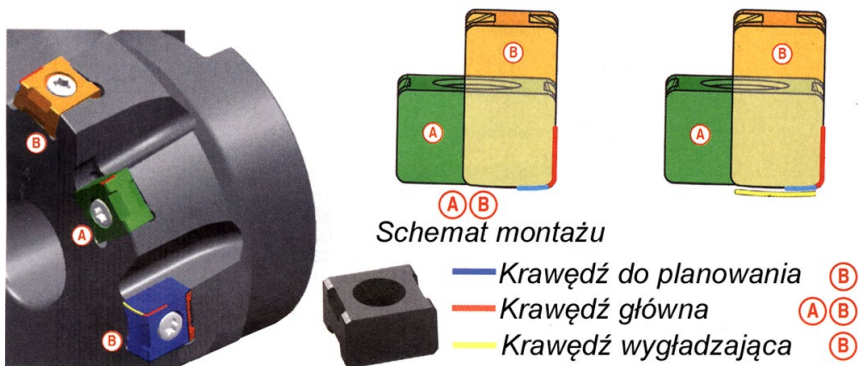
1.2.3. Zwiększenie wydajności obróbki poprzez podział całkowitego naddatku między poszczególnymi ostrzami

W przypadkach obróbki powierzchni o dużych naddatkach można zastosować tzw. frezy jeżowe. W konstrukcjach tych frezów płytki połączone są w sekcjach po kilka sztuk i usytuowane w korpusie w taki sposób, żeby płytki każdej kolejnej sekcji były przesunięte o stały skok, lecz nie większy od $\frac{1}{2}$ sumarycznej długości czynnej krawędzi skrawającej (rys. 1.53). Każda płytka w sekcji pełni tę samą funkcję.

W innych konstrukcjach każda płytka w sekcji pełni odpowiednią funkcję (skrawanie zgrubne, kształtujące itp.), zatem każda płytka powinna być precyzyjnie ustawiona i wyregulowana (rys. 1.54).



Rys. 1.53. Frezy „jeżowe” o wydłużonych krawędziach skrawających różnych firm

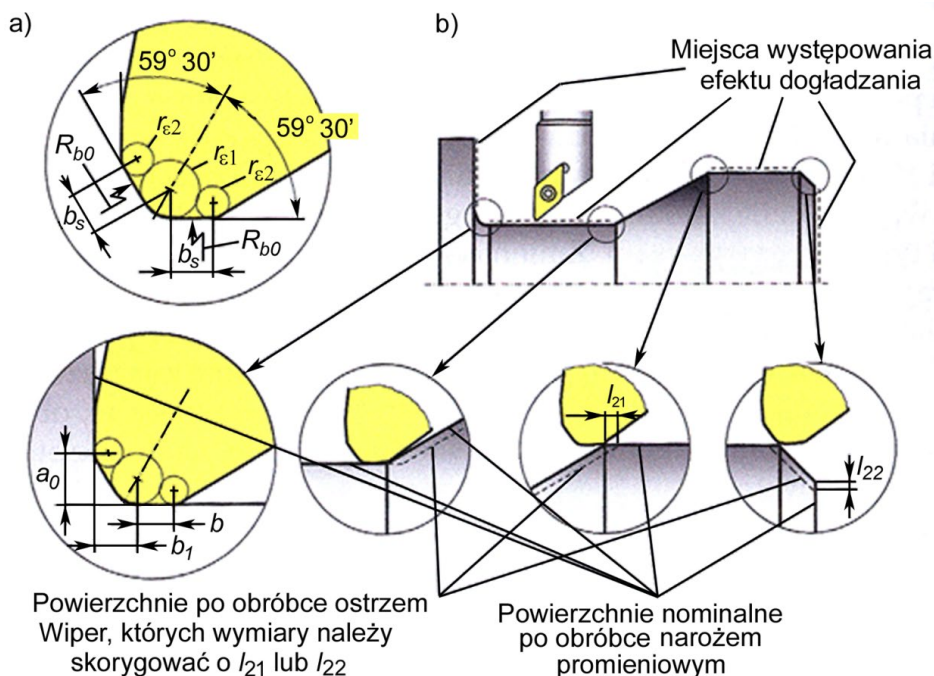


Rys. 1.54. Pojedyncze sekcje (oznaczone jako A i B) i usytuowanie w nich płytek wymiennych o różnym przeznaczeniu (firma „Ceratizit”)

1.2.4. Wysokowydajna obróbka wykończeniowa

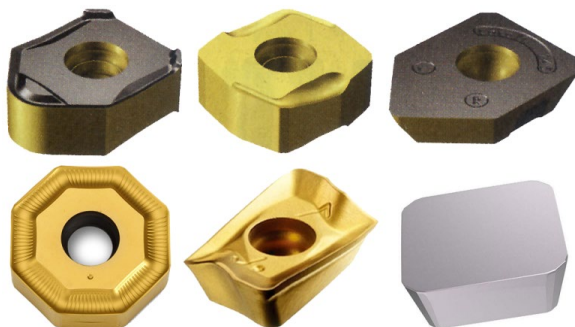
Obecnie narzędzia składane zaopatrzone są w wymienne płytki ze znormalizowanymi promieniami zaokrąglenia naroża według normy ISO. Zmiana zarysu naroża na zarys typu Wiper z „płasko ściętymi” krawędziami pozwala na zwiększenie posuwu z zachowaniem tej samej chropowatości powierzchni lub także przy zachowanym posuwie na jej znaczne zmniejszenie [18].

Geometrie ostrzy typu Wiper różnią się od siebie w zależności od producentów oferującego takie ostrza, co jest znacznym utrudnieniem przy programowaniu maszyn CNC. Niektóre firmy oferujące ostrza typu Wiper podają, jakie korekcje i w jakich miejscach usytuowania naroża względem krawędzi przedmiotu należy zastosować (rys. 1.55). Oferowane są także programy do obliczania takich korekt.



Rys. 1.55. Przykłady różnych korekcji narzędziowych dla naroży płytek typu Wiper i miejsca uzyskiwania efektów ich wykorzystania w celu zmniejszenia chropowatości oraz potencjalnej zmiany wymiarów [18]

Płytki typu Wiper są efektywne także podczas wysokowydajnego frezowania wykończeniowego. Zarys płytek tego typu jest mocno zróżnicowany (rys. 1.56). Wyróżnić można płytki z pojedynczym dużym zaokrągleniem, połączenia odcinków linii prostych z zaokrągleniami itp.



Rys. 1.56. Przykłady płytek frezarskich typu Wiper różnych firm

Jak opisano powyżej, zastosowanie ostrzy typu Wiper w porównaniu z ostrzami konwencjonalnymi umożliwia znaczne zmniejszenie chropowatości powierzchni. W przypadku niskich wartości posuwów zapewnia się około dwukrotne jej zmniejszenie, ponieważ odwzorowanie zarysu naroża w materiale obrabianym przy zastosowaniu niskich posuwów i stosunkowo niewielkich promieniach zaokrąglenia naroża nie wywołuje większych nierówności powierzchni. Ten trend wyraźnie zmienia się dla dużych posuwów, gdzie obserwuje się nawet kilkakrotnie skuteczniejsze wygładzanie powierzchni przy zastosowaniu naroży tego typu. Oznacza to, że korzyści z zastosowania ostrzy Wiper są znacznie większe [31].

1.2.5. Zwiększenie wydajności obróbki poprzez dobór skutecznych ścieżek przejazdów narzędzia

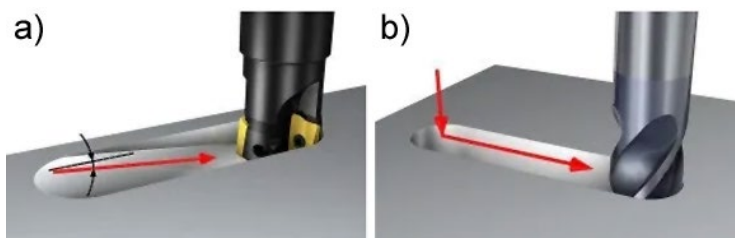
Skrócenie czasu obróbki powierzchni o złożonej geometrii może zostać osiągnięte poprzez zastosowanie odpowiednich funkcji dostępnych w nowoczesnym oprogramowaniu CNC. Obecnie opracowano różne strategie generowania ścieżek narzędzia, których dobór zależy od charakterystyki procesu. W przypadku obróbki powierzchni toczeniem lub frezowaniem z wykorzystaniem narzędzi z wymiennymi płytkami normalizowanymi według normy ISO wymagane trajektorie ruchu narzędzia są realizowane z zastosowaniem interpolacji kołowej lub parabolicznej.

Znacznie bardziej utrudnione jest frezowanie powierzchni o skomplikowanych kształtach, a więc przede wszystkim rowków i wgłębień. Istnieje wiele sposobów obróbki tego typu powierzchni, do których zaliczają się m.in.:

- zagłębianie liniowe skośne (2-osiowe),
- zagłębianie kołowe skośne (z interpolacją śrubową),
- poszerzanie otworu (wytaczanie),

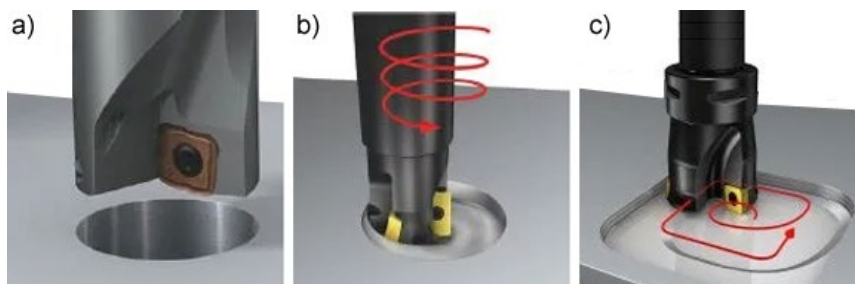
- frezowanie zewnętrzne z interpolacją śrubową,
- frezowanie wgłębne,
- frezowanie z przybraniem osiowym,
- frezowanie poprzez wiele przejść,
- frezowanie zamkniętych kieszeni lub kątów ostrych.

Otwarcie w pełnej powierzchni przedmiotu odbywa się przez liniowe zagłębienie skośne lub frezowanie z przybraniem osiowym (rys. 1.57). Liniowe zagłębienie skośne (jednocześnie wzdłuż dwóch osi) jest preferowaną metodą względem frezowania z przybraniem osiowym, ponieważ w tym drugim przypadku formowane wióry często są za długie i trudne do odprowadzenia, a opory skrawania wysokie.



Rys. 1.57. Schematy tworzenia otwarcia w pełnej powierzchni przedmiotu: a) zagłębienie skośne i b) przybranie osiowe (według firmy „Sandvik Coromant”)

Obróbka otworów i kieszeni frezowaniem zaczyna się od ich otwarcia w pełnej powierzchni przedmiotu poddanego obróbce (rys. 1.58). Tradycyjną i jednocześnie najszybszą metodą wykonywania otworów jest wiercenie, lecz w niektórych przypadkach może być utrudnione łamanie wiórów, a także nie zawsze możliwe jest wykonywanie otworów o wymaganych średnicach i kształtach innych niż okrągłe.

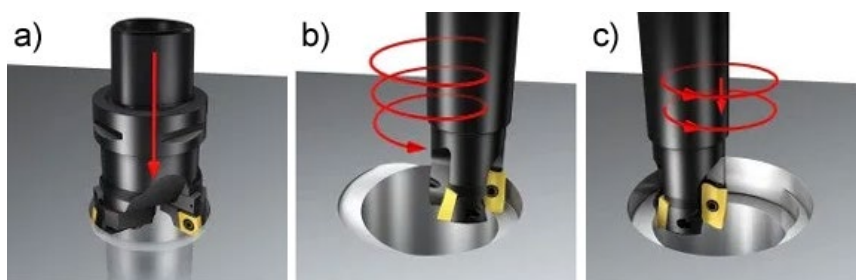


Rys. 1.58. Schematy otwierania otworu lub wybrania: a) wierceniem, b) kołowym zagłębieniem skośnym, c) zagłębieniem skośnym kieszeni (według firmy „Sandvik Coromant”)

Kołowe zagłębianie skośne zwane także frezowaniem z interpolacją śrubową (odbywa się przy użyciu trzech osi jednocześnie) jest mniej produktywnie niż wiercenie, ale może być skuteczne przy:

- ograniczonej mocy obrabiarki dla otworów o dużej średnicy,
- mniejszych seriach produkcyjnych (dla średnic powyżej 25 mm i dla maksymalnie około 500 otworów),
- obróbce otworów o zróżnicowanych rozmiarach,
- ograniczonej przestrzeni magazynu narzędziowego na przechowywanie wiertel o różnych rozmiarach,
- wykonywaniu otworów nieprzelotowych o płaskim dnie,
- przedmiotach cienkościennych o małej sztywności,
- obróbce powierzchni przerywanych,
- obróbce materiałów cechujących się komplikacjami w łamaniu i odprowadzaniu wiórów,
- frezowaniu otworów nieokrągłych, tj. wybrań i kieszeni.

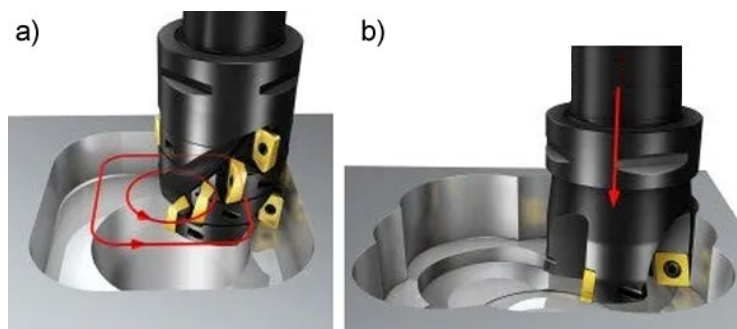
W przypadku poszerzania otworu skuteczną metodą jest wytaczanie, lecz frezowanie jest również dobrą alternatywą (rys. 1.59). W przypadku frezowania można zastosować strategię obróbki przez zagłębianie z interpolacją śrubową lub zagłębianie z interpolacją kołową. Kołowe zagłębianie skośne (z interpolacją śrubową) jest korzystniejsze, jeśli głębokość otworu przekracza maksymalną wartość osiowej głębokości skrawania lub w warunkach powstawania drgań. Frezowanie zapewnia także lepszą okrągłość i współosiowość otworów.



Rys. 1.59. Schematy poszerzania otworu przez: a) wytaczanie, b) kołowe zagłębianie skośne (z interpolacją śrubową), c) frezowanie z interpolacją kołową

W przypadku poszerzania kieszeni można zastosować następujące strategie obróbki (rys. 1.60):

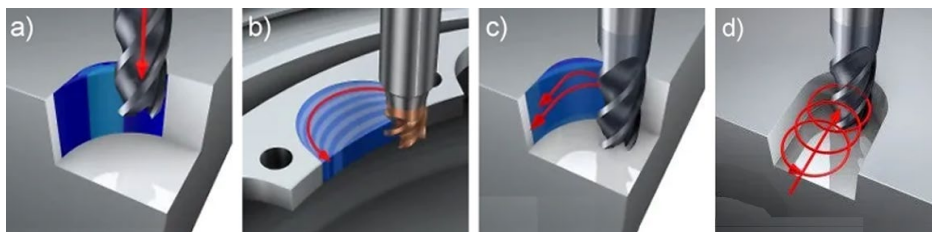
- zagłębianie skośne, ponieważ wymaga użycia tylko jednego narzędzia i może służyć do tworzenia kształtów trójwymiarowych, dzięki czemu nadaje się do frezowania profilowego,



Rys. 1.60. Schematy poszerzania kieszeni przez:
a) wewnętrzne frezowanie walcowo-czołowe, b) frezowanie wgłębne

- frezowanie wgłębne (często rozwiązuje problemy z długimi wysięgami i/lub głębokimi wybraniami).

Po zakończeniu obróbki zgrubnej zagłębienia na jego powierzchni często pozostaje nadatek, zwłaszcza w narożnikach. Frezowanie wgłębne przy użyciu frezu o mniejszej średnicy jest jedną z metod osiągnięcia wymaganego kształtu (rys. 1.61). Metoda wielu przejść to jest inna technika używana do frezowania narożników. Frezowanie trochoidalne może być zastosowane także do frezowania rowków, kieszeni itp.



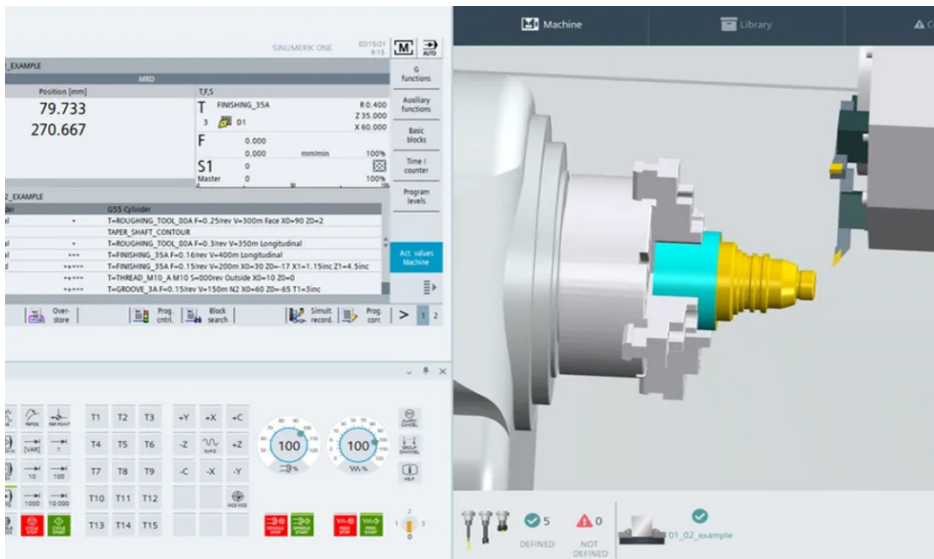
Rys. 1.61. Schematy usuwania nadatku pozostałego po obróbce zgrubnej: a) frezowanie wgłębne w narożnikach, b) i c) metody wielu przejść, d) frezowanie trochoidalne

Innym podejściem w opracowywaniu programów obróbki jest system SINUMERIK ONE oferowany przez firmę „Siemens”, który zapewnia kompleksowe zarządzanie maszynami CNC, umożliwiając realizację wymaganych strategii obróbki. System SINUMERIK ONE jest zaawansowanym rozwiązaniem sterowania obróbką, który integruje funkcje cyfrowego bliźniaka rzeczywistej obrabiarki, umożliwiając pełną symulację procesów obróbki jeszcze przed ich fizyczną realizacją. Dzięki temu możliwe jest testowanie programów CNC, optymalizowanie parametrów technologicznych skrawania i unikanie błędów jeszcze na etapie planowania procesu technologicznego. System SINUMERIK ONE wspiera wiele strategii obróbki, m.in.:

- HSC umożliwiającą wysoką prędkość skrawania przy zachowaniu wysokiej jakości powierzchni,
- HPC zapewniającą maksymalną wydajność skrawania przy intensywnym wykorzystaniu mocy obrabiarki,
- Trochoidal Milling (ang. *frezowanie trochoidalne*) zapewniające zmniejszenie siły skrawania i zwiększenie trwałości narzędzi,
- Adaptive Control (ang. *sterowanie adaptacyjne*) umożliwiające dynamiczne dostosowanie parametrów obróbki w czasie rzeczywistym w celu maksymalizacji efektywności procesu.

Dzięki wysokiej mocy obliczeniowej system SINUMERIK ONE pozwala na płynną kontrolę trajektorii narzędzi, co ma kluczowe znaczenie w warunkach wymagających precyzyjnej interpolacji, np. w obróbce 5-osiowej. Aby bardziej usprawnić proces planowania i wdrażania programów obróbki, SINUMERIK ONE wyposażono w platformę przeznaczoną dla cyfrowych bliźniaków – Run MyVirtual Machine, która pozwala na realistyczne odwzorowanie wszystkich operacji realizowanych przez cyfrowego bliźniaka (rys. 1.62). Dzięki Run MyVirtual Machine możliwe jest:

- testowanie i optymalizowanie kodów NC bez konieczności angażowania rzeczywistej maszyny,
- wczesne wykrywanie kolizji i błędów programowych,
- analizowanie i dostosowanie strategii obróbczych pod względem ich efektywności,
- integrowanie z systemami CAD/CAM w celu automatyzacji programowania.



Rys. 1.62. Widok cyfrowego bliźniaka maszyny CNC

Platforma Run MyVirtual Machine ma kluczowe znaczenie w przypadku wdrażania i realizacji strategii HSC i HPC, ponieważ pozwala na symulację dynamicznych zmian parametrów technologicznych skrawania i ich bezpośredniego wpływu na realizację procesu obróbki.

W nowoczesnych maszynach CNC system sterowania numerycznego często współpracuje z programowalnym sterownikiem logicznym (ang. *programmable logic controller*, PLC), który odpowiada za automatyzację procesów pomocniczych. W przypadku systemu SINUMERIK ONE kluczową rolę odgrywają SIMATIC S7-1500F, IPC oraz ET200pro, będące zaawansowanymi sterownikami PLC z funkcjami bezpieczeństwa (ang. *Fail-Safe*). Główne zadania SIMATIC to:

- sterowanie układami pomocniczymi obrabiarki (systemy chłodzenia, smarowania, podajniki narzędzi),
- zarządzanie cyklami automatycznymi i procedurami diagnostycznymi,
- realizacja funkcji bezpieczeństwa zgodnie z normami SIL (ang. *Safety Integrity Level*),
- komunikacja z systemami nadrzędnymi w środowisku Przemysłu 4.0.

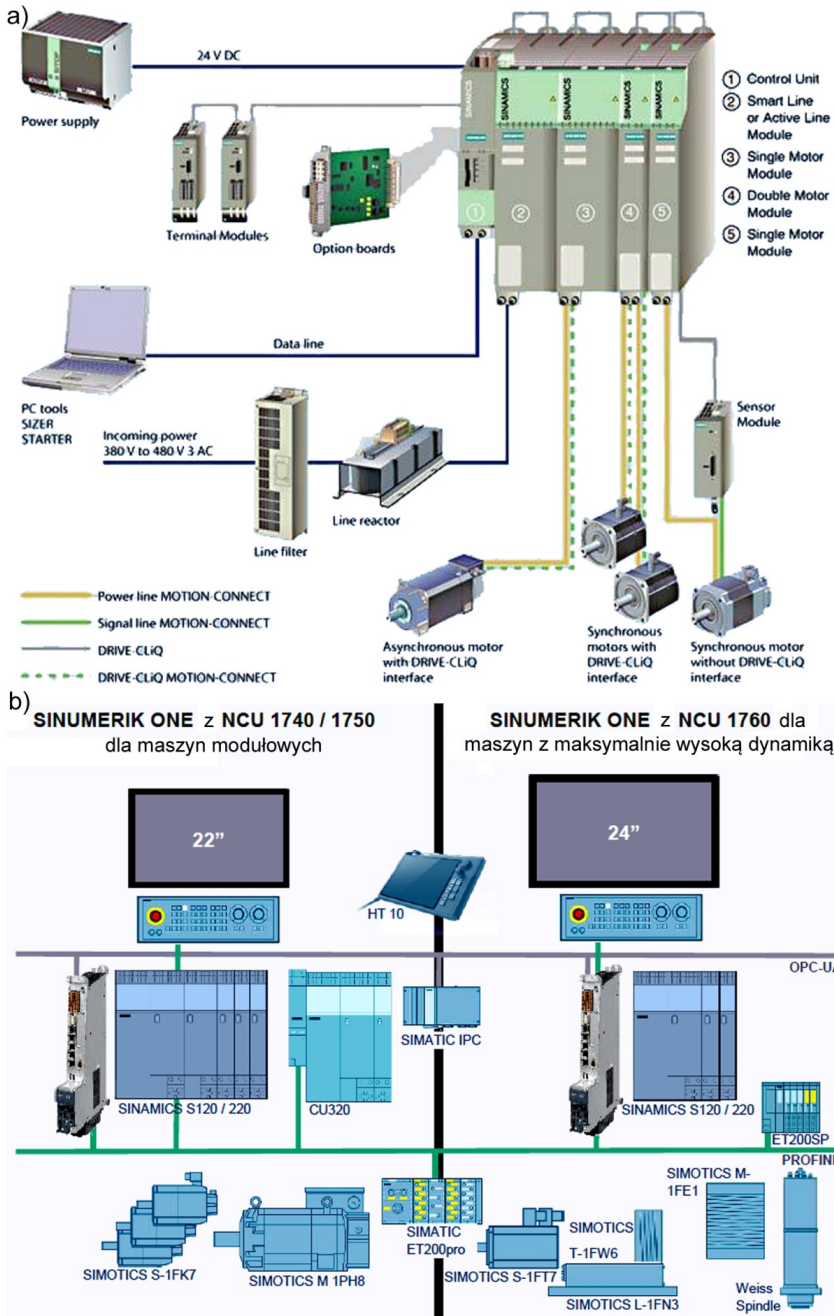
Dzięki wysokiej wydajności oraz rozbudowanej strukturze programistycznej rozwiązania SIMATIC pozwalają na pełną synchronizację z systemem CNC, eliminując opóźnienia i zapewniając płynne przejścia między operacjami technologicznymi.

Układ napędowy ma kluczowe znaczenie dla wydajności pracy maszyn CNC, a jego zaawansowana konstrukcja wpływa na jakość obróbki oraz możliwość realizacji skomplikowanych trajektorii ruchów narzędzi skrawających. SINAMICS S120 i S220 stanowią modułowe systemy napędowe, które oferują wysoką precyzję sterowania momentem i prędkością obrotową wrzeciona, a także osiami obrabiarek. Do podstawowych cech napędów SINAMICS należą:

- dynamiczna regulacja prędkości i momentu obrotowego wrzeciona umożliwiająca precyzyjne dostosowanie parametrów technologicznych skrawania,
- współpraca z czujnikami położenia zapewniająca wysoką dokładność pozycjonowania,
- obsługa strategii HSC i HPC redukująca drgania i optymalizująca liczbę przejść pomiędzy segmentami trajektorii ruchów narzędzi skrawających,
- systemy rekuperacyjne, które odzyskują energię podczas hamowania, co obniża koszty eksploatacyjne.

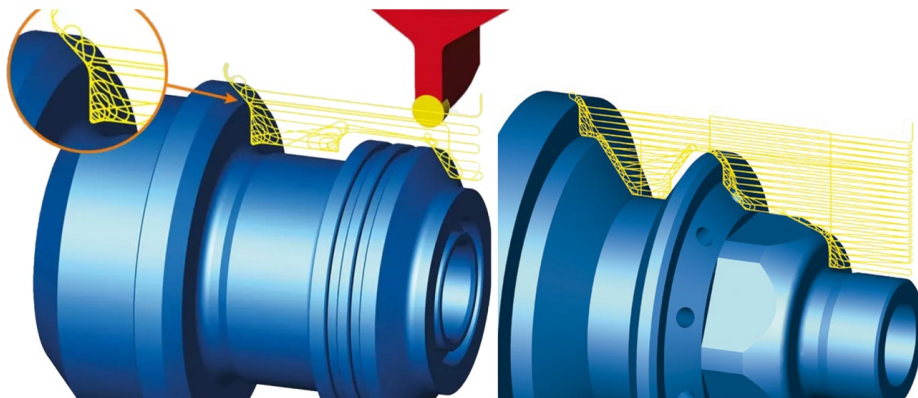
Schemat modułowych systemów napędowych SINAMICS oraz ich połączenie SINUMERIK ONE dla maszyn modułowych pokazano na rys. 1.63.

W kontekście Przemysłu 4.0 opracowanie rozpatrywanych technologii umożliwia pełną integrację maszyn CNC z inteligentnymi systemami zarządzania produkcją, co stanowi kluczowy element nowoczesnych zakładów produkcyjnych.



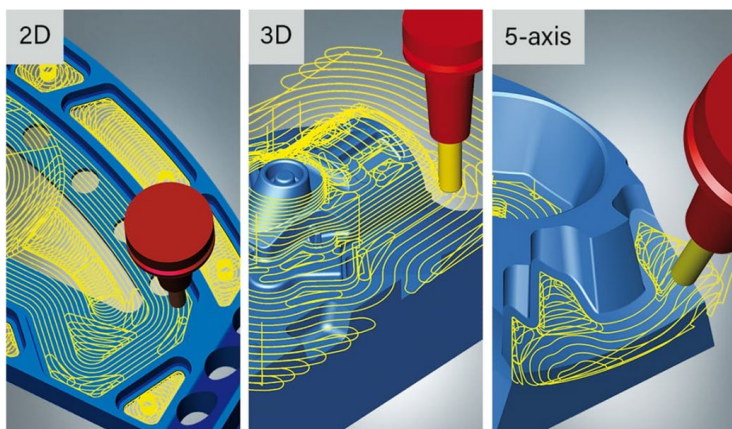
Rys. 1.63. Schemat modułowych systemów napędowych SINAMICS (a), a także ich połączenie SINUMERIK ONE dla maszyn modułowych (b)

Bardziej skomplikowane ścieżki obróbkowe dla płytek o krawędziach łukowych wymagają specjalistycznego oprogramowania (rys. 1.64).



Rys. 1.64. Ścieżki obróbki toczenia powierzchni o skomplikowanych kształtach (oprogramowanie High-Performance Turning, firmy „OPEN MIND Technologies AG”)

Kształtowanie kieszeni i wgłębień trójwymiarowych można zapewnić, wykorzystując oprogramowanie High-Performance Milling. Strategie ścieżek narzędzia są znacznie bardziej skomplikowane, ale i wydajność obróbki nieporównywalnie większa od frezowania konwencjonalnego. Przykładowe trajektorie obróbki powierzchni o skomplikowanych kształtach pokazano na rys. 1.65.



Rys. 1.65. Ścieżki obróbki frezowaniem powierzchni o skomplikowanych kształtach (oprogramowanie High-Performance Milling, firmy „OPEN MIND Technologies AG”)

Obecnie stosuje się trzy odmiany oprogramowania High-Performance Milling:

- obróbkę 2.5D, zapewniającą konwencjonalne frezowanie i wiercenie,
- frezowanie 3D, umożliwiające szybkie, niezawodne i efektywne kształtowanie prostych i złożonych elementów o wysokiej jakości powierzchni,
- 5-osiową symultaniczną obróbkę bazującą na frezowaniu za pomocą narzędzia pochylonego i o zaokrąglonych powierzchniach.

Zastosowanie nowoczesnego oprogramowania zapewnia:

- maksymalną żywotność narzędzia,
- inteligentną regulację prędkości posuwu,
- maksymalną wydajność w usuwaniu materiału,
- inteligentny podział odcinków ścieżek obróbki.

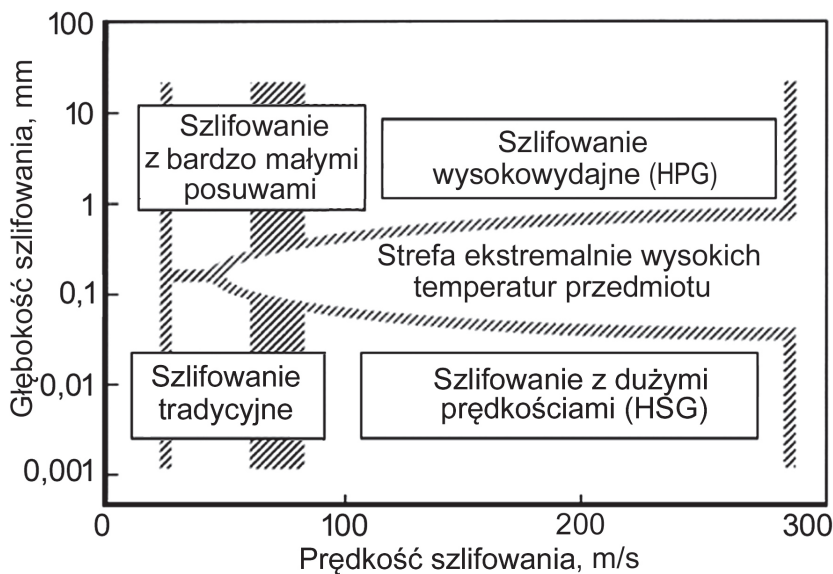
INTENSYFIKACJA PROCESÓW OBRÓBKI SZLIFOWANIEM

W każdym procesie usuwania materiału parametry szlifowania mają bezpośredni wpływ na jego przebieg i uzyskiwane wyniki. Oprócz wydajności parametry szlifowania wpływają na grubość wióra kształtowanego na pojedynczych ziarnach, chropowatość powierzchni obrobionej czy także siły i energię właściwą obróbki. Parametry szlifowania, które można wymienić, to:

- szerokość szlifowania,
- głębokość szlifowania,
- prędkość posuwu,
- prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego,
- prędkość szlifowania.

Podczas gdy szerokość szlifowania zależy głównie od szerokości szlifowanego elementu i ściernicy, to pozostałe parametry mogą być dobierane dowolnie. Kombinacja głębokości skrawania i prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego określa wydajność usuwania materiału, która ma bezpośredni wpływ na produktywność procesu. Prędkość szlifowania nie ma wpływu na produktywność, ale ma duży wpływ na grubość wióra. Kombinacja wyżej wymienionych parametrów i ich wartości nie tylko wpływają na cechy wiórów, ale również określają szczegóły procesu.

Proces szlifowania ewoluował od szlifowania konwencjonalnego (niska wydajność właściwa i prędkość szlifowania) do szlifowania z dużymi prędkościami (niska wydajność właściwa i wysokie prędkości szlifowania). Jednocześnie wprowadzono szlifowanie z niskimi (tzw. pełzającymi) posuwami (wysoka wydajność właściwa i niska prędkość szlifowania). Wynalezienie sztucznych superścierniw doprowadziło ostatecznie do szlifowania wysokowydajnego (wysoka wydajność właściwa i wysoka prędkość skrawania), a także najbardziej produktywnego ze wszystkich procesów szlifowania (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Podział różnych procesów szlifowania w odniesieniu do głębokości i prędkości skrawania (na podstawie [32])

2.1. Współczesne konstrukcje ściernic

Kwestie związane z rozwojem konstrukcji narzędzi ściernych, m.in. współczesne materiały ściernicze, spoiwa, cechy ziaren ściernych oraz ściernice o podwyższonej wytrzymałości i ściernice o nieciąglych powierzchniach roboczych, autorzy przedstawiali w podręczniku zatytułowanym *Wybrane zagadnienia wysokowydajnej obróbki mechanicznej: podręcznik* [33]. Dlatego w tym podrozdziale opisano zagadnienia dotyczące modyfikacji materiałów ściernych oraz spoiw w konstrukcjach ściernic.

Obecnie można wyróżnić cztery grupy materiałów ściernych, a mianowicie tlenki glinu (Al_2O_3), węgliki krzemu (SiC), sztuczne diamenty (DS) i regularny azotek boru (CBN). W każdej grupie wyodrębnia się wiele różnych gatunków materiałów w zależności od technologii wytwarzania, szczegółów stopowania itp. Na przykład na bazie tlenków glinu można produkować elektrokorundy, monokorundy i elektrokorundy stopowane tlenkami chromu Cr_2O_3 , tytanu TiO_2 , cyrkonu ZrO_2 , niobu Nb_2O_5 i inne.

Ziarna z materiałów konwencjonalnych produkuje się w piecach elektrycznych z rozdrabnianiem mechanicznym i segregacją wymiarową (rys. 2.2).

W ostatnich latach pojedyncze ziarna ściernic wytwarza się spiekaniem nanocząstek elektrokorundu lub węgliki krzemu. Możliwa jest również produkcja ziaren o różnych kształtach (rys. 2.3).

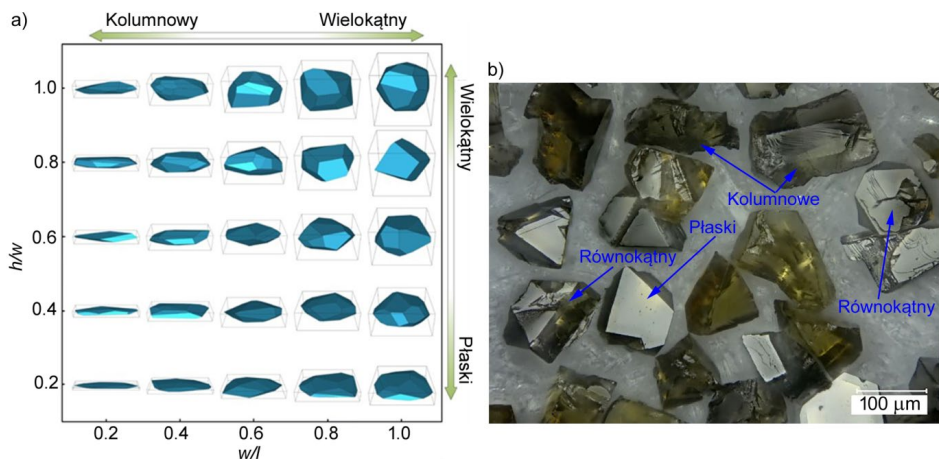


Rys. 2.2. Ziarna ściernie po rozdrobnieniu mechanicznym (na podstawie [34])



Rys. 2.3. Kształty ziaren spiekanych (firma „Shandong Renwa Abrasive Tech.”)

Analiza kształtów pojedynczych ziaren z materiałów supertwardych umożliwia stwierdzenie, że w trakcie ich wytwarzania występuje wiele kształtów zależnych od stosunków długości l , szerokości b i grubości h ziarna: kolumnowe, spłaszczone i wyrównane (izometryczne) (rys. 2.4).



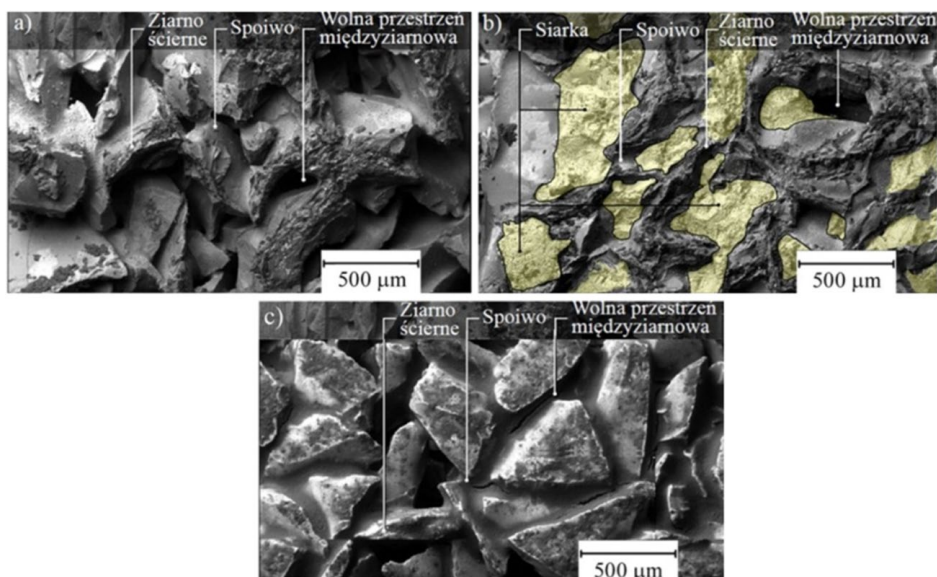
Rys. 2.4. Kształty ziaren z materiałów supertwardych [35]

Od lat w produkcji i użytkowaniu ściernic najczęściej stosuje się cztery rodzaje spoiw łączących ziarna ściernic w całość, a są nimi spoiwa ceramiczne, żywiczne, gumowe i metalowe. Przy czym, w zależności od materiału przedmiotu, wymagań względem stanu warstwy wierzchniej, wymiarów i kształtów ściernic itp., każda grupa może zawierać wiele gatunków. W ostatnich latach podjęto próby wykorzystania spoiw niekonwencjonalnych i impregnowanych dodatkami nieorganicznymi oraz organicznymi.

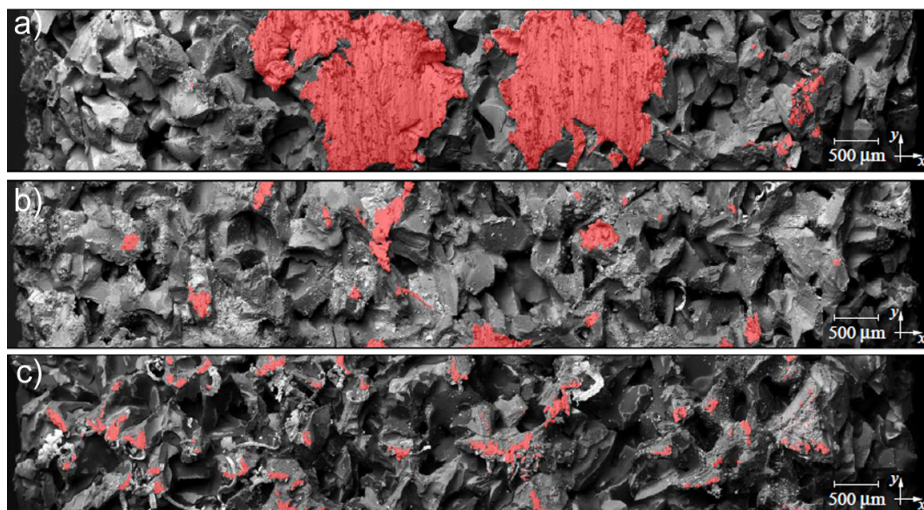
W warunkach szlifowania z dużymi prędkościami i szlifowania wysokowydajnego istotnym problemem jest intensywne zalepianie wiórami czynnej powierzchni ściernicy. Zapobieganie występowaniu tego zjawiska można zapewnić poprzez wprowadzenie do struktury ściernicy różnego rodzaju impregnatów, np. węgla alotropowego lub siarki.

Powierzchnie ściernic nieimpregnowanych oraz impregnowanych siarką i węglem alotropowym pokazano na rys. 2.5. Można zauważyć bardzo skuteczne impregnowanie ściernicy siarką i jej przenikanie w pory ściernicy. Mikrocząstki węgla alotropowego osadzają się na powierzchniach ziaren, zmniejszając współczynnik tarcia i intensywność łączenia adhezyjnego materiału ziaren i materiału obrabianego.

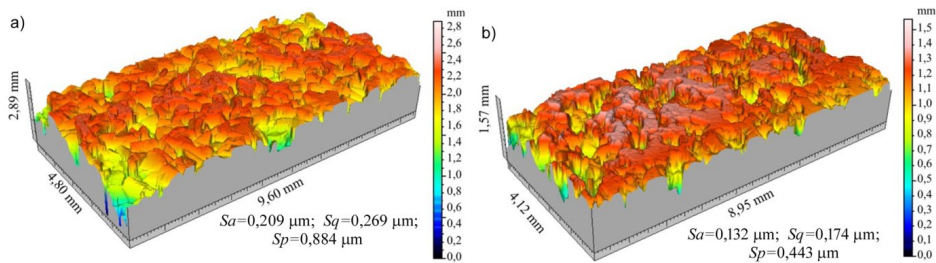
Następstwem impregnacji jest znaczne zmniejszenie liczby porów i sumarycznej powierzchni zalepiania wióra na czynnej powierzchni ściernicy (rys. 2.6). W stanie nieimpregnowanym zalepienia mają postać dużych i względnie grubych płatków, natomiast obecność siarki, a jeszcze bardziej węgla alotropowego, zdecydowanie zmniejsza obszary nalepiania, co z kolei prowadzi do znaczącego zmniejszenia (1,6 razy) parametrów tekstury powierzchni po szlifowaniu (rys. 2.7). Efektywna jest także impregnacja ściernic materiałami organicznymi (rys. 2.8).



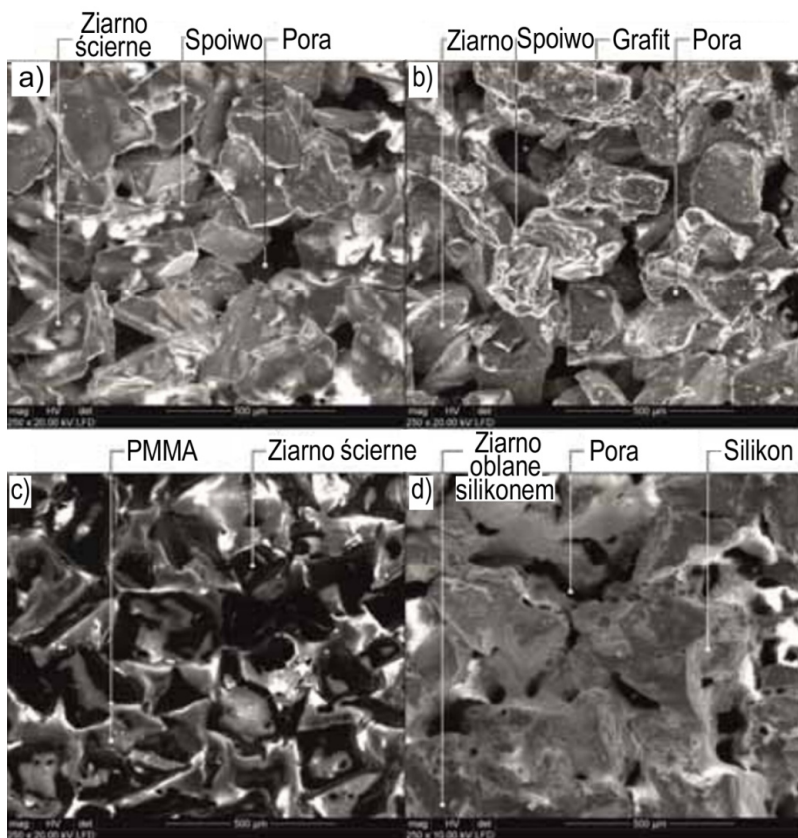
Rys. 2.5. Czynne powierzchnie ściernic: nieimpregnowanych (a) oraz ściernic impregnowanych siarką (b) i węglem alotropowym (c) (na podstawie [36])



Rys. 2.6. Zalepienie czynnych powierzchni ściernic nieimpregnowanych (a) oraz ściernic impregnowanych siarką (b) i węglem alotropowym (c) (na podstawie [36])

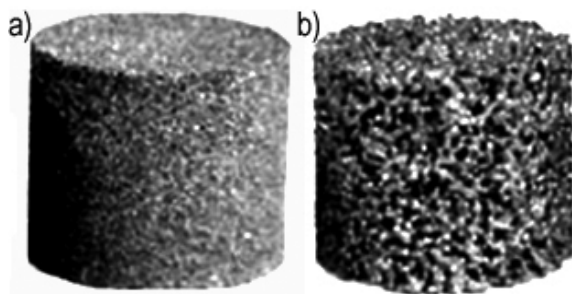


Rys. 2.7. Topografia powierzchni szlifowanych ściernicą nieimpregnowaną (a) i ściernicą impregnowaną siarką (b) (na podstawie [36])



Rys. 2.8. Powierzchnie ściernic przed szlifowaniem: a) ściernica nieimpregnowana, b) ściernica impregnowana grafitem, c) ściernica impregnowana polimetakrylanem metylu (PMMA), d) ściernica impregnowana silikonem [37]

Na efektywność procesu szlifowania ma także wpływ porowatość (struktura) ściernic (rys. 2.9). Zwiększenie objętości porów przy jednoczesnym zwiększeniu wytrzymałości ściernic ułatwia zarówno proces odprowadzenia mikrowiórów ze strefy szlifowania, jak i doprowadzenia chłodziwa bezpośrednio do strefy szlifowania.



Rys. 2.9. Ściernice o porowatości (a) konwencjonalnej i (b) zwiększonej, Vortex 2 (na podstawie danych firmy „Saint-Gobain Abrasives”)

Proces szlifowania cechuje się bardzo wysokimi lokalnie występującymi temperaturami, wyższymi niż temperatura topnienia materiału. W celu ich zmniejszenia stosuje się różne metody chłodzenia, m.in. zalewową, strumieniowo-ciśnieniową lub kriogeniczną (ciekłym azotem). Ponadto stosuje się także doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego przez ściernicę na podstawie działania sił odśrodkowych.

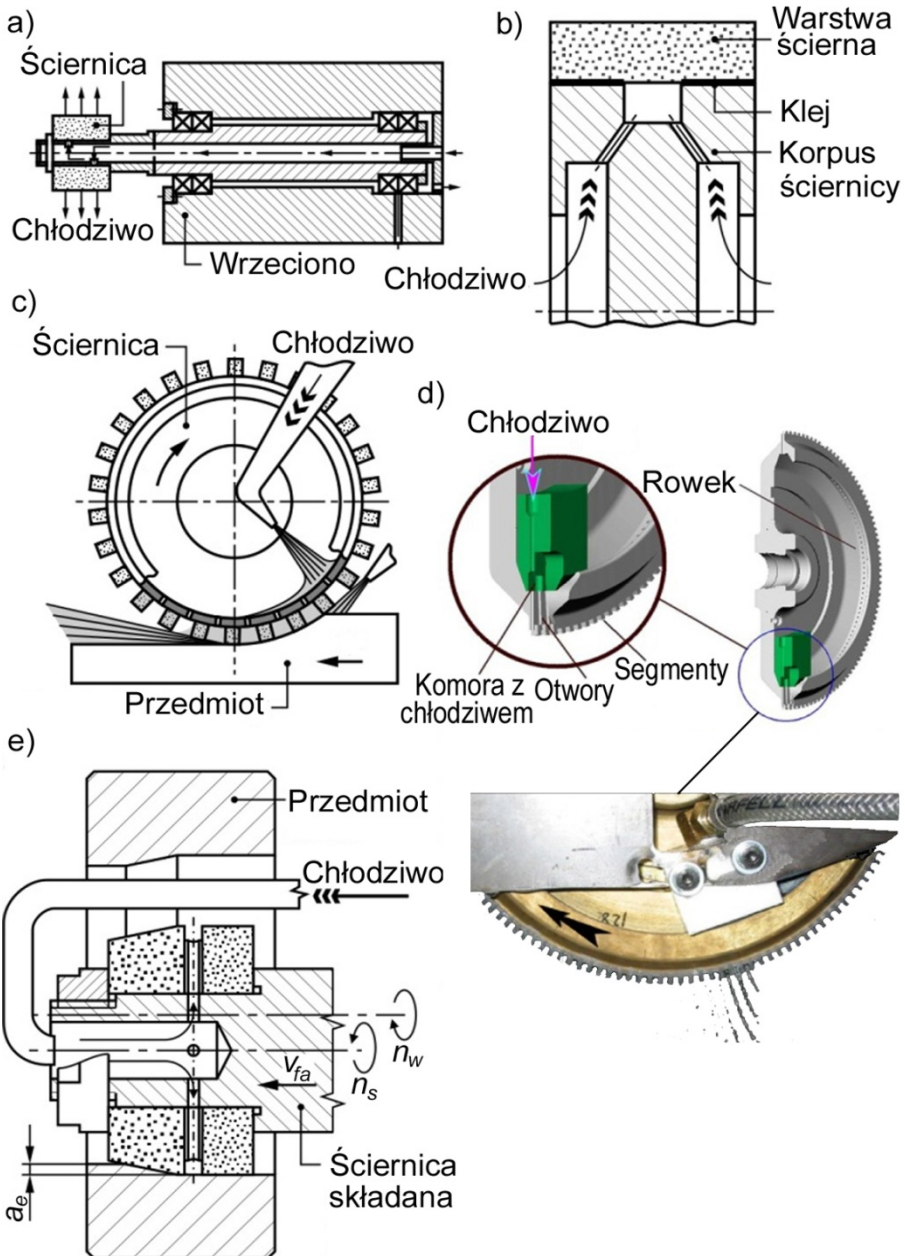
Do zalet odśrodkowego doprowadzenia chłodziwa do strefy styku ściernicy z materiałem obrabianym można zaliczyć [38]:

- skuteczne dotarcie chłodziwa do strefy szlifowania, pozwalające na zmniejszenie lub eliminację defektów cieplnych powierzchni obrabianej,
- znaczącą poprawę chłodzenia i smarowania strefy szlifowania w porównaniu z tradycyjną metodą zalewową,
- możliwość zmniejszenia wydatku chłodziwa, dzięki czemu można uzyskać korzystne efekty ekonomiczne i ekologiczne.

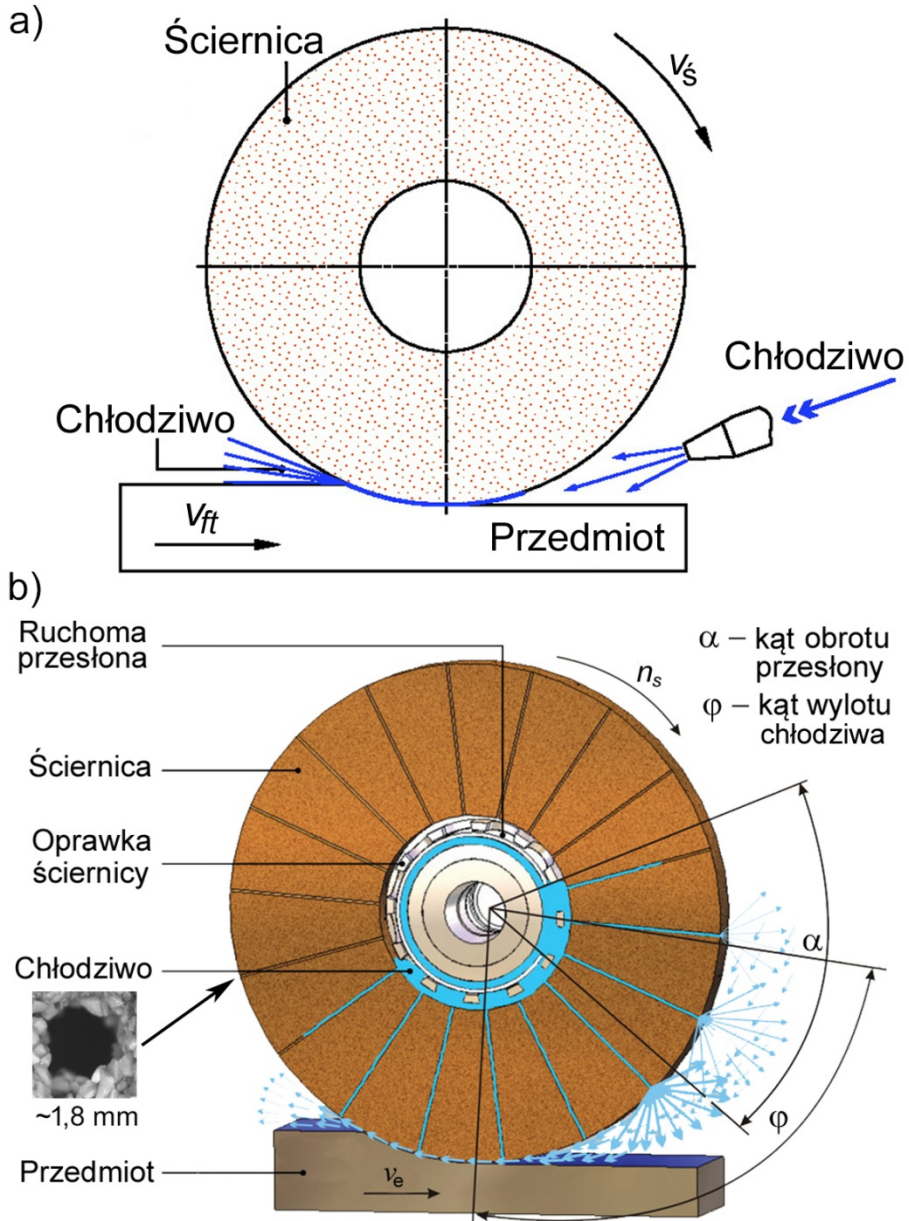
Metody te cechują się kilkoma utrudnieniami, do których zaliczyć można [38]:

- konieczność stosowania specjalnych systemów podawania chłodziwa,
- ograniczenia przy podawaniu chłodziwa przez pory ściernicy, gdzie skuteczność chłodzenia zależy w dużej mierze od zapewnienia otwartości struktury ściernicy,
- w wielu przypadkach konieczność stosowania nietypowej konstrukcji korpusu ściernicy.

Podstawowe schematy doprowadzenia chłodziwa do strefy szlifowania przez ściernicę przedstawiono na rys. 2.10.



Rys. 2.10. Schematy systemów odśrodkowego doprowadzenia chłodziwa do strefy szlifowania: a) poprzez wrzeciono szlifierskie i ściernicę, b) poprzez pory ściernicy i kanały w korpusie, c), d) poprzez kanały w korpusie ściernicy i przestrzeń pomiędzy segmentami ściernymi, e) poprzez kanały w przekładce rozdzielającej części ściernicy (na podstawie [38])



Rys. 2.11. Schemat chłodzenia strefy szlifowania metodą zalewową (a) i przez kanały w ściernicy (b) (na podstawie [39, 40])

Bardziej szczegółowo chłodzenie strefy szlifowania poprzez kanały w ściernicy w porównaniu z chłodzeniem zalewowym pokazano na rys. 2.11. Tradycyjna metoda zalewowa nie zapewnia skutecznego doprowadzania chłodziwa, ponieważ struga powietrza otaczająca ściernicę odpycha chłodziwo i uniemożliwia jego przenikanie do przestrzeni przedmiot–ściernica. Kanały utworzone w ściernicy sprzyjają przenikaniu chłodziwa bezpośrednio do strefy szlifowania, a obecność obrotowej przesłony zapewnia dodatkowy strumień i ulepsza zmywanie ściernicy i odprowadzenie wiórów.

2.2. Szlifowanie z dużymi prędkościami (HSG)

Szlifowanie z dużymi prędkościami (ang. *High Speed Grinding*, HSG) jest procesem obróbki przedmiotów za pomocą narzędzi szlifierskich przy prędkości obwodowej około 50 m/s lub wyższej. Zapobiega ono szybkiemu zużyciu ściernicy i zwiększa wydajność procesu. W nowoczesnych warunkach, biorąc pod uwagę zastosowanie ziaren ściernych o wysokiej wytrzymałości, dopuszcza się zwiększenie prędkości szlifowania o 1,5-2 razy, tj. ponad 100 m/s. Podczas HSG można polepszyć wiele wskaźników procesu szlifowania, do których zaliczają się m.in.:

- chropowatość powierzchni obrobionej, która jest znacznie zmniejszona,
- moc szlifowania, która wzrasta o około 20%, ale jest to rekompensowane przez objętości usuwanego metalu o około 40%,
- wzrost czasu pracy ściernicy do momentu jej stępienia, ponieważ przy dużej prędkości ziarno ściernicze jest wolniej tępienie (przy obróbce wyrobów z węglowej stali konstrukcyjnej można zmniejszyć zużycie ściernicy o prawie 50%),
- wzrost dokładności obróbki, kształtu i struktury powierzchni.

Ściernice do HSG są produkowane z elektrokorundu, z kolei jako materiały łączące stosuje się spoiwa gumowe, ceramiczne lub żywiczne (bakelitowe). W celu zwiększenia wytrzymałości ściernic do ich struktury dodaje się elementy dodatkowe, takie jak stalowe pierścienie wzmacniające, połączenie tkaniny, włókna metalowe, grafitowe, szklane, polimerowe itp. Gdy wymagane jest szybkie szlifowanie stali, żeliwa i innych materiałów żelaznych, stosuje się wysokowytrzymałe ściernice z sześciennego azotku boru. Pozwala to na osiągnięcie prędkości obwodowych do 250 m/s i zapewnia dłuższą żywotność niż w przypadku konwencjonalnych narzędzi elektrokorundowych. Ściernice mogą być także produkowane z mieszanki spoiw gumowych i ceramicznych, co w sposób zdecydowany zwiększa zarówno ich wytrzymałość, jak i elastyczność.

2.3. Szlifowanie zgrubne

Proces obróbki wyrobów nazywany obróbką zgrubną charakteryzuje się specyficznymi cechami, które odróżniają go od innych technologii obróbki mechanicznej ze względu

na zasadniczą różnicę w technologicznym przeznaczeniu tej obróbki¹. Procesy zgrubne w większości nie są ani kształtujące, ani wykończeniowe (jak obróbka powierzchniowa), a ich celem jest usunięcie warstwy materiału zawierającej defekty. W procesie obróbki zgrubnej wyrób nie jest przygotowywany do dalszego wykorzystania w montażu, lecz wymaga dalszej obróbki (kształtowanie na gorąco lub na zimno, obróbka skrawaniem). Na przykład w przemyśle metalurgicznym szlifowanie zgrubne służy do usuwania niedoskonałości powierzchni wyrobów i przygotowania ich do dalszej obróbki. Szlifowanie usuwa zgorzelinę, termiczne uszkodzenia powierzchni (przypalenia) oraz cząstki obce i żużel, umożliwiając w ten sposób dalszą obróbkę detalu i wytwarzanie produktów o wysokiej jakości.

Przedmioty obrabiane szlifowaniem zgrubnym w większości przypadków osiągają masę setek kilogramów lub nawet kilku ton, a także krzywiznę, która często wynosi 10-20 mm lub więcej na 1 m długości, jak i powierzchnie, które mają lokalne kilkakrotne różnice właściwości fizycznych i mechanicznych materiału w porównaniu ze stanem wyjściowym. Masa narzędzi ściernych używanych przy szlifowaniu zgrubnym dochodzi w niektórych procesach do 60-80 kg, a wielkość ziaren ściernych osiąga rozmiary do 2500 μm , tj. o jeden-dwa rzędy wielkości większe niż narzędzia używane przy szlifowaniu wykończeniowym.

Jednym z głównych trendów w rozwoju szlifowania zgrubnego jest szybki wzrost ilości usuwanego materiału w jednostce czasu przy wysokich prędkościach roboczych, posuwach i dużych siłach nacisku w obszarze obróbki. Pozwala to na zmniejszenie całkowitych naddatków na obróbkę dla detali obrabianych cieplnie o wyższej twardości, wyeliminowanie w niektórych przypadkach frezowania, strugania, czyszczenia płomieniowego przy usuwaniu naddatków do 10 mm i więcej w jednym przejściu. W metodzie szlifowania zgrubnego stosuje się wiele specjalnych szlifierek zgrubnych, pracujących przy prędkości 60-80 m/s, prędkości posuwu do 60 m/min, sile docisku 6000-10 000 N i mocy napędu głównego 75-160 kW.

Obecnie rozwija się nowa tendencja szlifowania zgrubnego półfabrykatów i gotowych wyrobów walcowanych na obrabiarkach przy prędkości 80 m/s i sile nacisku 15 000-20 000 N (moc napędu głównego 300 kW) dwoma ściernicami. Specyfiką tego szlifowania prowadzonego przy dużej sile nacisku jednostkowego w strefie obróbki, dużej prędkości roboczej i prędkości posuwu jest duża intensywność samoostrzenia

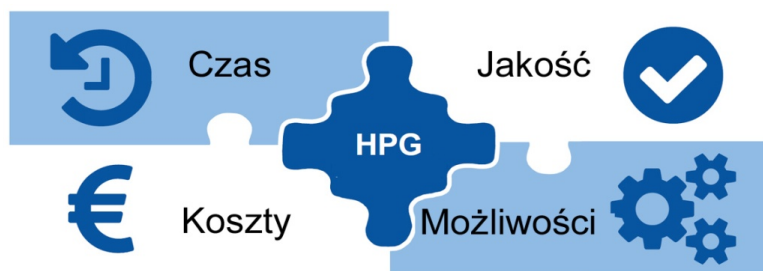
¹ Szlifowanie zgrubne historycznie nazywane było w różny sposób. Spotkać można określenie szlifowanie siłowe (ang. *Force Grinding*), gdyż wymagane jest stosowanie bardzo dużych sił szlifowania, czy szlifowanie głębokościowe lub głębokie (ang. *Deep Grinding*), ponieważ wymagane jest usuwanie grubych warstw materiału przy jednym przejściu ściernicy. Określenie szlifowanie wzdłużno-kształtowe (ang. *Traverse-Contour Grinding*) stosuje się względem szlifowania przelotowych wałków. W tym przypadku na części swej szerokości ściernica jest ukształtowana na stożek lub ma kilka stopni walcowych. Połączeniem opisanych szczegółów jest szlifowanie z posuwem pełzającym (ang. *Creep Feed Grinding*), które cechuje się bardzo małymi posuwami przy dużych głębokościach szlifowania (dosuwach).

poszczególnych ziaren ściernych oraz duża ilość usuwanego materiału poza granicami przypalenia, towarzyszącego konwencjonalnemu szlifowaniu.

Istotną cechą technologiczną procesu szlifowania zgrubnego jest obróbka bez użycia cieczy chłodząco-smarującej. Taką strategię uzasadnia się przede wszystkim technicznym brakiem możliwości doprowadzenia chłodziwa do strefy obróbki w ilości wystarczającej do skutecznego odprowadzenia ciepła w warunkach osiągnięcia temperatury styku ściernicy z przedmiotem obrabianym wyższej od temperatury topnienia obrabianego materiału. Ważnym czynnikiem determinującym odprowadzenie ciepła przy szlifowaniu zgrubnym, w przeciwieństwie do szlifowania wykończeniowego, jest wytwarzanie wiórów, gdyż ich wymiary liniowe osiągają 2,0-2,5 mm grubości i 15-20 mm długości.

2.4. Szlifowanie wysokowydajne (HPG)

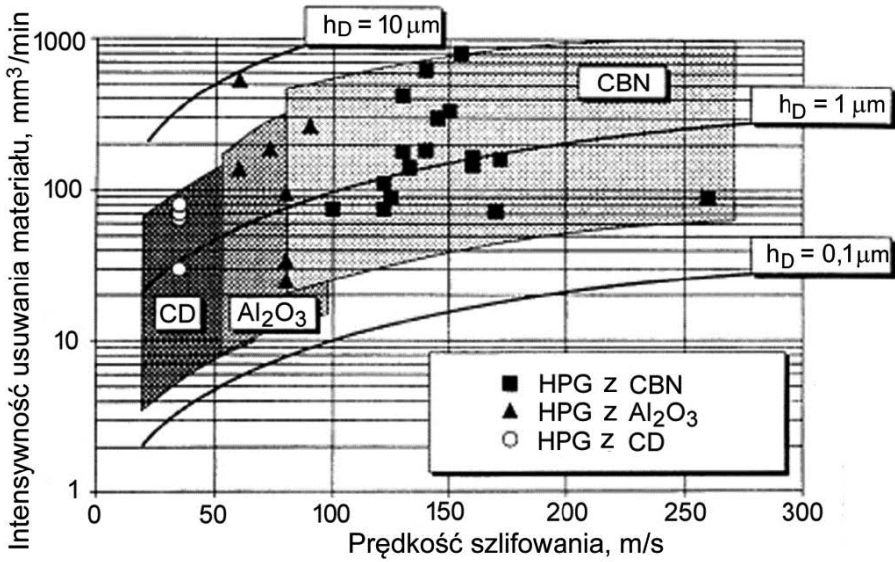
Szlifowanie wysokowydajne (ang. *High Performance Grinding*, HPG) definiuje się poprzez znaczącą poprawę, w porównaniu z konwencjonalnymi procesami szlifowania, jednej lub więcej cech produkcyjnych, do których zalicza się czas, koszt, jakość i wykonalność (rys. 2.12). W zależności od wymagań procesy HPG muszą być podzielone na wysokowydajne procesy z maksymalizacją szybkości usuwania materiału lub procesy o wysokiej precyzji zapewniające wysoką jakość powierzchni.



Rys. 2.12. Podstawowe wskaźniki procesu HPG [41]

Cechą charakterystyczną HPG jest nierównomierna grubość wióra mieszcząca się w zakresie od 0,5 μm do 10 μm . Jednocześnie zmniejsza się liczba czynnych krawędzi skrawających.

Szybkość usuwania materiału skutkująca proporcjonalnym wzrostem produktywności w warunkach HPG przedstawiono na rys. 2.13.



Rys. 2.13. Podstawowe obszary wykorzystania HPG [42]

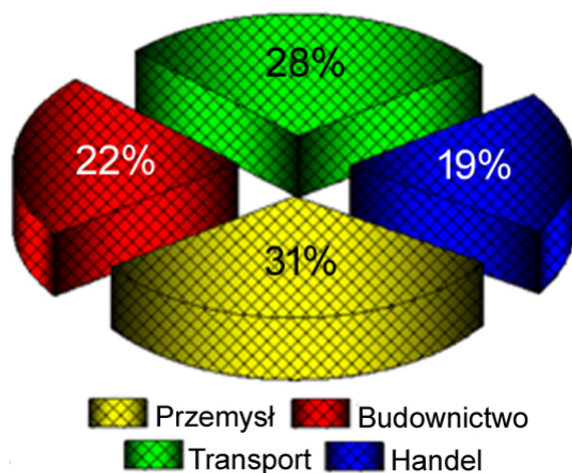
Obróbka HSG zapewnia zmniejszenie sił szlifowania, ogranicza zużycie ściernicy oraz obniża chropowatość powierzchni obrobionego przedmiotu. Tak więc HSG może prowadzić do wzrostu jakości obrobionego przedmiotu. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania zwiększa się ilość energii cieplnej, która jest wprowadzana do obrabianego przedmiotu, co powoduje wzrost temperatury w strefie skrawania, która z kolei może powodować termiczne uszkodzenia powierzchniowe i podpowierzchniowe. Zwiększeniu prędkości skrawania towarzyszy również wzrost mocy skrawania. Z kolei zmniejszenie czasu kontaktu ziarna ściernego z przedmiotem obrabianym także zmniejsza ilość wytwarzanego ciepła [43].

ROLA MEDIÓW TECHNOLOGICZNYCH W PROCESACH OBRÓBKI MECHANICZNEJ

3.1. Znaczenie mediów technologicznych

Wybór mediów technologicznych (MT) dla danej operacji obróbki skrawaniem i metody ich dostarczania do strefy skrawania może być dość złożonym zadaniem, które wymaga starannego rozważenia różnych wskaźników. Pierwszym krokiem w doborze właściwego MT jest analiza dostępnych rodzajów oraz określenie ich mocnych i słabych stron. Działanie to powinno być regulowane przez wymagania dotyczące oddziaływania MT na proces obróbki, a także przez wymagania dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy z uwzględnieniem ochrony środowiska.

W ostatnich latach działalność produkcyjna w połączeniu z intensywnym zużyciem zasobów naturalnych prowadzi do zwiększonego zanieczyszczenia środowiska. Towarzyszy temu drastyczny wzrost zużycia energii. Analizy wykazały, że przemysł wymaga 31% całkowitego zużycia energii, a w tym bezpośrednia produkcja wynosi około 60% całkowitego zużycia (rys. 3.1) [44]. Zatem można stwierdzić o konieczności wykorzystania MT w optymalizacji procesów produkcyjnych, minimalizacji zużycia energii, materiałów itp.



Rys. 3.1. Zużycie energii w różnych sektorach gospodarki (na podstawie [44])

3.2. Oddziaływanie mediów technologicznych

Obecnie na podstawie badań eksperymentalnych i analitycznych ustalono, że podczas skrawania w strefie styku wióra z powierzchnią natarcia zachodzą bardzo skomplikowane interakcje fizyczne i chemiczne, a także szczegóły procesów tribologicznych podczas skrawania:

- te same powierzchnie narzędzia stykają się z ciągle odnawianymi powierzchniami ślizgającego się wióra i przedmiotu obrabianego,
- istnieje znaczna różnica między właściwościami fizycznymi, chemicznymi i mechanicznymi materiału narzędzia i materiału obrabianego,
- odkształcenia plastyczne wióra powodują wzrost jego twardości (tzw. utwardzanie odkształceniowe) w porównaniu z materiałem obrabianym,
- ciśnienie i temperatura między powierzchniami styku są wyższe w porównaniu z innymi znanymi stykami,
- ze względu na wysokie prędkości poślizgu i ekstremalne ciśnienie na powierzchniach ostrza skrawającego (interfejsy narzędzie-wiór i narzędzie-przedmiot obrabiany) nie ma wystarczająco dużo czasu na utworzenie warstw ochronnych na powierzchniach trących,
- proces tribologiczny podczas skrawania ma znacznie większy wpływ na materiał obrabiany w porównaniu z materiałem narzędzia.

3.2.1. Efekt smarowania

Znane są pewne szczególne warunki, które wpływają na tworzenie się warstw smarowych podczas procesu skrawania. Ogólnie, środkiem technologicznym jest stosunkowo trudno przeniknąć do strefy styku między narzędziem, wiórem i obrabianą powierzchnią, aby utworzyć warstwę smarową. Gdy krawędź skrawająca znajduje się w materiale obrabianym, wysokie ciśnienia i temperatury obecne na ich styku uniemożliwiają tworzenie się jakichkolwiek warstw smarowych. Film smarowy może powstać tylko przy bardzo niskiej prędkości skrawania i zmniejszonym tarcu. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania możliwość ta jest coraz mniejsza, głównie ze względu na wzrost temperatury do momentu, w której lepkość chłodziwa maleje, a integralność filmu smarowego zostaje przerwana.

Oprócz właściwości smarowych często analizuje się również zdolność chłodzenia MT. Na zdolność chłodzenia mogą wpływać efekty smarowania, ponieważ działanie

smarowe prowadzi do zmniejszenia tarcia i w konsekwencji do obniżenia temperatury współpracujących powierzchni. Inne właściwości technologiczne chłodziw są także brane pod uwagę, m.in. ich zdolność do mycia powierzchni styku oraz do zainicjowania mikrowykruszeń w górnych obszarach warstwy wierzchniej.

Przy analizie oddziaływania smarowego należy wziąć pod uwagę następujące kwestie:

- system tribologiczny podczas skrawania różni się znacznie od konwencjonalnego, funkcjonującego w maszynach, a w takim przypadku należy wziąć pod uwagę specyfikę interakcji kontaktowej,
- wzajemnie powiązane procesy chemiczne i fizyczne zachodzące podczas skrawania sprawiają, że pojęcie tarcia jest znacznie bardziej skomplikowane niż w konwencjonalnych systemach tribologicznych,
- działanie smarowe MT można poprawić na dwa sposoby, poprzez tworzenie granicznej warstwy smarowej cechującej się niewielkim ścinaniem i zatarciem lub ograniczenie obszaru adhezji w strefie skrawania; pierwszy sposób osiąga się wskutek procesów chemicznych i adsorpcyjnych, drugi zaś poprzez zwiększenie dostępu środka smarowego do obszarów styku,
- w celu zapewnienia działań smarowych MT konieczne jest uwzględnienie ich wpływu na następujące procesy w strefie styku: przenikanie MT do strefy skrawania; zdolność składników MT do adsorpcji i chemisorpcji; kształtowanie struktury granicznej warstw smaru przez molekuly substancji tribologicznie czynnych.

Badania i rozwój nowych MT są najważniejsze w przypadku nowych procesów obróbki skrawaniem, m.in. obróbki z dużymi prędkościami, a także w przypadku obróbki nowych materiałów, np. stosowanych na półprzewodniki i materiały kompozytowe.

3.2.2. Efekt chłodzenia

Ciepło wytwarzane podczas skrawania jest spowodowane odkształceniem plastycznym materiałów obrabianych oraz tarciem na stykach ostrze-wiór i ostrze-przedmiot obrabiany. Dla danego materiału obrabianego i narzędzia skrawającego prędkość skrawania jest głównym czynnikiem wpływającym na ilość ciepła wytwarzanego podczas skrawania, natomiast posuw i głębokość skrawania wpływają w znacznie mniejszym stopniu. Wytwarzane ciepło wywołuje wysokie temperatury w strefie obróbki, więc chłodzące działanie MT jest bardzo ważne. Praktyka skrawania wykazała, że stosowanie MT zwiększa trwałość narzędzia i poprawia dokładność wymiarowo-kształtową

obrabianych części, a także ich integralność. Działanie chłodzące MT zależy od ich właściwości fizycznych, chemicznych i termicznych. Na zdolność chłodzenia wpływa lepkość, przewodność cieplna, pojemność cieplna właściwa i ciepło właściwe parowania. Wybierając MT ze względu na ich działania chłodzące, należy wziąć pod uwagę, że każdy materiał narzędziowy cechuje się tzw. optymalną temperaturą, która zapewnia maksymalną trwałość narzędzia. Poprawa właściwości chłodzących pozwala na zwiększenie trwałości narzędzi, gdy ciepło jest wytwarzane przy dużych prędkościach skrawania, a temperatura skrawania jest bliska krytycznej.

Jeśli temperatura narzędzia i przedmiotu obrabianego podczas obróbki zostanie obniżona, można osiągnąć zwiększoną dokładność przedmiotu wskutek zmniejszenia odkształceń temperaturowych. Ciepło odprowadzane przez MT zmniejsza promień formującego się wióra ze względu na różnicę temperatur strony zewnętrznej wióra i strony styku ostrze-wiór. W niektórych przypadkach obniżenie temperatury w strefie skrawania dzięki zewnętrznemu chłodzeniu może zwiększyć siły skrawania, ponieważ temperatura wpływa na wytrzymałość obrabianego materiału.

Stosowanie MT do celów chłodzenia może mieć również pewne negatywne konsekwencje. Podczas skrawania przerywanego (np. frezowania, strugania) narzędziami z węglików spiekanych przy dużych prędkościach skrawania stosowanie MT prowadzi do znacznych wahań temperatury narzędzia, a tym samym do możliwości jego pęknięcia termicznego. Intensywne chłodzenie może prowadzić do powstawania wysokich naprężeń reszkowych, zarówno powierzchniowych, jak i w rdzeniu, które często prowadzą do pogorszenia właściwości użytkowych powierzchni. Gdy prędkości skrawania są niskie, intensywność zużycia narzędzia zależy od intensywności tworzenia narostu, czyli od temperatury skrawania i właściwości fizyko-mechanicznych obrabianego materiału.

Działanie chłodzące MT ma znacznie mniejszy wpływ na temperaturę styku ostrza z wiórem ze względu na krótki czas kontaktu. Aby chłodzenie miało większy wpływ na temperaturę styku, można stosować narzędzia z wewnętrznym doprowadzeniem MT. Wzrost trwałości takiego narzędzia może wynosić nawet 100% dzięki chłodzeniu tylko narzędzia skrawającego, a nie rozgrzanego wióra, którego temperatura nie wpływa na trwałość narzędzia. Skuteczne chłodzenie można również uzyskać, stosując wysokociśnieniowe doprowadzanie MT lub chłodzenie mgłą znane jako obróbka tzw. prawie na sucho (ang. *Near Dry Machining*) lub obróbka z minimalną ilością smarowania (ang. *Minimum Quantity Lubrication*, MQL), obróbka z minimalną ilością chłodzenia i smarowania (ang. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*, MQCL).

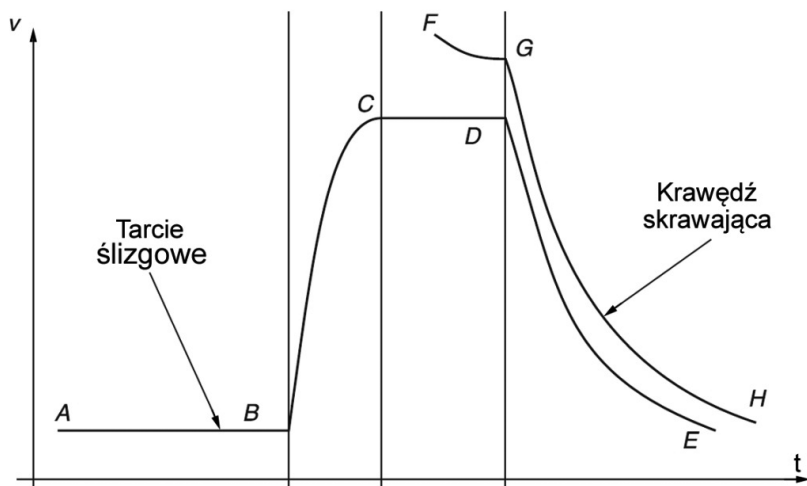
Odprowadzanie ciepła podczas skrawania z gorących powierzchni odbywa się w wyniku konwekcji, przewodności cieplnej, promieniowania (staje się znaczące w temperaturach powyżej 800°C) i reakcji chemicznych.

W większości przypadków skrawania metali przy użyciu MT wymiana ciepła związana z promieniowaniem i reakcjami chemicznymi jest nieistotna. Dlatego w analizach działania chłodzącego MT wystarczy wziąć pod uwagę konwekcyjną wymianę ciepła, czyli wymianę ciepła związaną z właściwościami MT i ich przepływem.

Obliczenia zdolności chłodzących MT wykazały, że gdy zamiast MT rozpuszczalnych w wodzie stosuje się MT na bazie oleju, współczynnik przenoszenia ciepła zmniejsza się nawet o 5-8 razy. Gdy stosowane są środki rozpuszczalne w wodzie, zwiększa się tarcie na styku narzędzie-wiór i odkształcenia plastyczne materiału obrabianego, a tym samym nasilają się zjawiska termiczne, co z kolei prowadzi do wzrostu temperatury skrawania. W rezultacie temperatura w strefie skrawania nie zmniejsza się wprost proporcjonalnie do współczynnika przenikania ciepła, ale zależy od kombinacji wielu czynników procesu.

3.2.3. Oddziaływania tribochemiczne mediów technologicznych

Oprócz tlenu, „naturalnego” składnika triboaktywnego, można wymienić inne substancje wzmacniające chemiczne działanie MT. Najczęściej stosowanymi są halogeny, siarka i fosfor. Substancje te są stosowane jako składniki czynne, które ułatwiają pracę w warunkach ekstremalnego ciśnienia (dodatki EP) i są zwykle stosowane jako dodatki niezależne, niewchodzące w skład skomplikowanych związków organicznych. Interakcje chemiczne tych dodatków z powierzchniami trącymi różnią się znacznie od zwykłych reakcji tribologicznych. Interakcje te znane są jako reakcje tribochemiczne, a związane z nimi obszary nauki znane są jako mechanochemia i tribochemia. Reakcje te występują na powierzchniach trących z udziałem aktywnych atomów, cząsteczek, egzo-elektronów i wolnych rodników. Z kolei cechy reakcji tribochemicznych są związane z kinetyką procesu i katalitycznym działaniem powierzchni. Ogólny charakter reakcji tribochemicznych przedstawiono na rys. 3.2, zakładając, że w aktywnym środowisku znajduje się powierzchnia pierwotna, na którą zaczyna oddziaływać proces tarcia. Przed rozpoczęciem obróbki (linia AB) w temperaturze pokojowej reakcja przebiega powoli. Aktywacja mechaniczna spowodowana tarcie lub tworzeniem się nowej powierzchni podczas skrawania gwałtownie przyspiesza reakcję w stanie stałym, a jej prędkość często kilkakrotnie wzrasta (BC). Z kolei, gdy warunki zewnętrzne są niezmiennie, prędkość reakcji jest stała (CD). Interakcja składników pary trącej ma największy wpływ na reakcje tribochemiczne zachodzące w fazie pasywacji (BE).



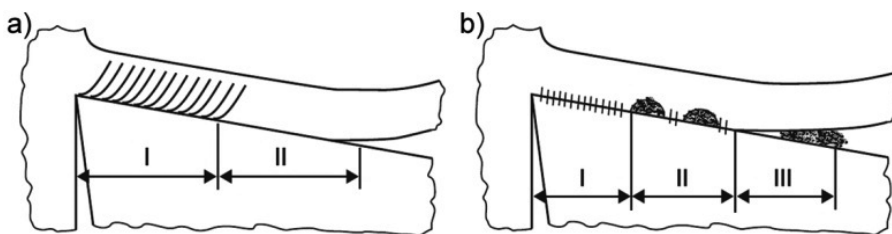
Rys. 3.2. Przebieg reakcji tribochemicznej: v – prędkość reakcji, t – czas, AB – reakcja na powierzchni poślizgu, BC – faza wzrostu na początku tarcia, CD – faza stacjonarna reakcji, DE – spadek reakcji po zakończeniu tarcia (pasywacja powierzchni), F – chwila podziału powierzchni przy skrawaniu, FG – faza skomplikowanego dostępu MT, G – chwila pełnego oddzielenia wióra od narzędzia, GH – faza pasywacji powierzchni wióra

Przedstawiony schemat pokazuje różnice między reakcją tribomechaniczną w przypadku tarcia ślizgowego w strefie skrawania. Krzywa FGH odpowiada skrawaniu. W punkcie F tej krzywej następuje oddzielenie materiału obrabianego, tj. wiór jest oddzielany od przedmiotu obrabianego. W wyniku tego powstaje powierzchnia chemicznie czysta. W tym momencie jej aktywność (a zatem także szybkość reakcji tribochemicznych) jest bardzo wysoka. Gdy wiór przesuwa się dalej od interfejsu ostrze-wiór (po krzywej od punktu F do punktu G), szybkość reakcji staje się wolniejsza. Po przekroczeniu pewnego punktu na krzywej FG środowisko ma nieograniczony dostęp do powierzchni i pasywacja wióra ulega znacznemu przyspieszeniu. Aczkolwiek przyspieszenie to nie ma żadnego praktycznego wpływu na mechanizm powstawania wióra i warunki na styku narzędzie-wiór, ponieważ zachodzi poza stykiem.

3.2.4. Penetracja mediów technologicznych do powierzchni strefy styku

Kwestie penetracji mediów technologicznych do strefy styku rozpatrywane były przez wielu badaczy z powodu bardzo atrakcyjnych wyników zastosowania tego zjawiska. Rozpatrywano dwa modele kontaktu wióra z powierzchnią natarcia narzędzia, a mianowicie model dwuobszarowy i model trójobszarowy (rys. 3.3). Rola MT jest reprezentowana w tych modelach w różny sposób. W modelu dwuobszarowym niejedno-

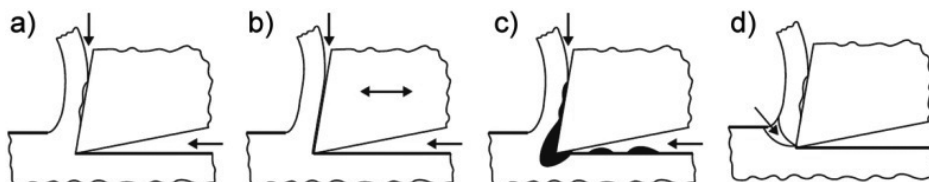
rodność styku jest przedstawiana w postaci dwóch stref styku, plastycznej I oraz sprężystej II. Model trójobszarowy w większym stopniu uwzględnia rolę otoczenia. W tym modelu występuje strefa pełnego kontaktu adhezyjnego I, strefa tarcia mieszanego II (smarowanie graniczne, szczególnie skomplikowane przez adhezję) oraz strefa jednorodnego tarcia granicznego III. Oba modele zakładają, że MT przenikają przynajmniej do części powierzchni styku.



Rys. 3.3. Dwuobszarowe (a) i trójobszarowe (b) modele powierzchni styku między wiórem a powierzchnią natarcia [45]

Według różnych źródeł naukowych, otoczenie może penetrować strefę styku na cztery sposoby:

- poprzez sieć kapilar w materiale obrabianym (rys. 3.4 a),
- wskutek zmian ciągłości styku z powodu drgań narzędzia (rys. 3.4 b),
- poprzez tworzenie się wgłębień spowodowanych cyklicznymi oddziaływaniami narostu obecnymi na krawędzi skrawającej (rys. 3.4 c),
- w wyniku dyfuzji przez strefę odkształcenia pierwotnego, która jest obarczona defektami w wyniku szybkiego odkształcenia plastycznego (rys. 3.4 d).

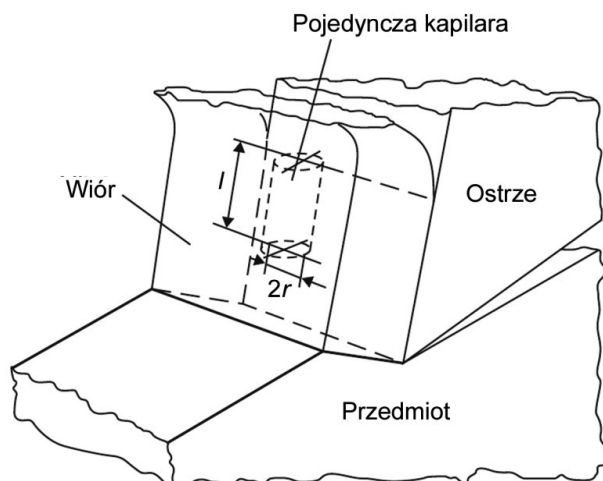


Rys. 3.4. Sposoby penetracji powierzchni strefy styku [46]

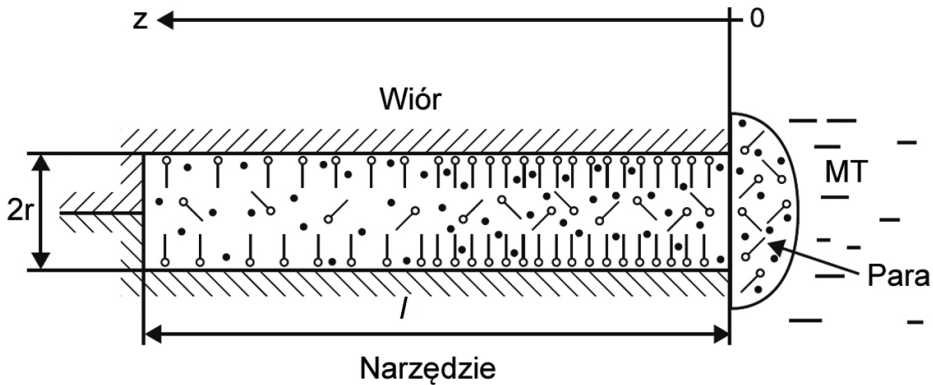
Na podstawie badań przeprowadzonych w ostatnich latach ustalono, że rzeczywiście dominujący jest pierwszy z tych mechanizmów, tj. penetracja przez MT powierzchni trących poprzez sieć kapilar. Udowodniono, że średnia wartość przekroju kapilar wynosi od 0,2 μm do nawet 50 μm . Należy przy tym zwrócić uwagę, że zakres ten w przybliżeniu odpowiada wartości wysokości nierówności na powierzchni styku wióra.

Astakhov i Joksch [45] opisali model skrawania wyjaśniający proces wnikania MT do interfejsu ostrze-wiór w celu utworzenia granicznej warstwy smarnej. Przyjęto, że w strefie nieszczelnego styku, gdzie wiór oddziela się od narzędzia, istnieje szereg kapilar, przez które możliwe jest przenikanie zewnętrznego środka smarnego. Schemat przedstawiający pojedynczą półotwartą cylindryczną (dla uproszczenia) kapilarę międzyfazową utworzoną między narzędziem a wiórem na powierzchni natarcia narzędzia pokazano na rys. 3.5. Oś każdej kapilary jest skupiona wzdłuż jednego kierunku ruchu wióra. Szereg takich kapilar wypełnia całą szerokość wióra. Rozmiary kapilar zmieniają się losowo, a ich kształt można scharakteryzować za pomocą średnich wartości promienia r i długości l . Ścianki kapilar mają niejednorodny charakter, z jednej strony należą do narzędzia, a z drugiej do wióra.

Gdy kapilara otwiera się w środowisku zewnętrznym, panuje w niej próżnia, a jej ścianki są w pełni czyste (chemicznie czyste). Proces przenikania środowiska do podciśnieniowych kapilar zachodzi pod wpływem ciśnienia atmosferycznego i sił kapilarnych. Oba te wpływy działają od strony przeciwnej do kierunku ruchu wiórów. W rezultacie stykające się powierzchnie w ograniczonej części obszaru styku są rozdzielone warstwą smarową. Grubość strefy wtórnego ścinania na powierzchni wióra, a także wartość odkształceń plastycznych, które są wynikiem efektu smarowania w procesach skrawania, ulegają zmianie. Schemat adsorpcji środka powierzchniowo czynnego z fazy parowej na ściankach pojedynczej kapilary pokazano na rys. 3.6. Czarne krążki reprezentują molekuly roztworu, z kolei białe krążki z ogonkami reprezentują molekuly środka powierzchniowo czynnego.



Rys. 3.5. Pojedyncza kapilara w modelu penetracji MT w strefie styku [45]



Rys. 3.6. Schemat adsorpcji środka powierzchniowo czynnego z fazy parowej na ściankach pojedynczej kapilary (na podstawie [45])

Od momentu otwarcia kapilary zaczyna się ona wypełniać przez środowisko zewnętrzne (smarowe) i w konsekwencji na jej wewnętrznych ściankach tworzy się warstwa smarowa. Krytyczna prędkość skrawania zależy od czasu potrzebnego na zajście tego procesu. Jeśli czas ten można oszacować z rozsądną dokładnością, można przewidzieć wydajność różnych MT dla danego zastosowania. Obliczenia te są skomplikowane, ponieważ w tym czasie zachodzi wiele procesów fizycznych i chemicznych.

W uproszczeniu, proces penetracji warstwy wierzchniej można przedstawić jako łańcuch kilku następujących po sobie etapów. Obecność i czas trwania tych etapów zależy od właściwości MT, geometrii układu kapilarnego i parametrów termodynamicznych procesu (tab. 3.1). Czas trwania każdej kapilary jest ograniczony przez prędkość odprowadzenia wióra. Przy pewnej krytycznej prędkości skrawania niszczenie kapilar następuje zbyt szybko, aby umożliwić wytworzenie warstwy smarowej. Z tego powodu wzrost prędkości skrawania prowadzi do wyrównania działania smaru w różnych środowiskach. Stąd można sformułować niezbędny warunek działania smaru, a mianowicie, aby utworzyć graniczną warstwę smarową między wiórem a narzędziem, całkowity czas potrzebny na elementarne procesy tworzenia warstwy smarowej nie powinien przekraczać czasu trwania kapilary.

Intensywność penetracji MT do wióra i warstwy wierzchniej przedmiotu znacznie wzrasta, jeśli do składników MT dodaje się substancje zapewniające pojawienie się efektu Rehbintera. Efekt Rehbintera jest powszechnie znany jako efekt, w którym dodanie niewielkiej ilości substancji powierzchniowo czynnej na wstępnie obrobioną powierzchnię materiału obrabianego może znacznie zmniejszyć opór podczas obróbki, tj. usprawnić proces skrawania. Jego mechanizm opiera się na reakcji fizykochemicznej między zastosowanym środkiem powierzchniowo czynnym a ciałem stałym. Środki te powodują zmniejszenie wytrzymałości ciał stałych, m.in. pęczania i zmęczenia metali,

Tabela 3.1. Etapy formowania granicznej warstwy smarowej w trakcie skrawania (na podstawie [45])

Numer etapu	Charakter procesów fizycznych i chemicznych	Stan skupienia		
		gaz	płyn	
			ciecz	smar
I	przenikanie kapilarne w fazie ciekłej	–	+	
II	wyparowanie	–	×	×
III	termokatalityczne niszczenie składników	×	×	×
IV	chemisorpcja	×*	×*	×*
V	adsorpcja, formowanie warstwy granicznej	×**	×**	×**
VI	strukturalna supramolekularna samoorganizacja warstwy smarującej	×***	×***	×***

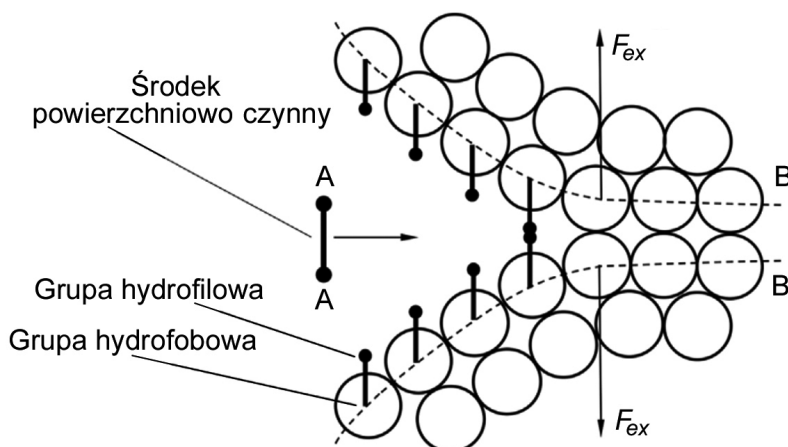
Uwagi: + proces koniecznie zachodzi,
 – proces nie zachodzi,
 × proces jest możliwy,
 * w obecności substancji aktywnych chemicznie,
 ** w obecności środków powierzchniowo czynnych,
 *** w obecności substancji mezogenicznych

przyspieszają umocnienie odkształceniowe powierzchni, obniżają energię powierzchniową, a w wyniku osłabiają wiązania między elementami powierzchni sieci krystalicznej. Działanie efektu Rehbintera pokazano na rys. 3.7. Pojedyncze grupy hydrofilowe i hydrofobowe mają odwrotne ładunki elektryczne, co przeszkadza zamknięciu kapilar penetrujących podczas zmniejszenia sił skrawania, natomiast ładunki pozostałe w kapilarach powodują ich pękanie i zmniejszają wytrzymałość. Osłabiony materiał w kolejnych przejściach jest znacznie łatwiej skrawalny. Przykłady wykorzystania efektu Rehbintera zestawiono w tab. 3.2.

Tabela 3.2. Skuteczność efektu Rehbintera (na podstawie [47])

Materiał obrabiany	Dodatek do MT	Zmiany sił skrawania
Stal niskowęglowa B1213	CCl_4 + woda	zmniejszenie 20-50%
Aluminium AA-1100	alkohol etylowy, butanol, aceton + woda	zmniejszenie 40-75%
Ti-6Al-4V, Inconel 718	kwas oleinowy, empetryna, MoS_2 + olej mineralny	zmniejszenie o kilka procent
Miedź, mosiądz, SS41	kwas stearynowy	zmniejszenie sił i chropowatości

Uważa się, że lepsza skrawalność jest wynikiem efektu nakładania środka smarowego na warstwę wierzchnią [47]. Wyższa smarowność materiału nałożonego na wstępnie obrobioną powierzchnię powoduje zmniejszenie sił skrawania w warunkach sma-



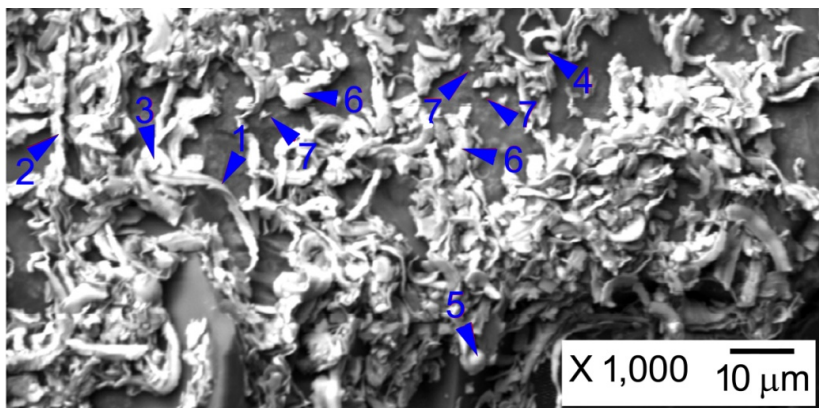
Rys. 3.7. Działanie efektu Rehbintera

rowania mikroelastohydrodynamicznego. W tym stanie chropowatość powierzchni znacząco wpływa na rozkład ciśnienia, które jest znacznie wyższe niż przewidywane na podstawie teorii tarcia ślizgowego. Wykazano również, że kombinacja głębokości skrawania i różnica grubości ostatniego i wstępnego przejścia jest jednym z najważniejszych czynników smarowania. Przy wyższych prędkościach skrawania strefa odkształcona i warstwa narostu wzdłuż powierzchni natarcia narzędzia zmniejsza się i w tych warunkach nie obserwuje się już smarowania mikroelastohydrodynamicznego.

3.2.5. Efekty zmywania i płukania

Właściwości myjące i płuczące MT są ważne, ponieważ jak najwięcej wiórów musi zostać usuniętych z maszyny do systemu filtracji. Tylko czysta maszyna może zagwarantować wysokiej jakości wyniki obróbki. Lepsze właściwości zwilżające MT zapewnia również odprowadzanie cząstek stałych, co przekłada się na mniejsze jej zużycie.

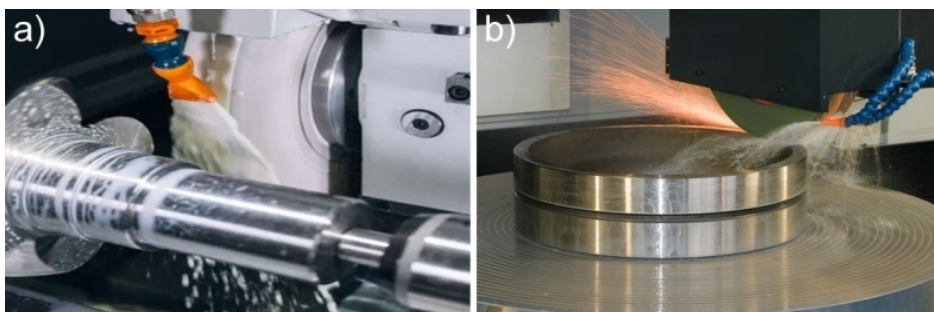
Efekt zmywania zazwyczaj wymagany jest w operacjach obróbki ścierniej, a przede wszystkim w procesie szlifowania. Podczas szlifowania elementów metalowych wytwarza się bardzo drobne cząstki wióra przypominające pył, czemu towarzyszy niszczenie ziaren i spoiwa ściernicy (rys. 3.8). Mieszanina wiórów, ziaren ściernych i spoiwa w bardzo krótkim czasie tworzy swego rodzaju stały smar, którego część trafia do porów ściernicy, a część zostaje namazana na roboczą powierzchnię ściernicy. W wyniku tego powstaje maź metaliczna lub z uwzględnieniem cieczy technologicznej, pseudosmar. Jego obecność wyklucza skuteczne szlifowanie, pogarsza znacznie stan warstwy wierzchniej przedmiotu obrobionego, dokładność obróbki itp.



Rys. 3.8. Mieszanina wiórów, ziaren ściernych i spoiwa powstała po szlifowaniu:

- 1 – spiralny wiór ciągły, 2 – wiór gofrowany, 3 – wiór o kształcie elipsoidy,
- 4 – cząstka spoiwa, 5 – wiór o kształcie kulki, 6 – ziarna ściernie z mostkiem spoiwa,
- 7 – bardzo drobne okruszki ziaren ściernych, spoiwa, wióra i powierzchni obrabianej

Pozbycie się tych negatywnych skutków możliwe jest po wprowadzeniu do składu MT mydła. Jego molekuly rozdzielają cząstki wióra i ścierniwa, a te ostatnie mogą być łatwo spłukane ze strefy szlifowania, przedmiotu czy stołu elektromagnetycznego do układu odprowadzania i filtracji MT (rys. 3.9).



Rys. 3.9. Spłukiwanie strefy obróbki podczas szlifowania wałków (a) i płaszczyzn (b)

Efekt płukania jest niezbędny w przypadkach zautomatyzowanej obróbki elementów maszyn kształtujących wiór w postaci niewielkich odłamków (rys. 3.10).

Po zakończeniu obróbki cząstki wióra mogą trafić na elementy bazowe uchwytów obróbkowych podczas wymiany przedmiotów, przez co kolejny przedmiot nie może być zamontowany i bazowany. Kierując strugę sprężonego powietrza lub cieczy technologicznej na powierzchni bazowe uchwytu, można zapewnić ich szybkie i skuteczne oczyszczenie.



Rys. 3.10. Niewielkie odłamki wiórów wewnątrz uchwytu tokarskiego (a) i frezarskiego (b)

3.3. Rodzaje mediów technologicznych

Istnieje wiele MT skutecznie poprawiających przebieg procesów obróbki materiałów konstrukcyjnych. Można je klasyfikować według: stanu agregatowego, składu chemicznego, obszaru zastosowania, sposobu doprowadzania do strefy obróbki itd. Ze względu na stan agregatowy wyróżnia się środki gazowe, środki ciekłe i środki stałe, a także różnego rodzaju mieszaniny i zawiesiny. Ogólną klasyfikację i obszary zastosowania MT zestawiono w tab. 3.3.

Tabela 3.3. Klasyfikacja i obszary zastosowania MT wg normy ISO 6743/7:1986

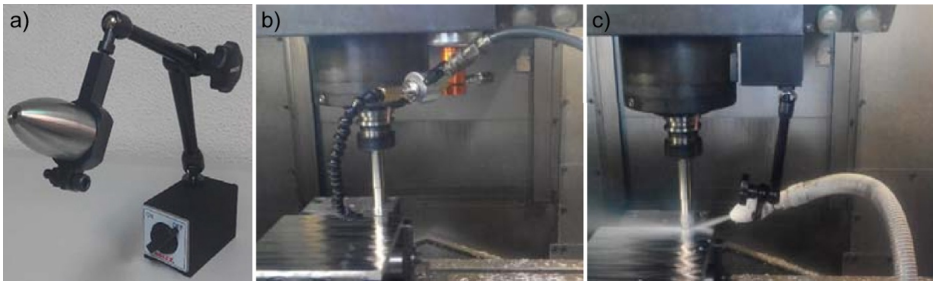
Kod	Właściwości	Zakres zastosowania
MHA	przeciwkorozyjne	operacje wymagające głównie smarowania, oleje obróbcze używane w stanie nierozcieńczonym w obróbce skrawaniem
MHB	jak MHA oraz zmniejszające tarcie	
MHC	jak MHA oraz poprawione właściwości EP; dodatki chemicznie nieaktywne	operacje wymagające głównie smarowania, oleje obróbcze używane w stanie nierozcieńczonym w obróbce skrawaniem i obróbce ścierniej
MHD	jak MHA oraz poprawione właściwości EP; dodatki chemicznie aktywne	operacje wymagające głównie smarowania, oleje obróbcze używane w stanie nierozcieńczonym w obróbce skrawaniem
MHE	jak MHB oraz poprawione właściwości EP; dodatki chemicznie nieaktywne	operacje wymagające głównie smarowania, oleje obróbcze używane w stanie nierozcieńczonym w obróbce skrawaniem i obróbce ścierniej
MHF	jak MHB oraz poprawione właściwości EP; dodatki chemicznie aktywne	
MHG	smary, pasty, woski stosowane w stanie pierwotnym lub rozcieńczone cieczą typu MHA	operacje wymagające głównie smarowania

Kod	Właściwości	Zakres zastosowania
MHH	mydła, proszki, stałe środki smarowe oraz ich mieszaniny	operacje wymagające głównie smarowania
MAA	koncentraty tworzące z wodą emulsje o właściwościach korozyjnych	operacje wymagające głównie chłodzenia, emulsje stosowane w obróbce skrawaniem
MAB	koncentraty rodzaju MAA, mające właściwości zmniejszające tarcie	
MAC	koncentraty rodzaju MAA, mające poprawione właściwości EP	operacje wymagające głównie chłodzenia, emulsje stosowane w obróbce skrawaniem i obróbce ściernej
MAD	koncentraty rodzaju MAB, mające poprawione właściwości EP	operacje wymagające głównie chłodzenia, emulsje stosowane w obróbce skrawaniem
MAE	koncentraty tworzące z wodą roztwory o właściwościach przeciwkorozyjnych	operacje wymagające głównie chłodzenia, emulsje stosowane w obróbce skrawaniem i obróbce ściernej
MAF	koncentraty rodzaju MAE, mające właściwości zmniejszania tarcia i poprawione właściwości EP	
MAG	koncentraty tworzące z wodą roztwory, mające właściwości przeciwkorozyjne	
MAH	koncentraty rodzaju MAG, mające właściwości zmniejszania tarcia i/lub poprawione właściwości EP	
MAI	smary i pasty, stosowane w postaci mieszaniny z wodą	technologie obróbki w luźnym ścierniwie

3.3.1. Media technologiczne gazowe i stałe

Środki gazowe wykorzystuje się celu ochronnym, chłodzącym i ułatwiającym proces skrawania. Właściwości ochronne mają przede wszystkim gazy szlachetne, które skutecznie zabezpieczają rozgrzane powierzchnie przedmiotu przed oddziaływaniem tlenu i azotu z atmosfery oraz powstawaniem tlenków i azotków w warstwie wierzchniej. Strefa obróbki w tym przypadku powinna być hermetycznie zamknięta. Za chłodzenie środkami gazowymi można uznać wykorzystanie dwutlenku węgla lub azotu bezpośrednio po ich wyparowaniu ze stanu stałego lub ciekłego czy też powietrza o podwyższonym ciśnieniu (rys. 3.11). Gazy, jak również ciecze kriogeniczne są dostarczane do strefy obróbki z butli gazowych przez węże z regulacją przepływu zamocowane w statywach sztywnych lub elastycznych. Zamiast butli stosuje się izolowane termicznie pojemniki, w których umieszcza się CO₂ w stanie stałym.

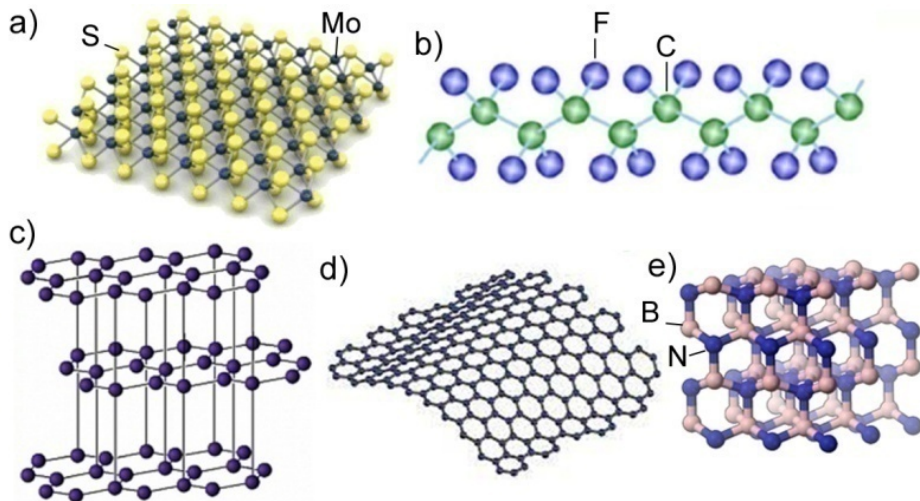
Środki gazowe są efektywne także przy obróbce materiałów trudnoobrabialnych, gdzie inicjują zjawisko chemisorpcji i zapewniają zmniejszenie sił oraz wzrost okresów trwałości narzędzi. Przykładami takich substancji są chlor lub tetrachlorek węgla CCl₄, a ich użytkowanie także wymaga zamkniętej szczelnie komory.



Rys. 3.11. Przykłady dostarczania MT w postaci gazów: a) dwutlenku węgla, b) powietrza, c) cieczy kriogenicznej (na podstawie [48])

Środki stałe mogą chronić współpracujące powierzchnie wskutek utraty wilgotności przez warstwę smarową. Smar stały może być nakładany na powierzchnię w postaci dodatku do smarów płynnych lub w postaci czystej. Powstały film na powierzchni jest charakteryzowany jako film suchy. Najczęściej spośród smarów stałych stosowane są (rys. 3.12):

- dwusiarczek molibdenu (MoS_2),
- politetrafluoroetylen (PTFE) znany jako teflon,
- grafit,
- grafen,
- azotek boru.



Rys. 3.12. Środki smarowe stałe: a) dwusiarczek molibdenu, b) teflon, c) grafit, d) grafen, e) azotek boru

Smary stałe mają różne właściwości, m.in. tzw. materiały lamelowe mają dobrą nośność, grafit wykazuje odporność na działanie wysokich temperatur, MoS_2 może tolerować wyższe obciążenia względem grafitu. Poniżej scharakteryzowano powszechnie stosowane smary stałe, jakimi są MoS_2 , grafit i teflon.

Dwusiarczek molibdenu ma heksagonalną strukturę krystaliczną. Całkowity opór powierzchniowy między współpracującymi powierzchniami jest zmniejszony, w ten sposób zmniejsza się tarcie powierzchniowe i opór ruchu. Dwusiarczek molibdenu jest stabilny termicznie w środowiskach obojętnych, ale w powietrzu lub tlenie zaczyna utleniać się do MoO_3 w temperaturze około 400°C . Do zalet dwusiarczku molibdenu należą doskonała przyczepność, szeroki zakres roboczych temperatur, zapobieganie korozji, a także zmniejszenie tarcia wraz ze wzrostem obciążenia. Wadą natomiast jest to, że jest on higroskopijny, zatem nie może być stosowany w wilgotnym otoczeniu, ponieważ powoduje zwiększenie tarcia. Z kolei jego utlenianie może wywoływać korozję.

Grafit ma strukturę heksagonalną warstwową, tj. lamelarną. Wykazuje on doskonałe właściwości smarowe w obecności wilgoci i działa zadowalająco do temperatury granicznej około 800°C . Grafit zapewnia doskonałe smarowanie w wilgotnym otoczeniu, chroni przed korozją, cechuje się dobrą stabilnością temperatury w strefie tarcia i niskim współczynnikiem tarcia w wysokiej temperaturze. Natomiast nie może zapewnić smarowności przy braku wilgoci, a produktem jego utleniania jest niebezpieczny dla zdrowia dwutlenek węgla.

Teflon (PTFE) ma strukturę składającą się z atomów węgla i fluoru, a także jest jednym z najbardziej śliskich materiałów, ponieważ wykazuje bardzo niskie napięcie powierzchniowe. W przeciwieństwie do innych smarów stałych PTFE nie ma warstwowej struktury. Cząsteczki PTFE bardzo łatwo ślizgają się między sobą, podobnie jak inne struktury lamelarne. Powłoka PTFE może być stosowana do temperatury granicznej 260°C . Teflon ma doskonałą odporność chemiczną, niski współczynnik tarcia przy niewielkich obciążeniach, a także jest obojętny chemicznie. Poza tym – niską temperaturę topnienia, niską przewodność cieplną i niskie właściwości nośne.

Warto nadmienić, że jako smary stałe wykorzystuje się także techniczne tłuszcze zwierzęce, ale tylko w wyjątkowych przypadkach.

3.3.2. Media technologiczne ciekłe

Oleje obróbcze zapewniają wysoki poziom smarowania i wymaganą wydajność obróbki w większości procesów skrawania. Zastosowanie olejów, które mogą zawierać wybrane dodatki do zapewnienia warunków smarowania granicznego zdyspergowane lub rozpuszczone w olejach mineralnych lub syntetycznie otrzymanych olejach organicznych (estry, polialkohole, polialfaolefiny, polibuteny itp.), zapewnia skuteczną realizację takich operacji obróbki skrawaniem, jak przeciąganie lub wiercenie głębo-

kich otworów. W ostatnich latach w produkcji coraz częściej stosuje się oleje roślinne, tj.: słonecznikowy, rzepakowy, kokosowy, palmowy, lniany itp. Ich bezsprzeczną zaletą jest ekologiczność.

Zdolność olejów do dostarczania wystarczająco dużej ilości środka smarowego do strefy skrawania, a także do tworzenia hydrodynamicznych i/lub elastohydrodynamicznych warstw smarowych jest głównym powodem ich użyteczności.

Skuteczną alternatywą dla olejów jest ich zastosowanie w obróbce tzw. prawie na sucho, tj. z minimalną ilością środka smarowego, co opisano poniżej. Płynami stosowanymi w metodzie MQL są oleje mineralne, długołańcuchowe alkohole rozgałęzione, syntetyczne estry organiczne lub ich kombinacje. Przykłady powszechnie stosowanych olejów wykorzystywanych w MQL pokazano na rys. 3.13.

$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{)}_{3-6}\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ <p>Węglowodory na bazie ropy naftowej</p>
$\begin{array}{c} \text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2 \\ \text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH} \end{array}$ <p>Rozgałęzione alkohole</p>
$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{CH}_3 \quad \text{O} \\ \quad \quad \\ \text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{)}_7\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-C-O-CH}_2\text{-C-CH}_2\text{-O-C-CH}_2\text{-CH}_2\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{)}_7\text{-CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$ <p>Syntetyczne estry</p>
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{CH}_2\text{-O-C-CH}_2\text{-CH}_2\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{)}_6\text{-CH}_2\text{-CH}_3 \\ \\ \text{O} \quad \text{O} \\ \quad \\ \text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{)}_7\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-C-O-CH} \quad \text{CH}_2\text{-O-C-CH}_2\text{-CH}_2\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{)}_7\text{-CH}_3 \end{array}$ <p>Triglicerydy naturalne</p>

Rys. 3.13. Oleje stosowane w metodzie MQL

W wielu operacjach obróbki skrawaniem preferowanym rodzajem MT są cieczy na bazie wody. Zawierają one mieszaninę środków smarowych, a także innych składników funkcjonalnych rozproszonych, zawieszonych lub rozpuszczonych w wodzie. Płyny na bazie wody, zapewniając mniejsze smarowanie w porównaniu z tradycyjnymi olejami obróbczymi, oferują również wiele korzyści, tj. skuteczne chłodzenie i usuwanie wiórów lub też bardziej „czystą” obróbkę itp.

Sama woda zapewnia niewielkie korzyści podczas skrawania metalu. Współczynnik lepkości wody jest bardzo niski, a zatem zapewnia niewielką zdolność do tworzenia mierzalnego hydrodynamicznego lub elastohydrodynamicznego filmu smarowego. Wysoka energia powierzchniowa między wodą a większością metalowych podłoży powoduje słabe zwilżanie powierzchni metalu, co w połączeniu z ograniczonym powinowactwem powierzchniowym i niską wytrzymałością na obciążenia sprawia, że jest ona wyjątkowo słabym smarem granicznym. W związku z tym konieczne jest zastosowanie odpowiednich składników smarujących dodanych do wody, aby uzyskać niezbędne właściwości smarowe. Szczegóły tych składników i sposób, w jaki występują one w wodzie, definiują podstawowe rodzaje cieczy do obróbki metali na bazie wody.

Makroemulsje typu „olej + woda” są mieszaninami nierozpuszczalnych w wodzie dodatków i środków smarowych, rozproszonych w postaci kropelek w ciągłej fazie wodnej. Typowy rozmiar tych kropelek waha się od 0,1 do 10 μm średnicy. Ponieważ średnica kropelek, jak również rodzaj i stężenie użytych środków powierzchniowo czynnych znacząco wpływają na właściwości makroemulsji, zazwyczaj zapewniają one wysoki poziom smarowania. W przypadku procesów skrawania, w których może być wymagane utworzenie grubszej hydrodynamicznej lub elastohydrodynamicznej warstwy smarującej, cieczy makroemulsyjne są bardziej pożądane.

Mikroemulsje typu „olej + woda” są izotropowymi mieszaninami nierozpuszczalnych w wodzie dodatków i środków smarowych, wody i środków powierzchniowo czynnych. Średnia średnica składników zawieszonych w fazie wodnej jest niewielka i wynosi 0,1 μm lub mniej. Mikroemulsje zapewniają umiarkowany poziom smarowania oraz dobrą ochronę przed korozją.

W stosunku do tradycyjnych emulsji olejowych mikroemulsje mają wiele zalet, do których należą [49]:

- praca maszyny z większymi prędkościami skrawania ze względu na zwiększoną zdolność chłodzenia,
- zwiększona trwałość narzędzi skrawających na skutek wyeliminowania zjawiska koagulacji,
- zwiększona trwałość i niezawodność maszyn ze względu na lepsze właściwości smarowe i przeciwzużyciowe,
- nieporównywalnie dłuższa trwałość chłodziwa i brak konieczności stosowania biocydów (ze względu na biostabilność),
- korzystne i stabilne w czasie właściwości przeciwkorozyjne ze względu na stabilność pH,
- zmniejszenie asortymentu i ograniczenie zapasów – ze względu na wielostronność zastosowania,
- łatwość rozprowadzania na powierzchni metalu i tworzącego bardzo cienki film smarujący, co pozwala na osiągnięcie prawidłowej obróbki, przy bardzo małym stężeniu koncentratu w chłodziwie,

- utylizacja zużytego chłodziwa, ponieważ wymagane jest wyłącznie jego zubożenie zgodnie z obowiązującymi przepisami i podanymi recepturami,
- łatwa filtracja.

Ponadto mikroemulsje charakteryzują się wyjątkową neutralnością dermatologiczną, a więc nie są agresywne względem skóry, ponadto nie wydzielają nieprzyjemnych zapachów i szkodliwych substancji gazowych, nie zawierają składników toksycznych względem ludzi i środowiska naturalnego, charakteryzują się małym napięciem powierzchniowym, co gwarantuje dobrą zwilżalność narzędzi i obrabianego materiału.

Trzecim rodzajem płynów na bazie wody do obróbki metali są roztwory płynów syntetycznych, które zazwyczaj zawierają od 15% do 35% emulgatorów, inhibitorów korozji, dyspergatorów, smarów granicznych, smarów do pracy w warunkach ekstremalnych ciśnień (EP) wraz z 10-25% polimerowych smarów rozpuszczalnych w wodzie i 40-50% wody. Po zmieszaniu z 92-96% wody płyny te dają stabilny i klarowny roztwór.

Płyny syntetyczne w postaci roztworu zapewniają wysoki poziom chłodzenia, czystości i dyspergowania cząstek metalu, a także oferują najniższy poziom smarowania spośród podstawowych rodzajów płynów na bazie wody. Porównanie właściwości podstawowych MT na bazie wody przedstawiono w tab. 2.4.

Tabela 3.4. Porównanie właściwości podstawowych MT na bazie wody

Właściwości	Makroemulsje	Mikroemulsje	Roztwory syntetyczne
Smarowanie	dobrze	umiarkowane	niskie
Chłodzenie	umiarkowane	dobrze	bardzo dobre
Rozdrabianie wiórow	umiarkowane	dobrze	bardzo dobre
Zamglenie	umiarkowane	dobrze	bardzo dobre
Czystość	umiarkowane	dobrze	bardzo dobra

Kolejnym ciekłym medium technologicznym są płyny kriogeniczne. Ogólnie termin „kriogeniczny” odnosi się do płynów, których temperatura wrzenia jest niższa niż -150°C . Zgodnie z tą definicją, ciecze kriogeniczne obejmują skroplone powietrze, azot, argon, tlen, wodór i hel. Ciekły azot (zwany LN2) jest najczęściej stosowanym chłodziwem kriogenicznym w operacjach obróbki skrawaniem, głównie ze względu na jego obojętne zachowanie oraz szeroką dostępność, ustalone procedury obsługi i stosunkowo niski koszt.

Podjęto także wysiłki w kierunku wykorzystania ciekłego dwutlenku węgla, zimnych gazów i mieszanin ciał stałych i gazów jako chłodziw, które formalnie nie są kriogeniczne, ale dla uproszczenia są uznawane za takie w publikacjach dotyczących skrawania metali.

Obróbka kriogeniczna polega na zastosowaniu płynu kriogenicznego podczas tej czynności. Płyn ten jest rozpylany z zewnątrz przez dyszę w celu chłodzenia strefy ob-

róbki zarówno przewodzącego ciepło, jak i działającego na zasadach konwekcji. Może on także być stosowany pośrednio w celu chłodzenia narzędzia skrawającego wyłącznie poprzez przewodność ciepła.

Istnieje zasadniczy problem w ocenie wyników stosowania cieczy kriogenicznych, jako MT w obróbce skrawaniem metali, ponieważ ciecze te wpływają nie tylko na proces obróbki, ale także na właściwości materiałów obrabianych i narzędzi skrawających. Trudno jest więc oszacować efektywność płynu kriogenicznego stosowanego jako MT.

Do ciekłych mediów technologicznych zaliczane są również zawiesiny i mieszaniny. Zawiesina jest heterogeniczną (niejednorodną) mieszaniną substancji składającą się z drobnoziarnistego materiału stałego rozproszonego w cieczy. Materiał stały nie może przy tym być rozpuszczalny w cieczy, jak w przypadku mieszaniny dwóch lub więcej wzajemnie rozpuszczalnych substancji.

Cieczami w postaci zawiesiny ciał stałych są najczęściej oleje, do których dodaje się wymienione wyżej cząstki materiałów smarowych stałych, ale również rzadziej stosowanych dwusiarczku wolframu (WS_2) i innych siarczków, fluorku wapnia (CaF_2), czystych metali, m.in. srebra, miedzi, cynku oraz tlenków metali [50].

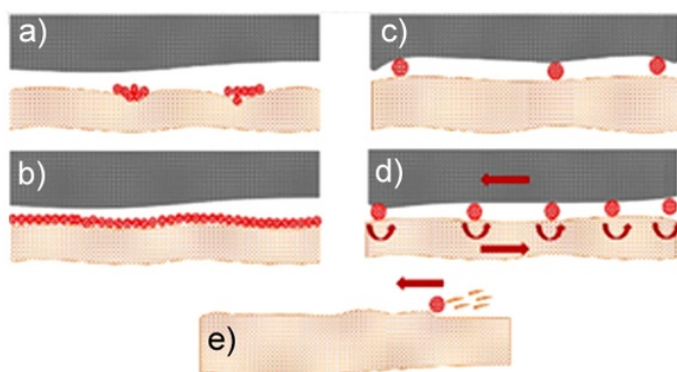
W tym miejscu warto wymienić bardziej zaawansowane efekty działania nanocząstek w zawiesinach na bazie olejów (rys. 3.14), a mianowicie: efekt naprawczy, który wypełnia i naprawia mikrorowki na powierzchni (rys. 3.14 a), efekt filmu ochronnego tworzącego warstwę ochronną na powierzchni (rys. 3.14 b), efekt trzeciego ciała¹ zwiększający odporność na zużycie (rys. 3.14 c), efekt toczenia-ślizgania zmniejszający tarcie i zużycie (rys. 3.14 d) oraz efekt polerowania usuwający zanieczyszczenia z powierzchni obrobionej (rys. 3.14 e).

Ciekłe metale (stopy) stosowane jako MT wykorzystuje się bardzo rzadko, przy skrawaniu materiałów trudnoobrabialnych. Zaletami tej metody są wysoka zdolność odprowadzania ciepła ze strefy obróbki oraz zdolność ciekłego stopu do efektu penetracji warstwy wierzchniej. Oprócz wysokich właściwości smarowych i chłodzących cechą ciekłych metali jest ich zdolność do zmniejszenia wytrzymałości materiału obrabianego w wyniku zmniejszenia energii powierzchniowej na granicy międzyfazowej. Na przykład podczas wiercenia otworów w materiałach trudnoobrabialnych ciekły metal powierzchniowo czynny sprzyja tworzeniu się wiórów poprzez zmianę plastyczności ścinanej warstwy. Wiór jest gwałtownie rozdrabniany i przyjmuje kształt cienkich igieł o szerokości około 0,1 mm, zawieszonych w ciekłym metalu. Jako stopów ciekłych używa się stopów Wooda oraz stopów eutektycznych, takich jak Sn + Zn, Sn + Pb, Bi + Cd

¹ Efektem „trzeciego ciała” (ang. *Third Body Effect*) nazywa się skutek współdziałania wielu procesów fizykochemicznych zachodzących na stykających się powierzchniach zużywających się w warunkach poślizgu na sucho. Często pary cierne wykazują skłonność do tworzenia wtórnych struktur powierzchniowych i specyficzne cechy ich samoorganizacji w obszarach tarcia, co wywołuje kształtowanie „trzeciego ciała” i chroni stykające się powierzchnie przed zużyciem.

i innych. W ostatnich latach szerokie zastosowanie obserwuje się dla galu i irydu [51]. Wadą stosowania stopów ciekłych jest konieczność podgrzewania medium i zapewnienia minimalnego dopuszczalnego dopływu stopu do strefy skrawania.

W niektórych przypadkach, np. przy wyłaczaniu lub przy braku w maszynie układu chłodzenia, jako czynnik chłodzący i smarujący stosowane są różnego rodzaju pasty. Pasty zawierają drobno zdyspergowane substancje smarujące, tj.: grafit, dwusiarczek molibdenu, azotek boru, tlenki metali (zwane wypełniaczami) i substancje wiążące, np. mydła, parafiny, cerezyny. Pasty niekiedy są stosowane jako mieszaniny z wodą lub dodawane do innych cieczy chłodząco-smarujących. Zastosowanie tego typu MT jest ograniczone do przypadków, gdy występują bardzo duże naciski.



Rys. 3.14. Oddziaływania nanocząstek między stykającymi się powierzchniami (na podstawie [44])

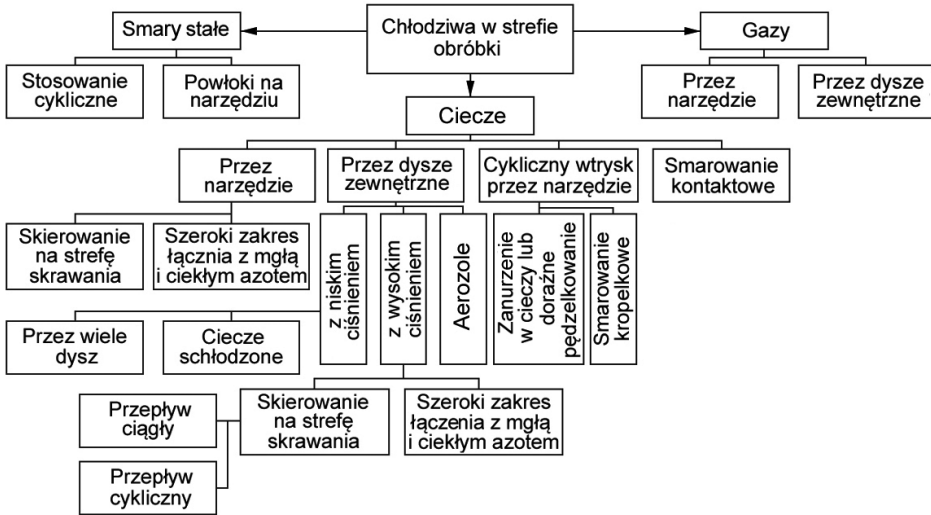
W niektórych przypadkach, np. przy wyłaczaniu lub przy braku w maszynie układu chłodzenia, jako czynnik chłodzący i smarujący stosowane są różnego rodzaju pasty. Pasty zawierają drobno zdyspergowane substancje smarujące, tj.: grafit, dwusiarczek molibdenu, azotek boru, tlenki metali (zwane wypełniaczami) i substancje wiążące, np. mydła, parafiny, cerezyny itp. Pasty niekiedy są stosowane jako mieszaniny z wodą lub dodawane do innych cieczy chłodząco-smarujących. Zastosowanie tego typu MT jest ograniczone do przypadków, gdy występują bardzo duże naciski.

3.4. Urządzenia i metody do doprowadzania mediów technologicznych do strefy obróbki

3.4.1. Informacje ogólne

Wymagania do doprowadzania mediów technologicznych do strefy obróbki są bardzo poważne, ponieważ zapewniają skuteczność realizacji procesu obróbki, skuteczność

pracy maszyn roboczych, osiągnięcie wymaganych wskaźników użytkowych przedmiotu, efektywne odprowadzanie odpadów i wiele innych kwestii. Możliwości i szczegóły doprowadzania mediów technologicznych pokazano na rys. 3.15.



Rys. 3.15. Możliwości i szczegóły doprowadzania mediów technologicznych

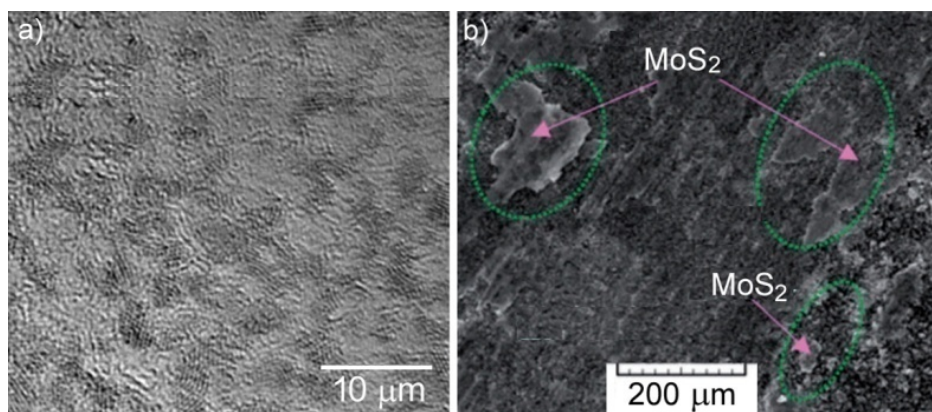
3.4.2. Doprowadzanie smarów stałych

Niewiele możliwości obserwuje się w przypadku wykorzystania smarów stałych, a mianowicie cykliczne naniesienie warstwy MT od zewnątrz przedmiotu do strefy obróbki lub naniesienie stałych powłok na powierzchni ostrzy skrawających. W pierwszej metodzie można wykorzystać tzw. ołówki produkowane przemysłowo lub w sposób indywidualny w formie tubek (rys. 3.16). W drugim przypadku materiał ołówka składa się z proszku smaru stałego, np. dwusiarczku molibdenu i substancji dodatkowych, tj. pirogenicznego i zwykłego dwutlenku krzemu, hiposiarczynu sodu, kwasu oleinowego, parafiny, wosku, szarej gliny, sody kalcynowanej czy kwasu stearynowego.

Substancje na ostrza skrawające są nanoszone różnymi metodami i tworzą na ich powierzchniach roboczych bardzo cienkie powłoki jedno- lub wielowarstwowe. Na rys. 3.17 a pokazano warstwę dwusiarczku molibdenu naniesioną technologią opracowaną przez firmę „MSE Supplies LLC” [52], z kolei na rys. 3.17 b pokazano fragmenty powłoki dwusiarczku molibdenu obecnej na zużytej powierzchni podłoża po 1 h pracy [53].



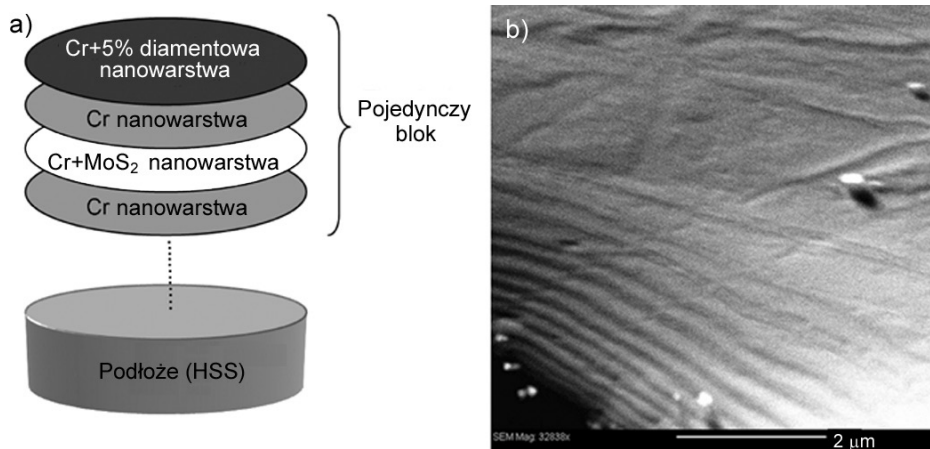
Rys. 3.16. Przykłady ołówków do nanoszenia stałych smarów



Rys. 3.17. Powłoka z dwusiarczku molibdenu: a) naniesiona technologią opracowaną przez firmę „MSE Supplies LLC”, b) obecna na zużytej powierzchni podłoża po 1 h pracy

Stałe smary mogą być częścią wieloskładnikowych powłok nanoszonych na ostrza skrawające. Na rys. 3.18 a przedstawiono schemat nanopowłoki, dla której każdy blok składa się z czterech warstw o grubości 10 nm, natomiast kompletna powłoka zawiera czterdzieści identycznych bloków.

Niekonwencjonalną metodą nanoszenia stałych powłok smarowych jest wykorzystanie procesu epilamowania. Cienka warstwa stałego smaru tworzy niewidoczną powłokę o grubości nanometrycznej, zwaną „Epilame”, która zmniejsza naprężenie powierzchniowe podłoża do poziomu, w którym migracja lub rozprzestrzenianie się oleju i smaru jest zahamowane. Na rys. 3.19 a przedstawiono typowy proces epilamowania



Rys. 3.18. Nanopowłoka zawierająca dwusiarczek molibdenu [54]:
a) schemat zasadniczy pojedynczego bloku, b) nanopowłoka

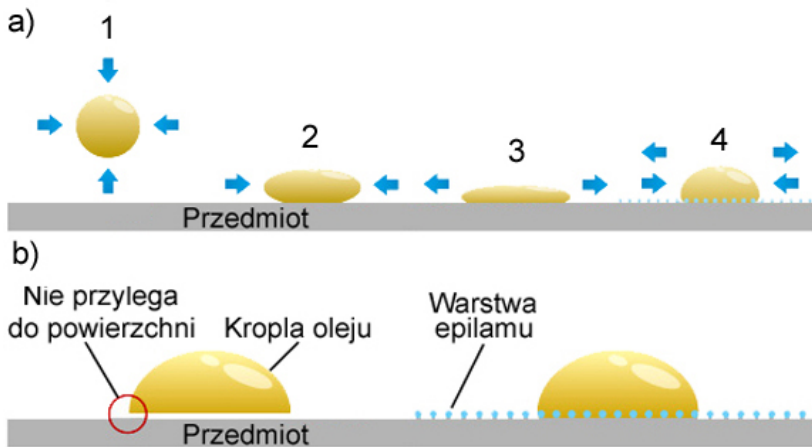
i sposób, w jaki zapobiega on rozprzestrzenianiu się oleju na powierzchni. W procesie tym wstępują następujące warunki pracy:

1. Kropla oleju pod działaniem sił kohezji.
2. Kropla oleju na powierzchni – brak zwilżania (działa tylko siła kohezji), brak adhezji oleju.
3. Kropla oleju na powierzchni – zwilżanie (działa głównie siła adhezji), rozprzeczanie oleju w toku.
4. Kropla oleju na warstwie Epilame – zwilżanie bez rozprzeczania oleju (kohezja/ adhezja są w stanie równowagi).

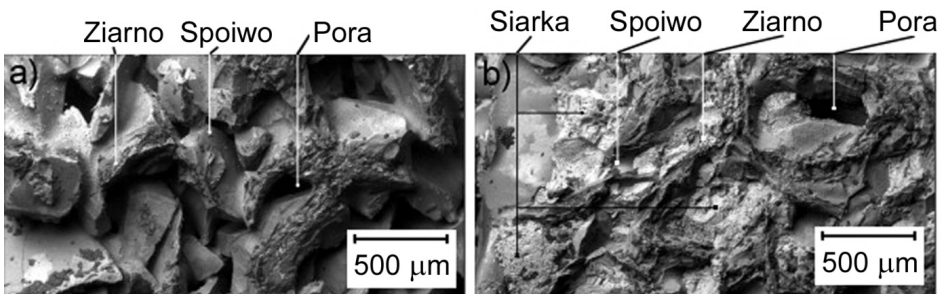
Idealny stan jest scharakteryzowany dla warunku czwartego. Kropla lub film olejowy są utrzymywane w stałym miejscu dzięki równowadze efektów kohezji i adhezji.

Epilamowanie rozpoczyna się od zanurzenia narzędzia w rozcieńczonej emulsji (10-20 s) i suszenia przez 1-2 min (rys. 3.19 b). Napięcie międzyfazowe między olejem a powierzchnią narzędzia zostaje zmienione do poziomu, w którym olej przestaje się przemieszczać. Innymi słowy, olej lub smar pozostaje na miejscu lub zatrzymuje się tam, gdzie pojawia się film epilamu, który działa jak bariera. Narzędzia poddane epilamowaniu zachowują swoją wydajność i mają wydłużoną żywotność.

W przypadku narzędzi ściernych stały smar dodaje się metodą impregnacji. Powierzchnie ściernic w stanie wejściowym oraz po impregnacji siarką jako typowym stałym smarem w obróbce ścierniej pokazano na rys. 3.20.



Rys. 3.19. Działanie środka Epilame: a) tryb pracy, b) schemat fizyczny (firma „Unimatec Chemicals”)



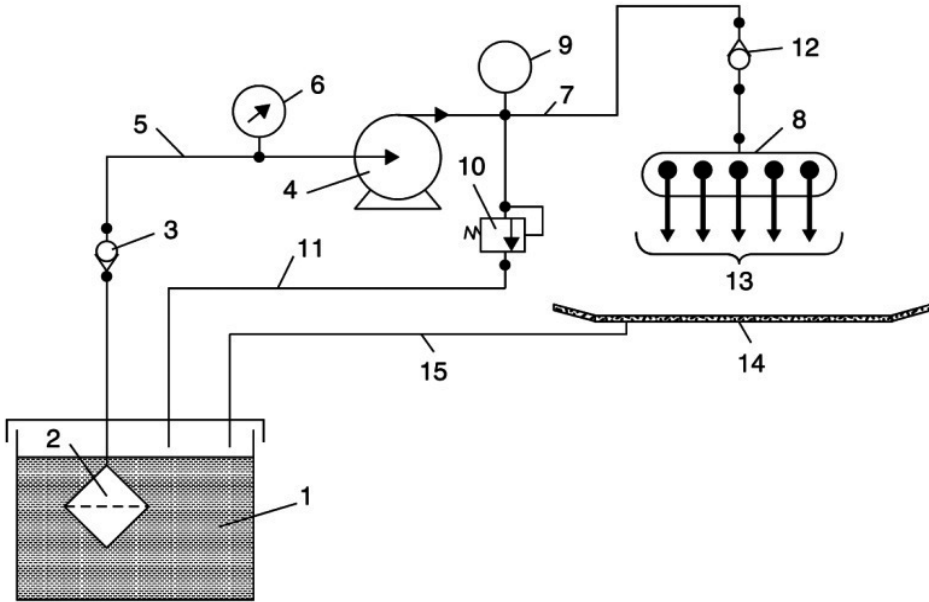
Rys. 3.20. Czynne powierzchnie ściernicy: a) w stanie wejściowym, b) po impregnacji siarką [55]

3.4.3. Doprowadzanie środków ciekłych

W celu dostarczenia środków ciekłych do strefy obróbki wykorzystuje się urządzenia stosowane w metodzie zalewowej, urządzenia do wytwarzania i transportowania aerozoli i mgieł oraz urządzenia do transportowania cieczy pod wysokim ciśnieniem.

Urządzenia do realizacji metody zalewowej są najstarszymi i najprostszymi urządzeniami, względem których oczekuje się:

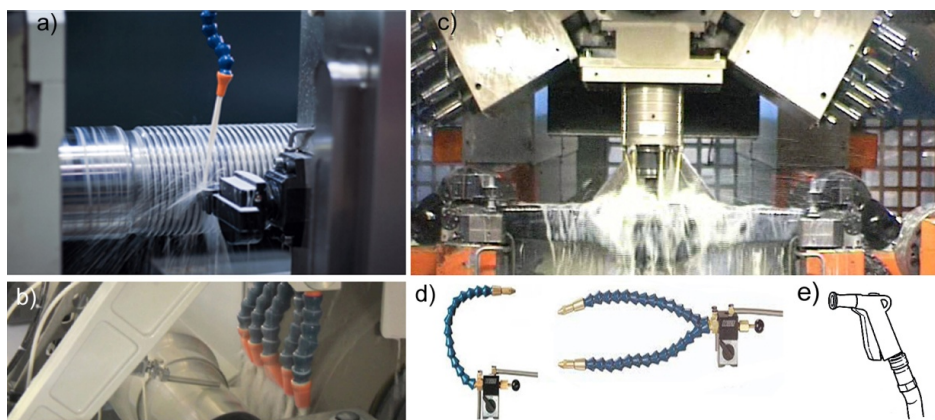
- stałego przepływu chłodziwa 30 l/min z możliwością regulacji,
- stałego ciśnienia 1-7 MPa z możliwością regulacji,
- gęstości filtra tulejowego 10 μm ,
- przepływu chłodziwa kontrolowanego przez programowanie kodem M według normy ISO,



Rys. 3.21. Schemat układu chłodzenia w metodzie zalewowej [55]

- sygnału zatkania filtra,
- wymiarów zależnych od wymiarów maszyny,
- łatwej instalacji, obsługi i konserwacji.

Typowy schemat układu chłodzenia w metodzie zalewowej pokazano na rys. 3.21. Układ ten składa się ze zbiornika na MT 1 z filtrem wlotowym 2. Zawór zwrotny 3 jest otwierany przez zasysanie z pompy 4 przez przewód wlotowy 5. Zawór ten jest otwierany tylko wtedy, gdy ciśnienie zasysania pompy osiągnie wartość minimalną. Manometr 6 podłączony do przewodu wlotowego 5 umożliwia operatorowi maszyny kontrolę podciśnienia wytwarzanego przez pompę 4. Z wylotu pompy MT jest kierowany przez przewód wylotowy 7 do rozdzielacza 8. Manometr 9 podłączony do przewodu wylotowego 7 umożliwia operatorowi maszyny monitorowanie ciśnienia MT wytwarzanego przez pompę. Zawór bezpieczeństwa 10 jest połączony z przewodem wylotowym 7 w celu zmniejszenia ciśnienia w przypadku, gdy ciśnienie w przewodzie wylotowym 7 przekracza wstępnie ustaloną bezpieczną wartość roboczą. Linia 11 odprowadza MWF z zaworu bezpieczeństwa do zbiornika 1. Wylotowy zawór zwrotny 12 jest zaworem uruchamianym ciśnieniowo i jest umieszczony na końcu kolektora linii wylotowej, aby uniemożliwić odprowadzanie MT z linii 7 przez kolektor 8. Zawór ten jest otwierany tylko wtedy, gdy ciśnienie wylotowe pompy osiągnie wstępnie ustalony poziom. Z rozdzielacza 8 MT jest kierowany przez wiele rurek natryskowych 13 wy-



Rys. 3.22. Przykłady umiejscowienia dysz w metodzie zalewowej: a) pojedyncza dysza przy toczeniu, b) komplet dysz przy szlifowaniu, c) komplet dysz specjalizowanych, d) dysze normalizowane, e) dysze w kształcie pistoletu do sflukiwania (firma „DMG MORI”)

posażonych w dysze. Po użyciu MT sływa do tacy 14, znajdującej się u podstawy maszyny, z której jest odprowadzany przez filtr z powrotem do zbiornika 1 przez linię 15.

Dysze mogą być ukierunkowane, pojedyncze lub w zestawie oraz specjalizowane. W celu sflukiwania wiórów mogą być wykorzystywane także dysze w kształcie pistoletu (rys. 3.22).

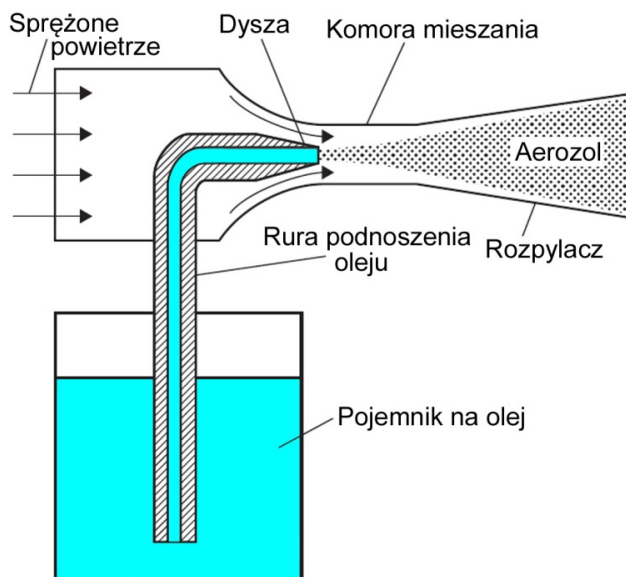
Występują również specjalne urządzenia do wytwarzania aerozoli (mgieł) w warunkach obróbki NDM (obróbka tzw. prawie na sucho). Niezależnie od szczegółów obróbki przy realizacji tych warunków należy uwzględnić następujące kwestie:

- wytwarzanie aerozolu obejmuje wybór oleju lub emulsji, odpowiedniego stężenia aerozolu, a także konstrukcję dyszy (rozpylacza),
- dostarczanie aerozolu do strefy obróbki obejmuje wybór szczegółów NDM i zapewnienie, że wybrane parametry aerozolu nie zmieniają się wraz z wymianą narzędzia, rozpoczęciem/zatrzymaniem cyklu obróbki, zmianą konkretnej operacji obróbki itp.,
- warunki usuwania wiórów ze strefy obróbki, co jest krytyczne dla obróbki otworów, ponieważ wióry powstające w strefie skrawania powinny być stale usuwane, aby zapobiec zatykaniu się otworów, bruzdowaniu powierzchni ścianek otworu, dodatkowemu nagrzewaniu obrobionej części itp.,
- ewentualność odkształcenia termicznego części, gdy cienkościenne elementy wykonane z materiału o wysokiej przewodności cieplnej są obrabiane na linii produkcyjnej w krótkim czasie cyklu obróbki i przy użyciu kolejnych narzędzi skrawających.

W NDM czynnik chłodzący jest dostarczany jako mieszanina powietrza i oleju lub emulsji w postaci aerozolu (mgły). Aerozole są zawiesinami cząstek stałych lub ciekłych

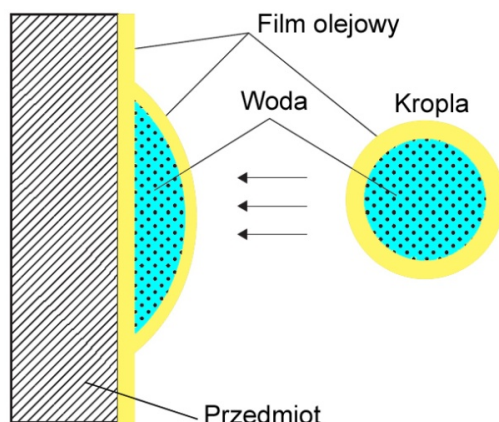
w powietrzu generowanymi w procesie zwanym atomizacją. Atomizer to wyrzutnik, w którym energia sprężonego powietrza pobieranego z właściwej instalacji jest wykorzystywana do rozpylania oleju. Następnie olej przenoszony jest przez powietrze w niskociśnieniowym systemie dystrybucji do strefy obróbki.

Zasadę działania atomizera przedstawiono na rys. 3.23. Gdy sprężone powietrze przepływa przez zwężkę Venturiego, wąska gardziel wokół dyszy wylotowej wywołuje tzw. efekt Venturiego w komorze mieszania, czyli w strefie, w której ciśnienie statyczne jest niższe od ciśnienia atmosferycznego. Powietrze przepływające przez komorę mieszania rozpyla strumień oleju do postaci aerozolu złożonego z cząstek o wielkości mikrometrycznej.

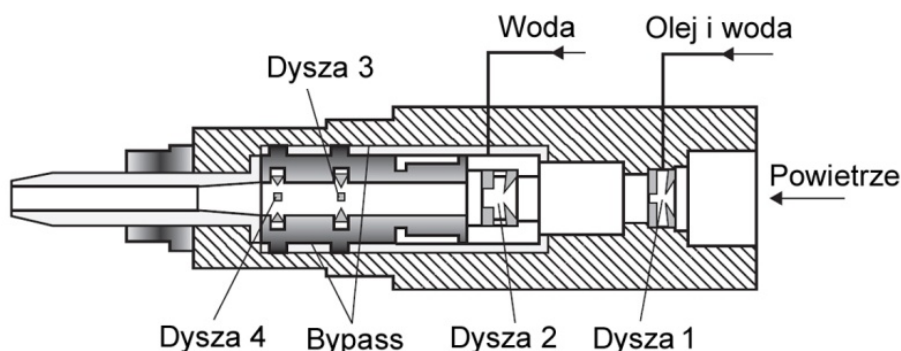


Rys. 3.23. Schemat działania atomizera (na podstawie [55])

Konstrukcja rozpylacza ma kluczowe znaczenie w metodach NDM, ponieważ określa stężenie aerozolu i wymiary kropelek. W takich konstrukcjach pozycja dyszy wylotowej powinna być kontrolowana przez sterownik maszyny CNC, dzięki czemu parametry aerozolu mogą być zmieniane w zależności od warunków obróbki. Zaawansowane metody NDM wykorzystują aerozol, który zawiera nie tylko olej, ale także inne składniki, np. wodę. Na rys. 3.24 przedstawiono idealną kroplę wody poruszającą się w kierunku gorącej powierzchni. Gdy kropla dotrze do gorącej powierzchni narzędzia lub przedmiotu obrabianego, olej smarujący rozprzestrzeni się po niej przed rozprzestrzenieniem się wody. Krople wody zapewniają przenoszenie środka smarowego, skuteczne



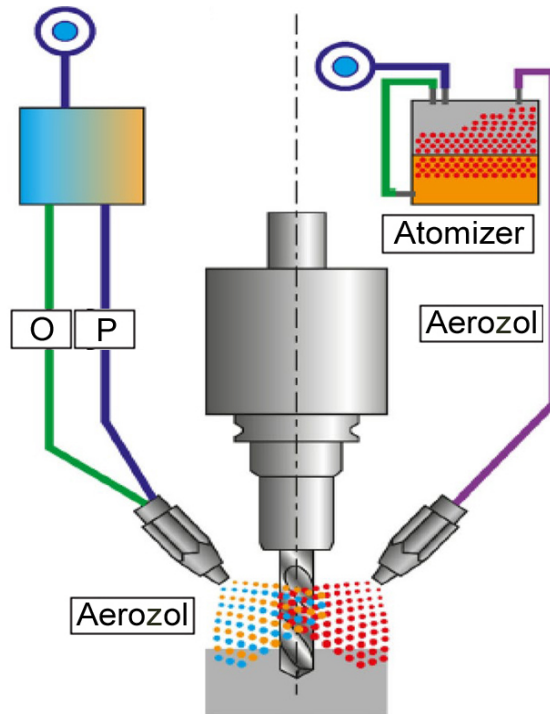
Rys. 3.24. Schemat układu „olej na wodzie (OnW)” (na podstawie [55])



Rys. 3.25. Dysza do wytwarzania mieszanki OnW

rozprowadzanie środka smarowego po powierzchni dzięki bezwładności, a także chłodzenie powierzchni, dzięki wysokiemu ciepłu właściwemu i parowaniu.

Konstrukcję dyszy zapewniającą niezawodne dostarczanie kropli oleju w kontrolowany sposób pokazano na rys. 3.25. Dostarczone przez przepływomierz sprężone powietrze jest podawane przez centralny kanał dyszy. Kolejny strumień powietrza trafia do jednostki kontrolnej, gdzie jest mieszany przez zawór z olejem w wymaganej proporcji. Następnie powstała mieszanka jest podawana do pierwszego układu dysz eżektorowych, przez które mieszanka jest wyrzucana i rozpylana jako główny strumień powietrza. Woda jest dostarczana przez przepływomierz do kolejnego układu dysz eżektorowych. Woda również jest rozpylana podczas przechodzenia przez te dysze. Gdy dwa rozpylone strumienie spotykają się za drugą dyszą, następuje adhezja oleju do powierzchni kropli wody wskutek różnicy między napięciem powierzch-



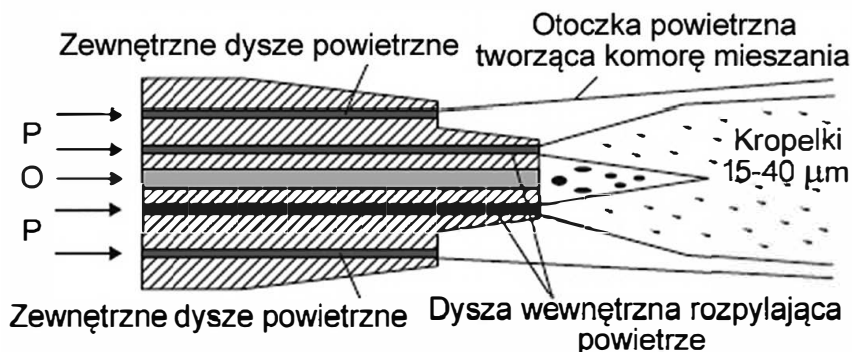
Rys. 3.26. Metody zewnętrznego zasilania aerozolem [55]

niowym wody i oleju, ponieważ średni rozmiar kropeł wody jest większy niż kropeł oleju. Dysza pokazana na rys. 3.25 zawiera trzeci i czwarty układ dysz wyrzutowych, aby zwiększyć możliwości kolizji cząstek wody i oleju w celu utworzenia cząstek OnW.

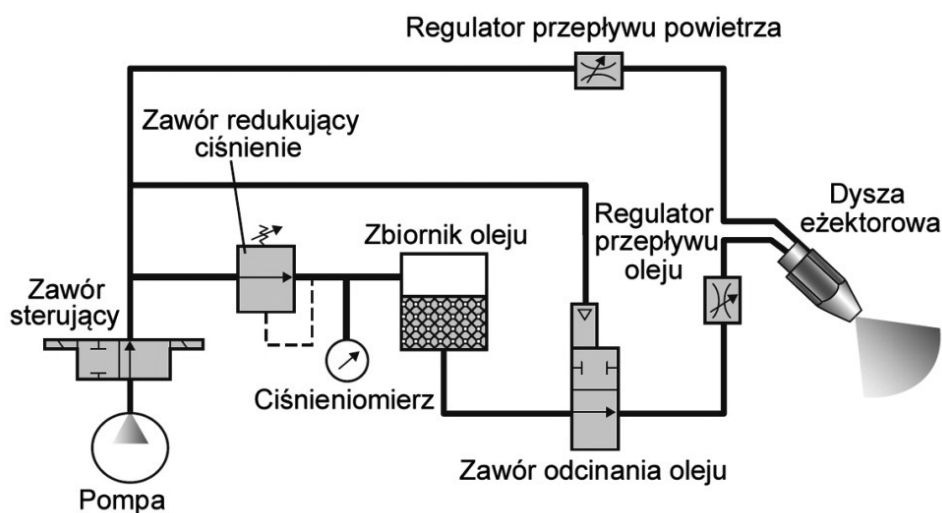
Klasyfikacja urządzeń do wytwarzania mgieł związana jest ze szczegółami dostarczania mieszaniny do strefy obróbki i obejmuje:

1. Urządzenia z zewnętrznym zasilaniem aerozolem, tj. aerozol jest dostarczany przez zewnętrzną dyszę umieszczoną na maszynie. Istnieją dwa rodzaje takich urządzeń, które pokazano na rys. 3.26. Na rys. 3.26 a olej O i sprężone powietrze P są dostarczane do dyszy eżektorowej, a aerozol powstaje tuż za tą dyszą. Zatem dysza pełni funkcję rozpylacza. Na rys. 3.26 przedstawiono sposób użycia konwencjonalnej dyszy, podobnej do tej stosowanej w zasilaniu olejem lub emulsją. Aerozol jest przygotowywany w zewnętrznym rozpylaczu, a następnie dostarczany do dyszy.

Jedną z możliwych konstrukcji dyszy eżektorowej pokazano na rys. 3.27. Ma ona dwa kanały powietrzne. Pierwszy z nich, zewnętrzny, tworzy otoczkę powietrzną, która służy jako komora mieszania. Drugi zapewnia dopływ powietrza rozpylającego, a rozpylany olej jest dostarczany przez kanał centralny.



Rys. 3.27. Konstrukcja dyszy eżektorowej



Rys. 3.28. Urządzenie kontrolne do wytwarzania aerozolu [55]

Warto również dodać, że regulacja konwencjonalnej dyszy nie jest prosta. Jeśli nie zostaną podjęte specjalne środki ostrożności, urządzenie może generować gęstą mgłę, która może pokryć warsztat i trafić do płuc operatorów. Aby temu zapobiec i uzyskać pełną kontrolę nad parametrami aerozolu, konieczne jest posiadanie urządzenia (rys. 3.28), które umożliwi regulowanie w szerokim zakresie wielkości kropli i szybkości przepływu oleju, regulując tym samym ustawienie odpowiedniego natężenia przepływu powietrza i oleju oraz ciśnienia oleju w zbiorniku.

Urządzenia do dostarczania aerozoli od zewnątrz mają następujące zalety:

- tania i prosta modernizacja istniejących maszyn,
- są wykorzystywane takie same narzędzia skrawające, jak w przypadku tradycyjnych MT,

- sprzęt jest łatwy w obsłudze i konserwacji,
- sprzęt może być przenoszony z jednej maszyny do drugiej,
- położenie dyszy w stosunku do strefy obróbki można regulować dla wygody operatora, a parametry aerozolu nie zależą od konkretnej lokalizacji dyszy.

2. Urządzenia z wewnętrznym zasilaniem aerozolem, w których aerozol jest dostarczany przez kanały w narzędziu. Jak w wariantcie poprzednim, dostępne są dwie opcje, a więc z zewnętrznym rozpylaczem oraz z wewnętrznym rozpylaczem umieszczonym we wrzecionie maszyny.

W pierwszym przypadku aerozol jest przygotowywany w zewnętrznym atomizerze, a następnie dostarczany przez wrzeciono i wewnętrzne kanały wykonane w narzędziu. Gdy to rozwiązanie jest zastosowane w maszynach CNC, urządzenie dostarczające aerozol musi uwzględniać częste wymiany narzędzi, które obecnie trwają tylko jedną lub dwie sekundy, ustawiając odpowiednie parametry aerozolu dla każdego narzędzia (operacji). Jeśli urządzenie jest wyłączane, co występuje przy każdej zmianie narzędzia, potrzebny jest czas, aby ponownie napełnić układ aerozolem. System dostarczania aerozolu z jednoczesnym systemem kontroli pracy układu pokazano na rys. 3.29. Aerozol jest wytwarzany w sposób ciągły i dostarczany do kierunkowego zaworu sterującego. Następnie zawór sterujący po zakończeniu wymiany narzędzia natychmiast wpuszcza aerozol do wrzeciona.

Zastosowanie zewnętrznego rozpylacza aerozolu ma następujące zalety:

- niski koszt urządzenia,
- możliwość zastosowania na maszynie CNC dwóch układów chłodzenia, np. zalewowego (lub wysokociśnieniowego przez narzędzie) i aerozolu,
- stosunkowo prosta konstrukcja urządzenia,
- dokładna kontrola parametrów wytwarzania aerozolu, dzięki czemu możliwe jest sterowanie warunkami pracy narzędzia.

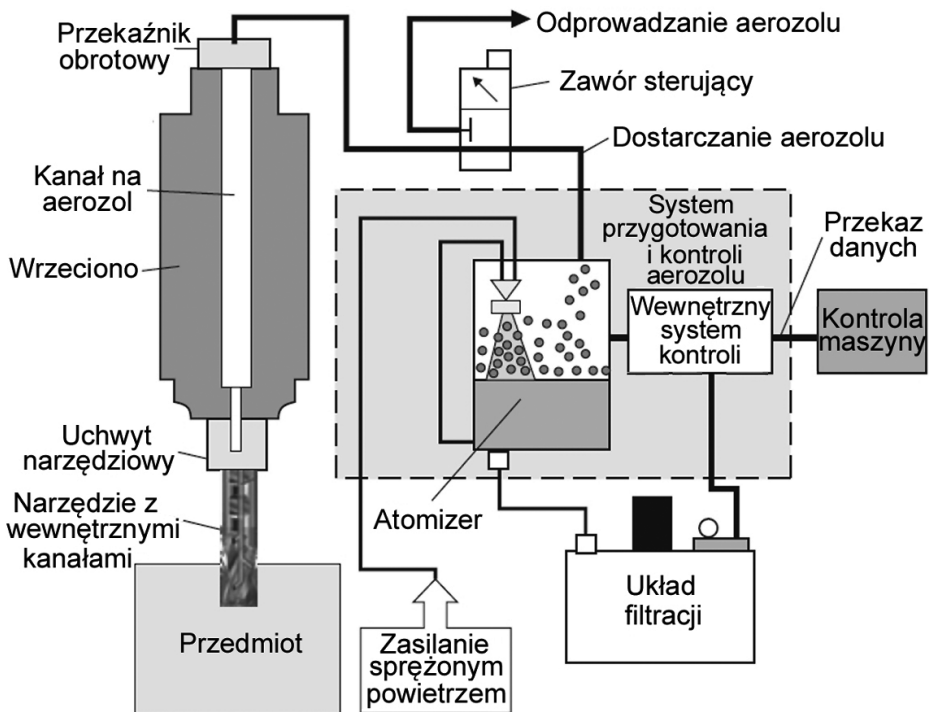
Stosując zewnętrzny rozpylacz, należy pamiętać o pewnych wadach, a mianowicie:

- Obracanie się wrzeciona wytwarza siłę odśrodkową, która powoduje pokrywanie olejem ścianek kanału podawania aerozolu i wymusza konieczność jego cyklicznego usuwania. W przypadku produkcji wielkoseryjnej lub masowej ten przestój może być kosztowny i niedopuszczalny.
- Należy zwrócić szczególną uwagę na położenie elastycznego przewodu łączącego zewnętrzną jednostkę wytwarzania aerozolu z wrzecionem: 1) powinien on znajdować się jak najbliżej maszyny; 2) promień krzywizny tego przewodu nie powinien być mniejszy niż 200 mm, aby zapobiec rozkładowi aerozolu. Często brak jest prostego sposobu na spełnienie tych dwóch wymagań, szczególnie w przypadku maszyn o dużych wymiarach oraz gdy przestrzeń hali produkcyjnej jest zatłoczona.

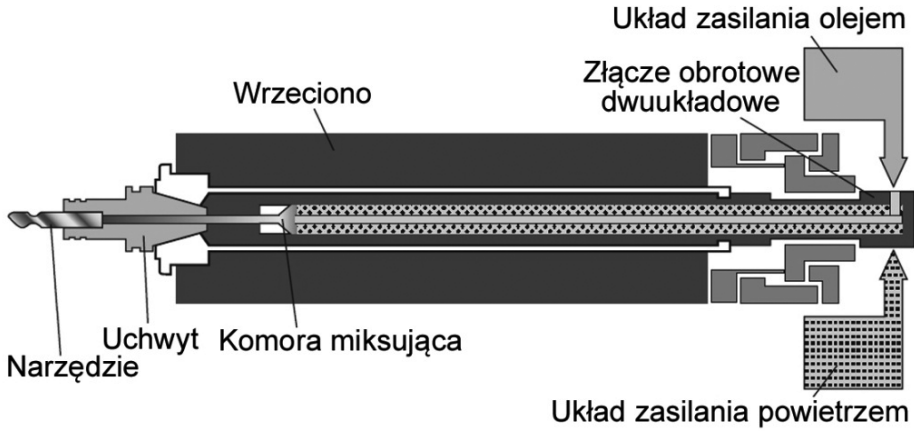
Możliwość rozwiązania tego problemu pokazano na rys. 3.29. W przedstawionym przypadku wąż dostarczania aerozolu może być tak długi, jak jest to potrzebne do wygodnej lokalizacji urządzenia.

- Parametry aerozolu, który dostaje się do strefy obróbki, mogą się różnić od wychodzących z urządzenia zewnętrznego w zależności od prędkości wrzeciona i konstrukcji kanałów zasilających.

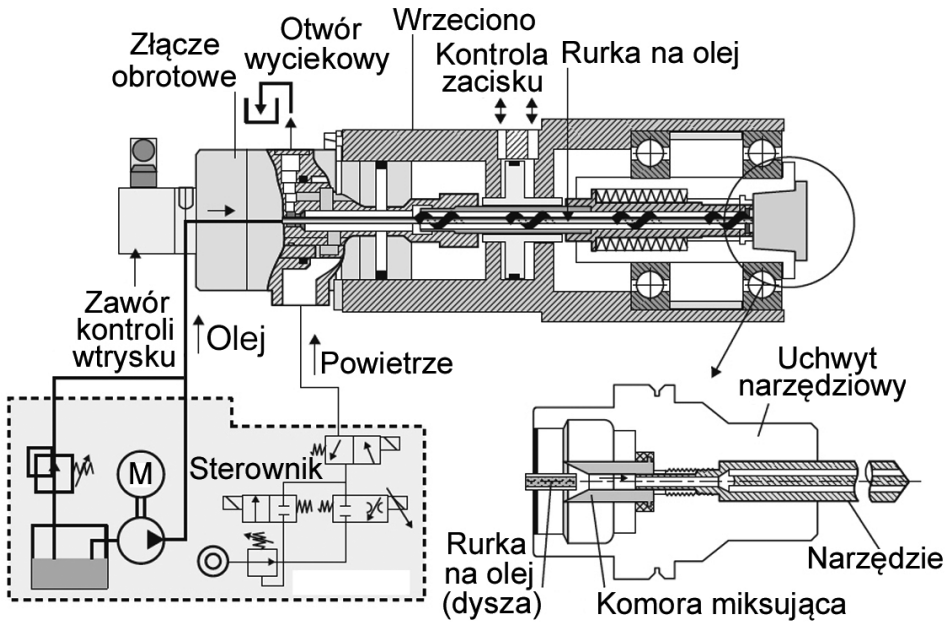
Aby rozwiązać problem zmniejszenia szybkości przepływu aerozolu w obracającym się wrzecionie, może być wykorzystana konstrukcja z rozpylaniem wewnętrznym, która przewodzi olej przez wrzeciono za pomocą centralnej rurki w otaczającym kanale powietrznym (rys. 3.30). Powietrze i olej są mieszane w celu utworzenia aerozolu w komorze znajdującej się blisko narzędzia. Ponieważ aerozol powietrzno-olejowy jest pod wpływem obrotów wrzeciona tylko na krótkim odcinku, prędkość przepływu aerozolu nie zależy znacząco od obrotów wrzeciona, a zatem nie zmienia się w czasie.



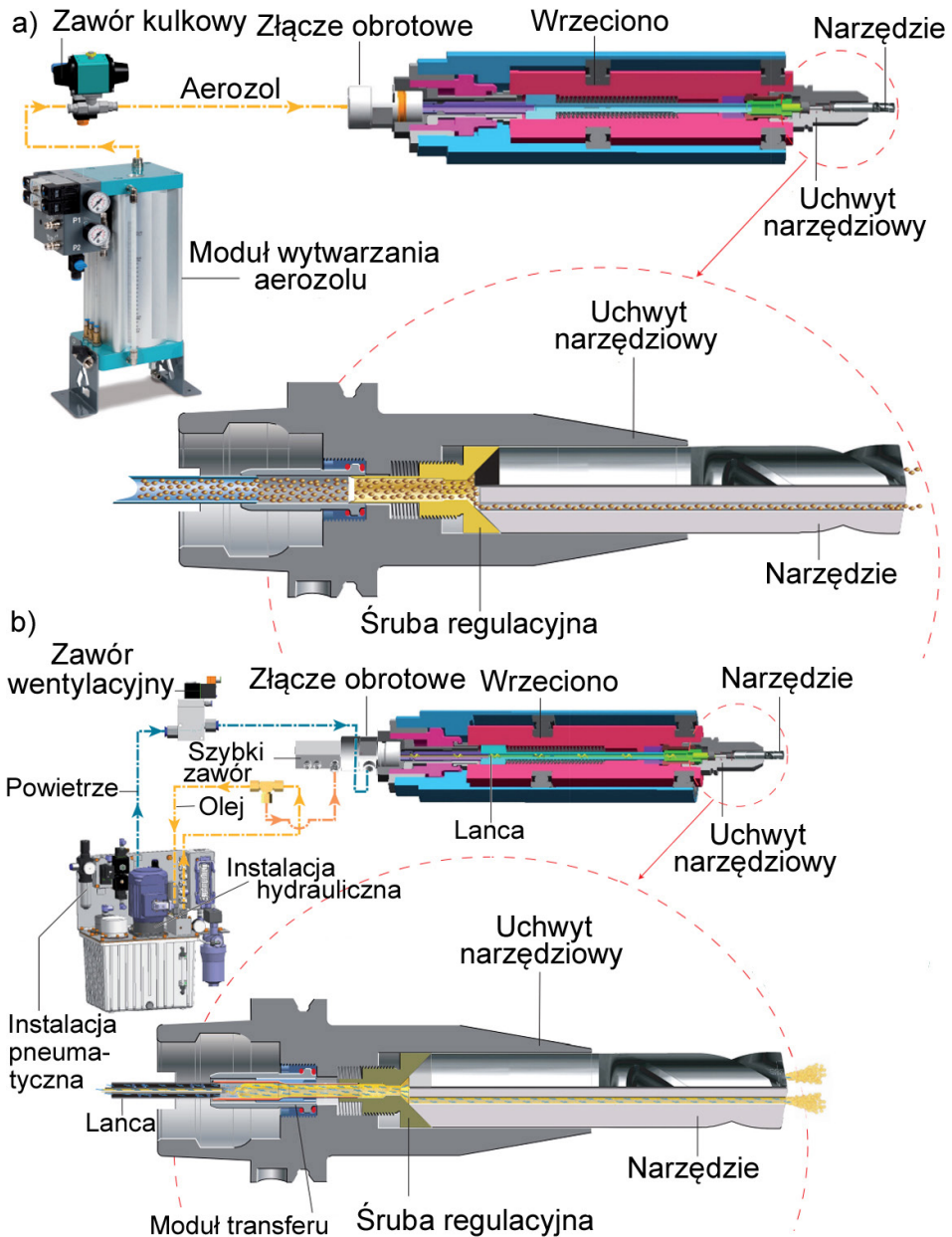
Rys. 3.29. Przykładowy system wewnętrznego dostarczania aerozolu przez narzędzie z jednoczesnym systemem kontroli [55]



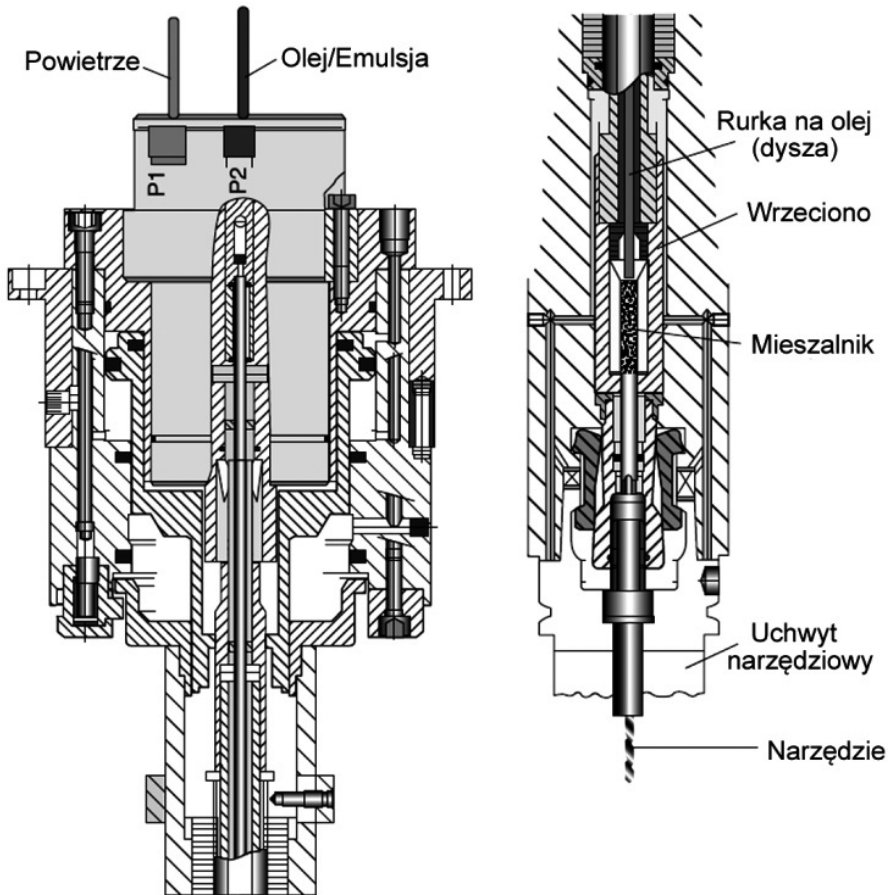
Rys. 3.30. Schemat rozmieszczenia mieszalnika w pobliżu uchwytu narzędziowego [55]



Rys. 3.31. Schemat dwukanałowego układu doprowadzania mgły olejowej firmy „Bielomatik” [55]



Rys. 3.32. Jedno- i dwukanałowe urządzenia firmy „Bielomatik”



Rys. 3.33. System dwukanałowy z mieszalnikiem usytuowanym we wrzecionie [55]

Jeśli aerozol jest przygotowywany w zewnętrznym atomizerze, jego parametry mogą być precyzyjnie kontrolowane i regulowane. Natomiast jeśli rozpylacz jest umieszczony wewnątrz wrzeciona lub uchwytu narzędziowego, nie ma możliwości regulowania parametrów podczas pracy lub nawet gdy narzędzie jest zainstalowane we wrzecionie. Nawet jeśli znane jest właściwe ustawienie dla konkretnego narzędzia i jego kanałów chłodziwa, nie może być ono odpowiednie dla następnego narzędzia.

W przypadku wewnętrznego przygotowania aerozolu kluczową kwestią jest wprowadzenie aerozolu do wewnętrznych kanałów narzędzia. W takim przypadku główne wymagania są następujące:

- w uchwycie narzędzia nie powinno być żadnych uszkodzeń, tzn. linia aerozolu powinna być idealnie gładka,

- w związku z tym, że kanały chłodziwa narzędzia nie są zwykle współosiowe z rurką aerozolu, elementy zapewniające płynne przejście aerozolu z tej rurki do kanałów narzędzia powinny być częścią konstrukcji uchwytu lub narzędzia.

Każde uszkodzenie na ścieżce transportu zakłóci płynny i stały przepływ aerozolu do strefy skrawania ze względu na siły odśrodkowe działające na kropelki oleju. Takie zakłócenie przepływu może potencjalnie prowadzić do katastrofalnego uszkodzenia narzędzia.

Konstrukcje komory mieszania i dyszy, a także kontrola wypływu oleju są zwykle opatentowane przez producenta obrabiarki, mogą być bardzo skomplikowane i kosztowne. Dwukanałowy system firmy „Bielomatik” pokazano na rys. 3.31. W tym systemie sprężone powietrze i olej są dostarczane we współosiowych kanałach wykonanych we wrzecionie i w ten sposób pozostają rozdzielone, aż do punktu przed uchwytem narzędziowym, gdzie tworzy się komora mieszania wytwarzająca aerozol, który następnie dostarczany jest do narzędzia skrawającego.

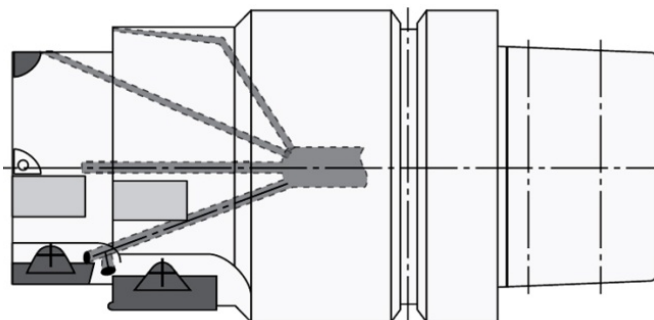
Kompletne składy jedno- i dwukanałowego urządzenia firmy „Bielomatik” pokazano na rys. 3.32.

Inną konstrukcję systemu dwukanałowego pokazano na rys. 3.33. Cechą charakterystyczną tego systemu jest komora mieszania, która znajduje się we wrzecionie, a nie jak w systemie firmy „Bielomatik” w uchwycie narzędzia.

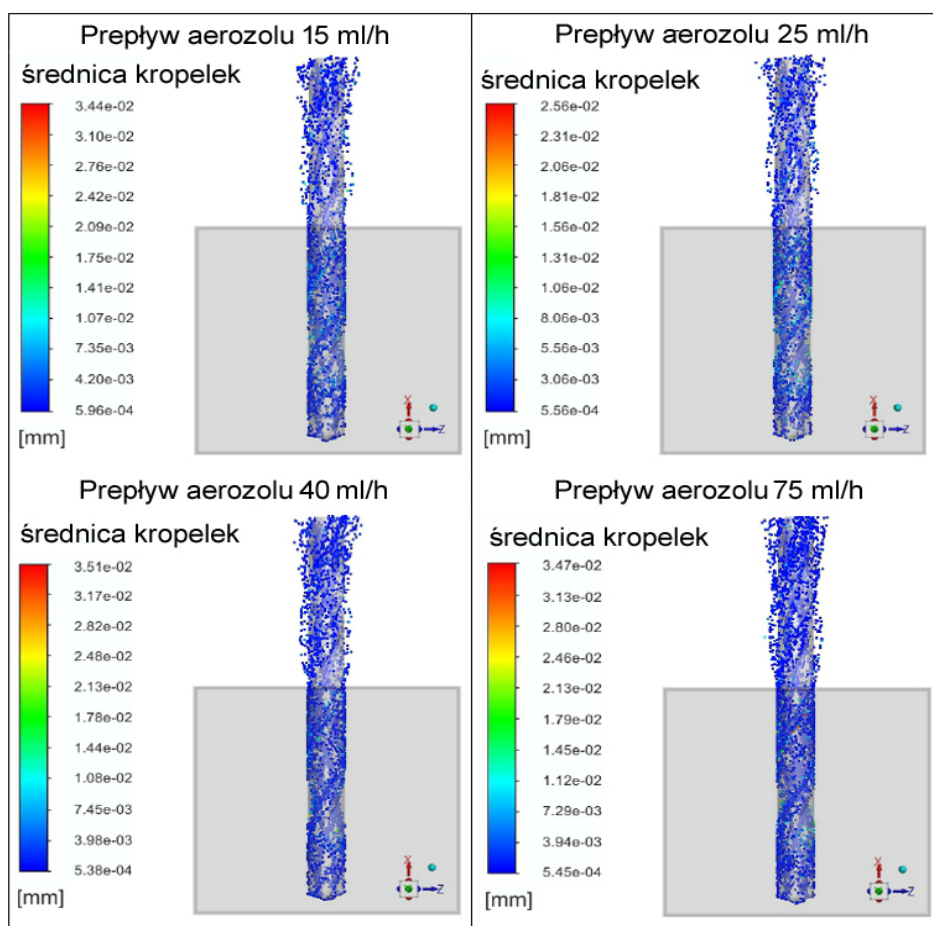
Bardzo ważną kwestią w wykorzystaniu aerozoli jest ilość i rozmieszczenie kanałów w korpusie narzędzia, ponieważ od tego uzależniony jest przepływ MT, a także wymiary wytwarzanych kropelek. Jak wykazano powyżej, w przemyśle stosowane są systemy jednokanałowe, dwukanałowe lub wielokanałowe, a w zależności od tych rozwiązań strugi MT mogą być różnie ukierunkowane (rys. 3.34 i rys. 3.35).



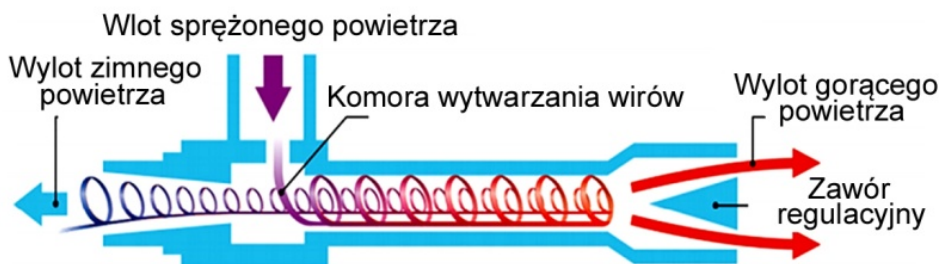
Rys. 3.34. Noże tokarskie VDI DIN69880 z różnymi układami dostarczania MT (firma „Iscar”)



Rys. 3.35. Rozwiertak wielostrzowy z układem wielokanałowym dostarczania MT (firma „Mapal”)



Rys. 3.36. Wpływ warunków wytwarzania aerozolu na średnice kropelek [56]



Rys. 3.37. Schemat działania rurki wirowej Ranque'a-Hilscha (na podstawie [58])

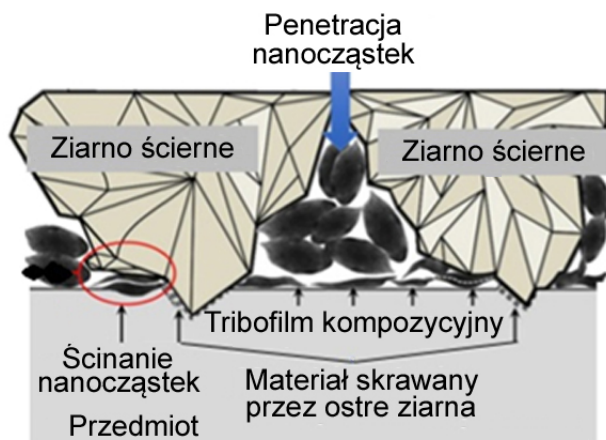
W zależności od szczegółów położenia kanałów i przepływu aerozolu zmieniają się wymiary pojedynczych kropelek (rys. 3.36), a także warunki chodzenia i smarowania, wartości temperatur w strefie skrawania, intensywność zużycia narzędzi itp.

Zwiększyć efektywność wytwarzania aerozoli można, dodając do systemu jego dostarczania rurkę wirową Ranque'a-Hilscha [57]. Rurka wirowa Ranque'a-Hilscha jest urządzeniem mechanicznym, które nie zawiera ruchomych części, natomiast oddziela od siebie gorące i zimne strumienie bez użycia energii elektrycznej lub środków chemicznych [58]. Zasada działania urządzenia została przedstawiona na rys. 3.37.

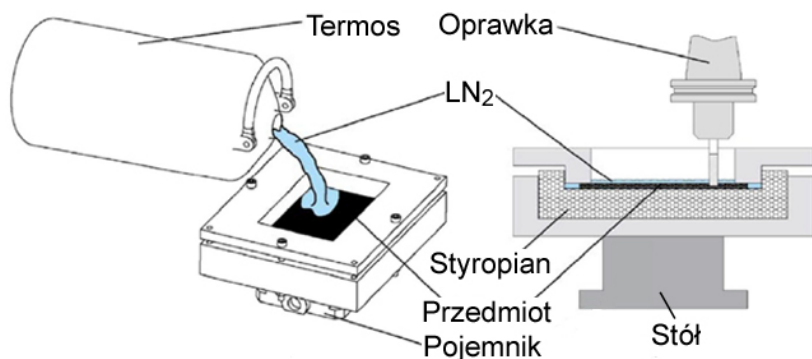
Sprężone powietrze dostaje się do generatora, który zapewnia jego ruch obrotowy z dużą prędkością i przemieszczanie wzdłuż rurki. W wyniku działania siły odśrodkowej ciśnienie przepływu powietrza w zewnętrznej części rurki jest wyższe w porównaniu z ciśnieniem w części środkowej. Podczas gdy wewnętrzny i zewnętrzny strumień powietrza początkowo obracają się w tym samym kierunku i z taką samą prędkością obrotową, z czasem wewnętrzny strumień zaczyna tracić swój pęd. Zewnętrzny strumień powietrza kinetycznie zyskuje utraconą energię, dlatego jego temperatura staje się wyższa. W ten sposób powietrze wpływające do rurki jest rozdzielane na strumienie gorące i zimnego powietrza.

Znaczący wzrost efektywności zastosowania metody MQL przy szlifowaniu można zapewnić, wykorzystując dodatki stałych smarów, np. dwusiarczku molibdenu [59]. W innym przypadku, przy szlifowaniu stali EN24 i żeliwa w warunkach MQL przy użyciu oleju sojowego i parafinowego z dodatkiem nanosmarów na bazie soi pokrytych nanocząstkami MoS_2 (rys. 3.38) zaobserwowano niższe siły tarcia na styku ściernica-przedmiot obrabiany, niższe zużycie energii i zużycie ściernicy. Zmniejszenie współczynnika tarcia uzasadnia się lepszą penetracją nanosmarów w strefie szlifowania.

Stosunkowo rzadko stosowana jest obróbka w obecności gazów w stanie ciekłym (rys. 3.39).



Rys. 3.38. Kształtowanie tribofilmu nanosmarowego przy szlifowaniu [59]



Rys. 3.39. Frezowanie w wannie z ciekłym azotem [60]

3.4.4. Doprowadzanie cieczy metodą wysokociśnieniową

Obecnie obserwuje się coraz szersze zastosowanie cieczy obróbkowej podawanej do strefy skrawania pod wysokim ciśnieniem, ponieważ ta metoda chłodzenia ma wiele zalet umożliwiających:

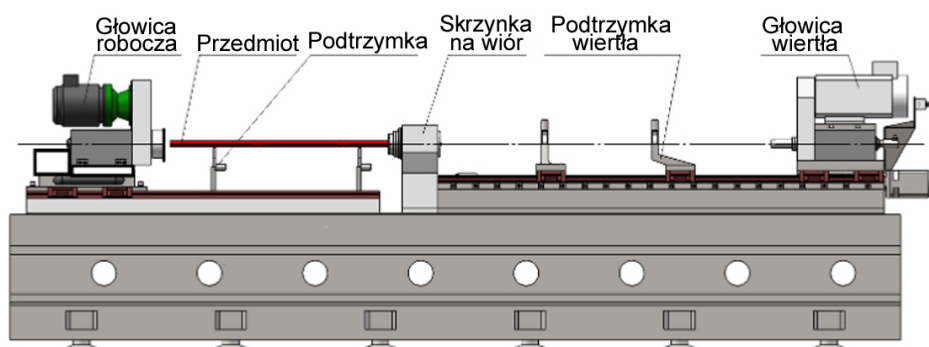
- skrócenie cyklu roboczego o 20-70%,
- zwiększenie posuwu przy skrawaniu o minimum 30%,
- zwiększenie żywotności kosztownych narzędzi skrawających i ściernych,
- zarządzanie kształtem i odprowadzaniem wiórów,
- zwiększenie prędkości wiercenia i jakości obróbki otworów,
- zmniejszenie uszkodzeń powierzchni spowodowanych nagłymi skokami temperatury,

- redukcję spiekania wiórów przy obróbce aluminium,
- wykonanie otworów gwintowanych wyższej jakości,
- ogólnie lepszą jakość powierzchni,
- możliwość obróbki bardzo twardych i niekonwencjonalnych materiałów.

W obróbce wysokociśnieniowej typowe ciśnienie wynosi 7 MPa, lecz w niektórych zastosowaniach może sięgać nawet 20 MPa i więcej.

Charakterystycznym przykładem obróbki elementów w warunkach wysokociśnieniowych jest operacja wiercenia głębokich otworów. Do tego celu zazwyczaj są stosowane następujące konstrukcje narzędzi:

- jednolite wiertła rurowe jednokanałowe z zewnętrznym rowkiem na odprowadzenie wióra,
- wiertła rurowe z głowicą wymienną i trzpieniem z pojedynczym kanałem kształtowym i zewnętrznym rowkiem na wiór (ang. *Single Tube System*, STS). Duża ilość chłodziwa jest pompowana pod wysokim ciśnieniem do obszaru wiercenia otworu. W trakcie obróbki wióry wypychane są przez rurę połączoną do głowicy od tyłu i nie dotykają przedmiotu obrabianego, zapewniając doskonałe wykończenie powierzchni. System STS stosuje się w specjalistycznych wiertarkach i wymaga właściwego uszczelnienia z przedmiotem obrabianym (rys. 3.40),



Rys. 3.40. Schemat wiertarki do wiercenia głębokich otworów

- wiertła z głowicą wymienną i rurą z dwoma kanałami kształtowymi na odprowadzanie wióra; system z dwoma kanałami (ang. *Double Tube System*, DTS) nazywany jest także konstrukcją „dwururową”. System uszczelniający i głowica dociskowa, które są wymagane w STS, nie są konieczne dla DTS, dlatego system ten nadaje się dla zastosowania w maszynach ogólnego przeznaczenia. Jednakże, ze względu na mniej wydajne odprowadzanie wiórów niż w przypadku systemu STS, zalecane jest stosowanie maksymalnej głębokości wiercenia 1000 mm.

- wiertła z głowicą eżektorową wykorzystują system dwururowy, w którym chłodziwo jest pompowane przez wąską przestrzeń między rurką wewnętrzną i zewnętrzną. Eliminuje to potrzebę stosowania głowicy ciśnieniowej i upraszcza system dostarczania chłodziwa. Do mocowania rur stosuje się specjalne złącze, które jest także używane do dostarczania chłodziwa pod wysokim ciśnieniem. Uszczelnienie tylnej części zestawu rur wymagane do dostarczania chłodziwa pod ciśnieniem w wierceniu STS nie jest konieczne, używana jest tylko tuleja prowadząca. Usuwanie wiórów odbywa się poprzez wewnętrzną rurę, na której tylnym końcu powstaje efekt eżekcji (zassanie powietrza do cieczy przepływającej przez wąski kanał rozpylacza i jej mieszanie z powietrzem tuż przed procesem rozpylania) wspomagający odprowadzanie wiórów. Ponieważ średnica rury jest większa niż w przypadku wiercenia STS, zwiększa się opór w jej skręcaniu umożliwiającą zastosowanie większych posuwów.

Rozwiązania konstrukcyjne narzędzi stosowanych do obróbki z wysokim ciśnieniem pokazano na rys. 3.41.



Rys. 3.41. Rozwiązania stosowane do obróbki głębokich otworów:

- wiertło rurowe jednolite STS z uszczelnieniem i adapterem, b) wiertło rurowe z płytką wymienną, c) wiertło STS z głowicą wymienną, d) wiertło DTS z głowicą wymienną, e) wiertło eżektorowe z głowicą wymienną, f) rura do odprowadzania wióra i chłodziwa

W operacjach wiercenia głębokich otworów chłodziwo musi spełniać wiele funkcji, do których zaliczyć należy m.in. usuwanie wiórów ze strefy skrawania i transportowanie ich przez kanały wylotowe, a także zmniejszanie sił skrawania i tarcia między elementami prowadzącymi a powierzchnią otworu oraz odprowadzanie ciepła. W tym

celu chłodziwo musi mieć odpowiednie właściwości, a stosowany sprzęt powinien zapewniać dopływ chłodziwa do strefy wiercenia w wymaganej ilości, pod wymaganym ciśnieniem i przy wymaganym natężeniu przepływu.

Podczas procesu obróbki w warunkach wysokociśnieniowych na narzędziu skrawającym i obrabianym przedmiocie tworzy się warstwa pary. Warstwa ta, zwana „barierą parową”, działa jak izolator ciepła, który hamuje chłodzenie w tzw. gorącej strefie, gdzie krawędź ostrza wchodzi w bezpośredni kontakt z obrabianym przedmiotem. Strefa gorąca utrzymuje wysoką temperaturę, wystarczającą do odkształcenia części, pęknięcia narzędzi, a nawet „obróbkę cieplną” samego metalu. Bariera parowa zapobiega rozprzestrzenianiu się ciepła. Chłodziwo pod wysokim ciśnieniem szybko przenika przez barierę parową i powoduje chłodzenie gorącej strefy i wiórów, powodując, że stają się one kruche i odrywają się od przedmiotu (następuje tzw. szok cieplny). Następnie wióry są wypłukiwane ze strefy wiercenia, dzięki czemu nie wchodzi ponownie w kontakt z narzędziem. Pozwala to na produkcję części wyższej jakości, a operatorom maszyn umożliwia zwiększenie prędkości i posuwów oraz wydłuża żywotność narzędzia, często pięciokrotnie lub więcej.

Odprowadzanie wiórów jest zapewnione, gdy przepływ chłodziwa w strefie skrawania ma prędkość, przy której jego energia kinetyczna jest wystarczająca do przepchnięcia wiórów wzdłuż kanałów odprowadzających. Wybrany przekrój poprzeczny kanałów odprowadzających wióry i chłodziwo decydują o minimalnie wymaganym natężeniu przepływu chłodziwa. Z kolei natężenie przepływu chłodziwa i jego lepkość wykorzystuje się do określenia ciśnienia chłodziwa i mocy wymaganej do pompowania chłodziwa przez kanały wlotowe i wylotowe. W zależności od średnicy i długości obrabianego otworu dla określonych zakresów ciśnienia i natężenia przepływu pobór mocy do pompowania chłodziwa może wynosić 6-10 kW, a w niektórych przypadkach przekraczać pobór mocy wymagany do skrawania. Dlatego bardzo ważne jest zmniejszenie poboru mocy na dostarczanie chłodziwa i usuwanie wiórów.

Jednym ze sposobów zmniejszenia poboru mocy jest stosowanie chłodziw o niskiej lepkości, co ma również pozytywny wpływ na ich oczyszczanie (filtrację) i zmniejszenie strat w postaci odpadów. Trzeba jednak zaznaczyć, że lepkość wpływa także na proces obróbki, w szczególności na warunki pracy elementów prowadzących. Zmniejszenie lepkości poniżej $(8-10)10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ przy pewnych ciśnieniach może prowadzić do wyciskania chłodziwa lub zerwania filmu smarowego pod elementami prowadzącymi narzędzie. Może to z kolei prowadzić do zwiększenia sił tarcia na prowadnicach, wystąpienia lub nasilenia drgań narzędzia, a także jego zużycia i pęknięcia. Ponadto może powodować występowanie wycieków chłodziwa przez szczeliny w pompie lub w zbiorniku oleju, co przy wysokich ciśnieniach może spowodować gwałtowny spadek przepływu MT.

Skuteczne usuwanie wiórów i produktów zużycia narzędzia jest ułatwiane dzięki korzystnym właściwościom myjącym chłodziwa, tj. zdolności do zwilżania wiórów

i cząstek zużycia, zapobiegania ich przywieraniu i spajaniu z powierzchnią narzędzia i przedmiotu obrabianego.

Zmniejszenie sił skrawania i tarcia uzyskuje się poprzez wykorzystanie właściwości smarowych chłodziwa, a także obecność odpowiednich dodatków i substancji powierzchniowo czynnych, najczęściej związków na bazie siarki, chloru lub fosforu.

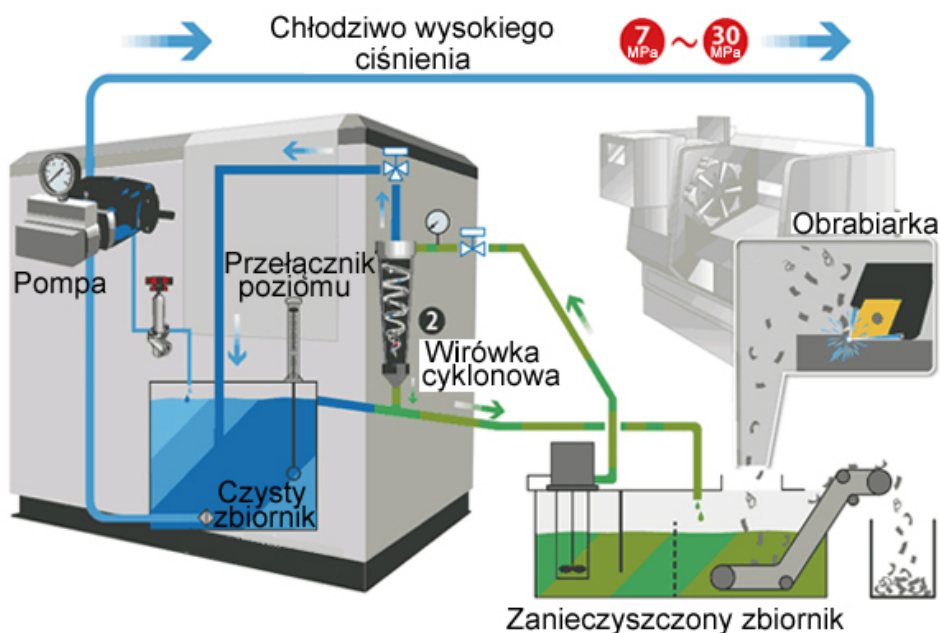
Podczas obróbki głębokich otworów chłodziwo dostarczane do strefy skrawania pod ciśnieniem przenika do mikropęknięć i mikroszczelin obecnych w strefie kształtowania wiórów oraz wchodzi w interakcje z materiałem przedmiotu obrabianego i narzędzia, tworząc na ich powierzchniach filmy smarowe, które chronią powierzchnie trące. Szczególnie korzystne są powłoki chemiczne wytrzymujące wysokie ciśnienia i wysokie temperatury (filmy chlorkowe nie ulegają zniszczeniu do temperatury 5000°C, filmy fosforanowe do 7000°C, a filmy siarczkowe do 10 000°C). Jednocześnie takie filmy mają niską odporność na ścinanie, co pomaga zmniejszyć współczynnik tarcia. Każdy z dodatków zastosowanych w chłodziwach przyczynia się do tworzenia własnego filmu, który powstaje i utrzymuje się w określonych warunkach obróbki. Ponadto każdy z dodatków w obecności drugiego jest bardziej aktywny (efekt synergetyczny).

Koszty energii skrawania i tarcia zmieniają się w zależności od temperatury cyrkulującego chłodziwa. Każde chłodziwo ma swój obszar optymalnych temperatur, minimalnych sił i momentów, przy których występują minimalne wibracje i koszty energii.

Temperatura cyrkulującego chłodziwa mierzona jest na wyjściu z kanału wylotowego przed wejściem do zbiornika. Odzwierciedla ona wiele złożonych zjawisk zachodzących w strefie wiercenia. Strefa optymalnych temperatur krążącego chłodziwa odpowiada optymalnym warunkom istnienia warstw chemicznych i optymalnej lepkości, przy których można zachować smarowanie kontakto-hydrodynamiczne.

Innym obszarem zastosowania chłodzenia wysokociśnieniowego jest toczenie i frezowanie na maszynach CNC. System wysokociśnieniowy zapewnia sterowanie przepływem płynu chłodzącego, tzn. umożliwia dozowanie i rozprowadzanie płynu pod zadaniem ciśnieniem, odzyskuje i filtruje płyn zanieczyszczony cząstkami stałymi powstającymi podczas obróbki i jednocześnie zapewnia recykulację (rys. 3.42). Strumień zoptymalizowany zgodnie z wymaganiami dotyczącymi ciśnienia i przepływu MT do każdego narzędzia skutecznie chłodzi i smaruje obszar roboczy, umożliwia kontrolę odprowadzenia wiórów i ogranicza wydzielanie ciepła, zapewniając tym samym natychmiastowy wzrost wydajności i produktywności centrum obróbkowego CNC.

Firma „Haas Automation” zaproponowała rozwiązanie, w którym zastosowano programowaną wielopozycyjną dyszę do dostarczania chłodziwa. Zapewnia ona zwiększenie produktywności procesu obróbkowego i skrócenie czasu cyklu produkcyjnego (rys. 3.43). Dysza precyzyjnie kieruje strumień chłodziwa do narzędzia skrawającego i strefy obróbki.



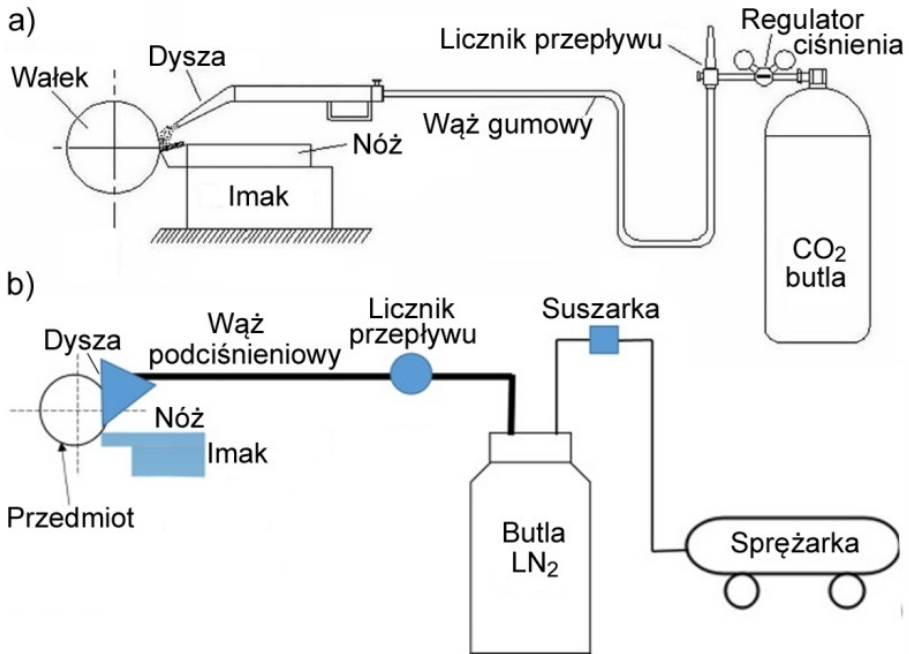
Rys. 3.42. System chłodzenia wysokociśnieniowego firmy „DMG MORI”



Rys. 3.43. Skomputeryzowana dysza firmy „Haas Automation”

3.4.5. Doprowadzanie środków gazowych

Obecnie jako środki gazowe uznaje się dwa skroplone gazy, tj. ciekły azot LN_2 i w mniejszym stopniu ciekły dwutlenek węgla LCO_2 oraz mieszanki tych substancji z aerozolami stosowanymi w metodzie MQL. Gazy skroplone mogą być podawane od zewnątrz przez dysze lub przez kanały w narzędziu. Układy do podawania LN_2 oraz LCO_2 przez dyszę zewnętrzną pokazano na rys. 3.44, natomiast przykłady dysz zewnętrznych na rys. 3.45.

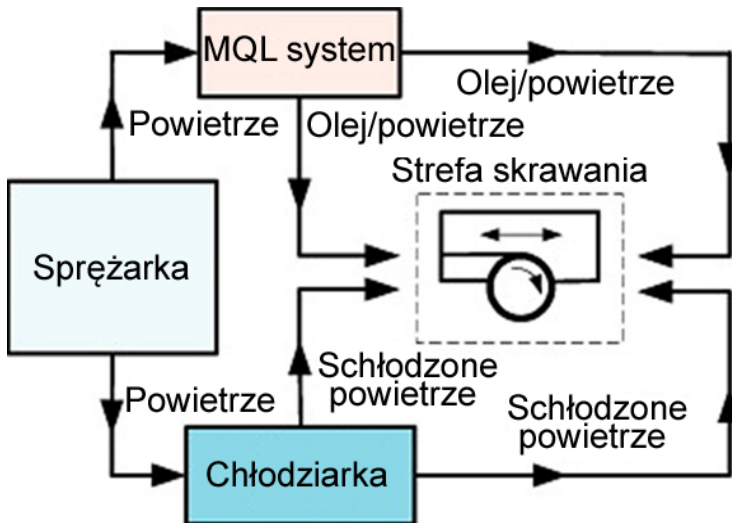


Rys. 3.44. Układy do podawania LCO_2 (a) i LN_2 (b) przez dyszę zewnętrzną



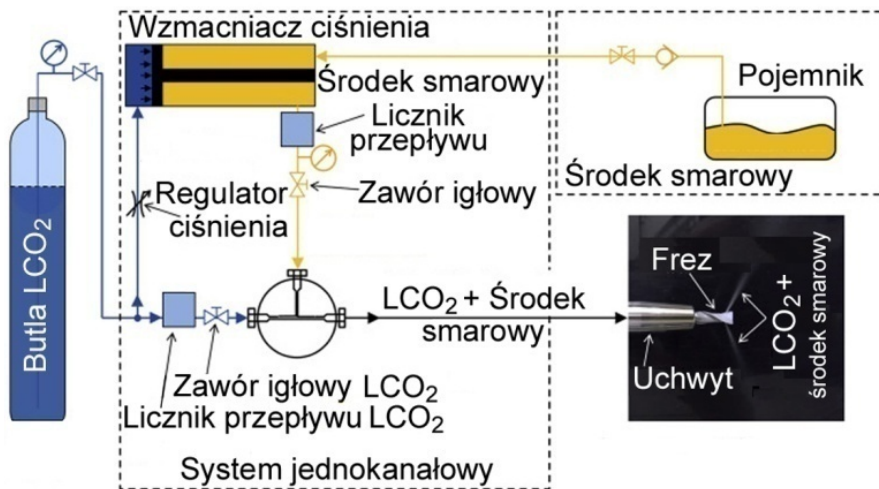
Rys. 3.45. Przykłady układów wielokanałowych dysz zewnętrznych do dostarczania LN_2 i LCO_2

Bardziej efektywnym rozwiązaniem jest połączenie podawania powietrza i aerozolu (rys. 3.46).



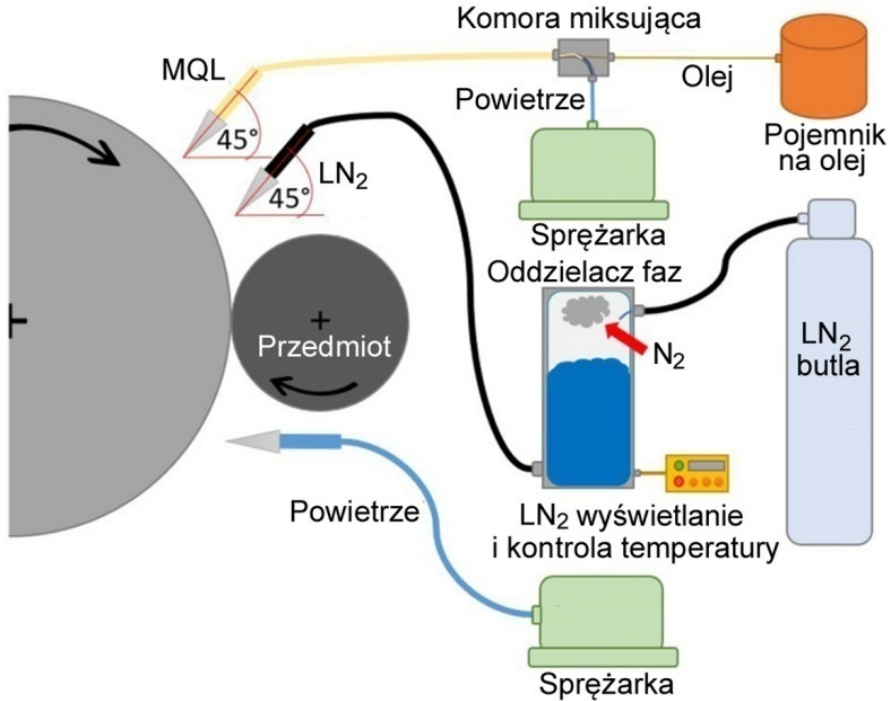
Rys. 3.46. Schemat podawania powietrza i aerozolu (system MQL)

System podawania mieszaniny LCO_2 i dodatkowego środka smarowego pokazano na rys. 3.47.



Rys. 3.47. System podawania mieszaniny LCO_2 i dodatkowego środka smarowego

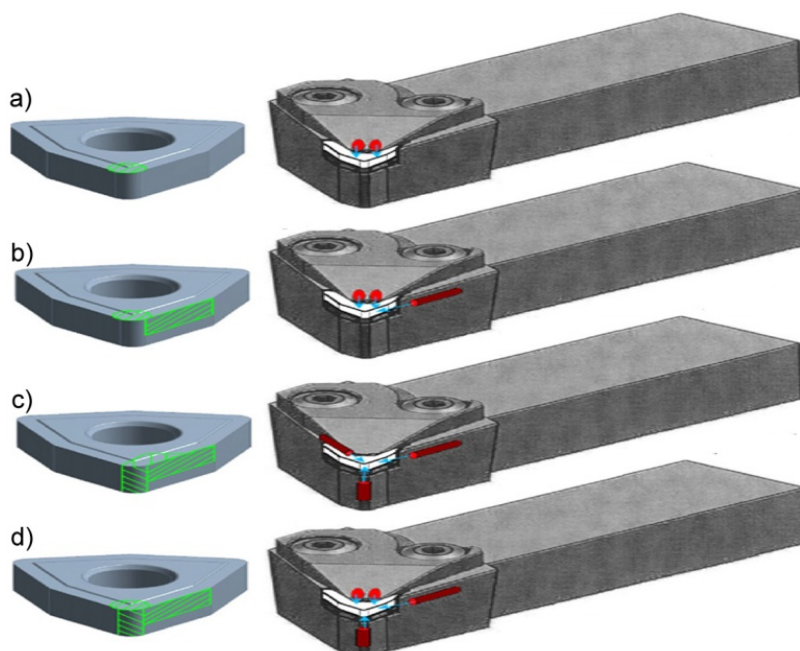
System podawania mieszaniny LCO_2 i dodatkowego środka smarowego w procesie szlifowania pokazano na rys. 3.48.



Rys. 3.48. System podawania mieszaniny LCO_2 i dodatkowego środka smarowego w procesie szlifowania

Możliwe usytuowania kanałów wewnętrznych w narzędziach tokarskich przy zastosowaniu ciepłego azotu i ich oddziaływania na powierzchnie płytek skrawających pokazano na rys. 3.49. Rysunek ten prezentuje następujące położenia dysz:

- chłodziwo jest dostarczane do naroża narzędzia przez dysze na standardowej oprawce narzędziowej (rys. 3.49 a),
- chłodziwo jest dostarczane do naroża narzędzia przez dysze na standardowej oprawce narzędziowej oraz przez dodatkową dyszę kierującą chłodziwo na główną powierzchnię przyłożenia (rys. 3.49 b),
- chłodziwo jest dostarczane przez trzy dodatkowe dysze kierujące chłodziwo na główną powierzchnię przyłożenia, naroże i powierzchnię natarcia (rys. 3.49 c),
- chłodziwo jest dostarczane przez trzy dodatkowe dysze kierujące je na główną powierzchnię przyłożenia, naroże i powierzchnię natarcia, a także przez dodatkową



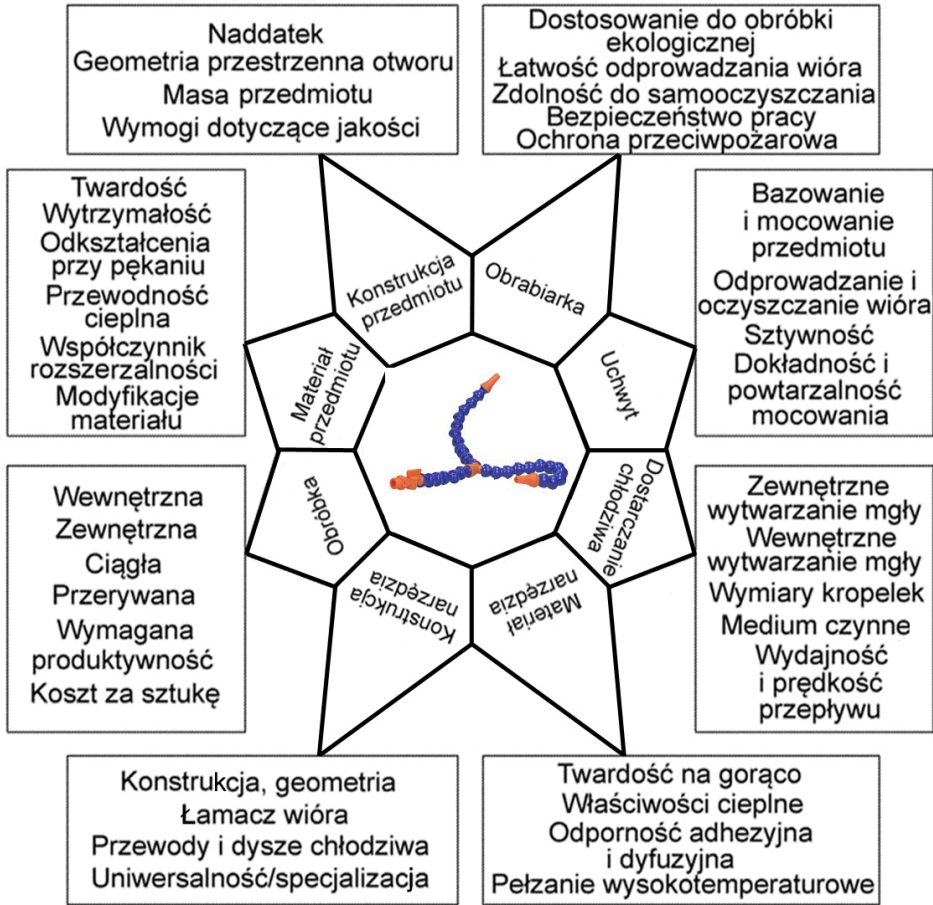
Rys. 3.49. Schematy kanałów do dostarczania LN_2 do strefy obróbki i ich oddziaływania na powierzchnie płytek skrawających [61]

dyszę znajdującą się pod płytką wymienną, która kieruje chłodziwo na naroże narzędzia (rys. 3.49 d).

Należy zauważyć, że wbudowane dysze w oprawce są przeznaczone do rozdrabniania wiórów poprzez kierowanie większej ilości chłodziwa na powierzchnię natarcia, podczas gdy dysza pokazana na rys. 3.49 c kieruje chłodziwo w dół i zalewa większy obszar powierzchni natarcia (pokrywa cały obszar, który jest używany podczas skrawania).

3.5. Współzależności między cechami mediów technologicznych a szczegółami procesu produkcyjnego

Wykorzystanie MT w trakcie produkcji może odnieść sukces tylko wtedy, gdy przeanalizowany zostanie cały zestaw wskaźników procesu obróbki (rys. 3.50). Taki zestaw uwzględnia szczegóły wykorzystanych maszyn, narzędzi, oprzyrządowania, konstrukcji części oraz proces obróbki.



Rys. 3.50. Zestaw wskaźników procesu technologicznego oddziałujących na warunki wykorzystania MT

Aby uczynić wykorzystanie MT bardziej przyjaznym dla użytkownika i zmniejszyć problemy w jego stosowaniu, powinna być zapewniona analiza systemowa obejmująca dwa główne zagadnienia, które dotyczą:

- procesu obróbki, w którym materiał obrabiany, parametry obróbki, konstrukcja i materiał narzędzia skrawającego, konstrukcja przedmiotu obrabianego, tolerancje itp. są rozpatrywane wspólnie w celu oceny możliwości zastosowania MT,
- aparatury i jej konfiguracji niezbędnej do zastosowania MT; na tym etapie należy wybrać konkretny schemat zastosowania MT, składniki MT i parametry jego wykorzystania.

Rozpatrując bardziej szczegółowo zagadnienie pierwsze, można wymienić kilka obszarów, które powinny zostać rozważone, a mianowicie:

- informację o przedmiocie (właściwości materiałowe, kształt, wymiary i masa, planowane naddatki, wymagania jakościowe),
- informację o maszynie (dostosowanie do obróbki ekologicznej, łatwość odprowadzania wióra i jego oczyszczania, bezpieczeństwo pracy i ochrona przeciwpożarowa),
- konstrukcję uchwytu (zasady bazowania i mocowania przedmiotu, łatwość oczyszczania wióra, sztywność, powtarzalność i dokładność mocowania),
- konstrukcję narzędzia (właściwości materiału ostrza, konstrukcję i geometrię ostrza, obecność łamaczy wióra, obecność przewodów, kanałów i dysz na chłodziwo),
- szczegóły procesu obróbki (zewnątrzną lub wewnętrzną, ciągłą lub przerywaną, wymaganą produktywność i ekonomiczność).

Przy analizie drugiego zagadnienia wskazać należy takie szczegóły, jak: rodzaj MT (stałe, ciekłe, gazowe, użycie dodatków EP), szczegółowy gatunek MT, zewnętrzne lub wewnętrzne doprowadzanie MT do strefy obróbki, parametry aerozolu (wymiar kropelek, wydajność i prędkość przepływu itd.).

PODSUMOWANIE

Celem niniejszej książki jest przybliżenie studentom kierunków technicznych wybranych zagadnień związanych z utworzoną nową mapą drogową dla procesów obróbki skrawaniem, opracowaną z uwzględnieniem wytycznych Komitetów Naukowo-Technicznych „Skrawanie” (STC C) i „Szlifowanie” (STC G) Międzynarodowej Akademii Inżynierii Produkcji (CIRP). Oczywiście jest, że istnieje wiele aspektów związanych z procesami obróbki skrawaniem i ścierniej, w których występuje dość ograniczona wiedza pomimo wieloletnich intensywnych badań w tych obszarach. Nowa era cyfryzacji (łączności cyfrowej) otwiera zupełnie nowe spojrzenie na możliwości zapewnienia ekonomicznej i wysokojakościowej produkcji elementów maszyn w procesach obróbki mechanicznej.

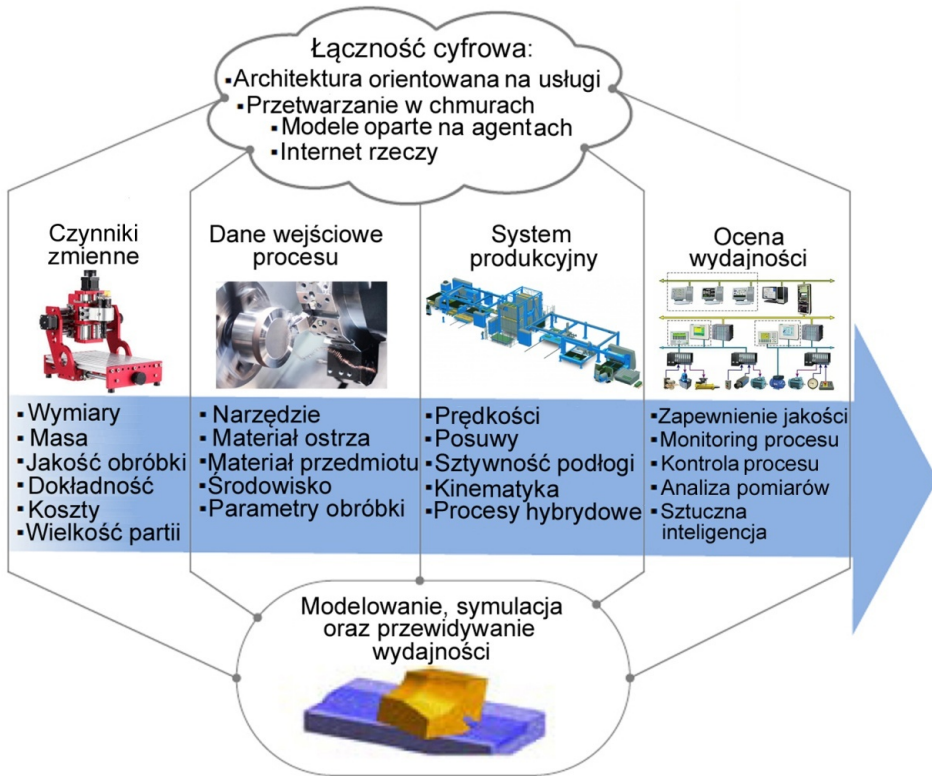
Obecnie istnieją wyjątkowe możliwości innowacyjnego przemysłu, które pokazano na rys. 1.

Schemat mapy drogowej obejmuje wiele istotnych pojęć, których definicje muszą zostać wyjaśnione:

- architektura orientowana na usługi – jest to podejście do projektowania oprogramowania, które koncentruje się na budowaniu funkcjonalnych, skalowalnych systemów z poszczególnych komponentów, zwanych usługami;
- przetwarzanie w chmurze – jest to dostarczanie usług obliczeniowych za pośrednictwem Internetu („chmura”);
- modele oparte na agentach – są to modele obliczeniowe, w których jednostki lub zespoły (agenty) są przedstawiane jako unikalne i autonomiczne podmioty wchodzące w interakcje ze sobą i środowiskiem zewnętrznym;
- Internet rzeczy (ang. *Internet of Things*, IoT) – oznacza sieć obiektów fizycznych („rzeczy”), które są wyposażone w czujniki, oprogramowanie i inne technologie w celu łączenia się i wymiany danych z innymi urządzeniami i systemami za pośrednictwem Internetu.

Wyjaśnione powyżej zagadnienia dotyczące nowych technologii i cyfryzacji są bazą i bodźcami dla rozwoju obecnie coraz to szerzej wdrażanej w życie koncepcji Przemysłu 4.0 (ang. *Industry 4.0*) i będącej w fazie wyraźnego rozwoju koncepcji Przemysłu 5.0 (ang. *Industry 5.0*).

W niniejszym podręczniku opisano zagadnienia związane z intensyfikacją procesów obróbki skrawaniem i ścierniej, a także rolę mediów technologicznych w procesach obróbki mechanicznej. Treści zawarte w opracowaniu potwierdzają, że w ostat-



Rys. 1. Schemat mapy drogowej w chmurze jako punkt wyjścia dla obszarów skrawania i szlifowania (na podstawie [62])

nich dekadach nastąpił wyraźny postęp technologiczny w tych obszarach. Niemniej jednak przewiduje się, że rozwój nadal będzie postępować, a więc można oczekiwać, że w kolejnych latach nastąpi dalszy wzrost wydajności obróbki mechanicznej uwzględniający ulepszone standardy bezpieczeństwa, aktualny poziom ochrony środowiska i niższe koszty wytwarzania.

Bez wątpienia informacje specjalistyczne zawarte w podręczniku umożliwią czytelnikowi pogłębienie wiedzy w obszarze nowoczesnych technologii stosowanych w obróbce skrawaniem i ściernej. Zgromadzona wiedza może stanowić cenne wsparcie przy podejmowaniu racjonalnych i dobrze uzasadnionych decyzji przemysłowych podczas wdrażania rozwiązań mających zapewnić wzrost wydajności pracy zakładów produkcyjnych.

Należy zwrócić uwagę, że obszary rozwoju obróbki mechanicznej ostatnich lat związane są również z takimi zagadnieniami, jak obróbka z zastosowaniem różnych pól energetycznych, obróbka kompletna i hybrydowa oraz mikroobrobka (obrobka elementów o wymiarze kilku milimetrów lub nawet kilku mikrometrów). Kwestie te Autorzy zamierzają poruszyć w kolejnym opracowaniu.

LITERATURA

- [1] Wang B., Liu Z., Cai Y., Luo X., Ma H., Song Q., Xiong Z. (2021), *Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high speed metal cutting: A review*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, R. 166, 103744.
- [2] Grzesik W. (2018), *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, Wydawnictwo WNT, Warszawa.
- [3] Schneider T. (1996), *Hochgeschwindigkeitsschneiden*, Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, Hanser Verlag, München-Wien.
- [4] Schulz H. (1996), *Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*, Carl Hanser, München.
- [5] Wang B., Liu Z. (2015), *Shear localization sensitivity analysis for Johnson-Cook constitutive parameters on serrated chips in high speed machining of Ti6Al4V*, „Simulation Modelling Practice and Theory”, R. 55, s. 63-76.
- [6] Wang B., Liu Z., Hou X., Zhao J. (2018), *Influences of cutting speed and material mechanical properties on chip deformation and fracture during high-speed cutting of Inconel 718*, „Materials”, R. 11(4), 461.
- [7] *Słownik języka polskiego PWN, Proces adiabatyczny*, <https://sjp.pwn.pl/> [dostęp: 28.11.2024].
- [8] Brown M., Crawford P., M'Saoubi R., Larsson T., Wynne B., Mantle A., Ghadbeigi H. (2019), *Quantitative characterization of machining-induced white layers in Ti-6Al-4V*, „Materials Science Engineering A”, R. 764, 138220.
- [9] *Słownik języka polskiego PWN, Asymptota*, <https://sjp.pwn.pl/> [dostęp: 25.10.2024].
- [10] Denkena B., Ben Amor R., De Leon-Garcia L., Dege J. (2007), *Material specific definition of the high speed cutting range*, „International Journal of Machining and Machinability of Materials”, R. 2(2), s. 176-185.
- [11] Sutter G., Molinari A. (2005), *Analysis of the Cutting Force Components and Friction in High Speed Machining*, „Journal of Manufacturing Science and Engineering”, R. 127(2), s. 245-250.
- [12] Gente A., Hoffmeister H.-W. (2001), *Chip Formation in Machining Ti6Al4V at Extremely High Cutting Speeds*, „CIRP Annals”, R. 50(1), s. 49-52.
- [13] Klocke F. (2004), *Basics of HPC and resulting mechanical and thermal characteristics*, [w:] *Proceedings of the CIRP international conference on high performance cutting*, Aachen, s. 19-20.
- [14] Bouzakis K.-D., Mirisidis I., Lili E., Michailidis N., Sampris A., Skordaris G., Pavlidou E., Erkens G., Wirth I. (2006), *Impact resistance of PVD films and milling performance of coated tools at various temperature levels*, „CIRP Annals”, R. 55(1), s. 67-70.
- [15] Neugebauer R., Bouzakis K.D., Denkena B., Klocke F., Sterzing A., Tekkaya A.E., Wertheim R. (2011), *Velocity effects in metal forming and machining processes*, „CIRP Annals”, R. 60(2), s. 627-650.
- [16] Zabiński R., Trochimczuk R. (2011), *Wybrane problemy projektowania wysokoobrotowych elektro-wrzecion frezarskich o niestandardowym łożyskowaniu*, „Acta Mechanica et Automatica”, R. 5(1), s. 133-136.

- [17] Korkmaz E., Gupta M.K., Robak G., Moj K., Krolczyk G.M., Kuntoğlu M. (2022), *Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on properties, future trends and challenges*, „Journal of Manufacturing Processes”, R. 81, s. 1040-1063.
- [18] Cichosz P. (2006), *Narzędzia skrawające*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [19] Cichosz P. (red.) (2022), *Nowoczesne procesy obróbki skrawaniem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [20] PN EN ISO-15641:2004. *Milling Cutters For High Speed Machining – Safety Requirements*.
- [21] Su G., Liu Z., Li L., Wang B. (2015), *Influences of chip serration on micro-topography of machined surface in high-speed cutting*, „International Journal of Machine Tools and Manufacture”, R. 89, s. 202-207.
- [22] Chen Z., Peng R.L., Zhou J., M'Saoubi R., Gustafsson D., Moverare J., *Effect of machining parameters on cutting force and surface integrity when high-speed turning AD 730™ with PCBN tools*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, R. 100(9), s. 2601-2615.
- [23] M'Saoubi R., Larsson T., Outeiro J., Guo Y., Suslov S., Saldana C., Chandrasekar S. (2012), *Surface integrity analysis of machined Inconel 718 over multiple length scales*, „CIRP Annals”, R. 61(1), s. 99-102.
- [24] Wang B., Liu Z., Su G., Ai X. (2015), *Brittle removal mechanism of ductile materials with ultrahigh-speed machining*, „Journal of Manufacturing Science and Engineering”, R. 137(6), 061002.
- [25] Jacobson M., Dahlman P., Gunnberg F. (2002), *Cutting speed influence on surface integrity of hard turned bainite steel*, „Journal of Materials Processing Technology”, R. 128(1-3), s. 318-323.
- [26] Velásquez J.P., Tidu A., Bolle B., Chevrier P., Fundenberger J.-J. (2010), *Sub-surface and surface analysis of high speed machined Ti-6Al-4V alloy*, „Materials Science and Engineering: A”, R. 527(10-11), s. 2572-2578.
- [27] Wang F., Liu Z.Y., Guo Y.B., Zhao J., Liu Z.Q. (2017), *Efficient multiscale modeling and validation of residual stress field in cutting*, „Journal of Manufacturing Science and Engineering”, R. 139(9), s. 091004.
- [28] Derrien S., Vigneau J. (1997), *High speed milling of difficult to machine alloys*, [w:] *Proceedings of the First French and German Conference on High Speed Machining*, red. A. Molinari, H. Schulz, H. Schulz, University of Metz, France.
- [29] Tönshoff H.K. (2001), *Machining: Generalities and Economics*, „Encyclopedia of Materials: Science and Technology”, s. 4698-4703.
- [30] Oczko K.E. (2007), *Obróbka wysoko produktywna – wiodącym trendem obróbki skrawaniem*, [w:] *Obróbka skrawaniem: wysoka produktywność*, red. P. Cichosz, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, s. 31-50.
- [31] Cichosz P., Kołodziej M. (2009), *Wpływ ostrzy typu Wiper na chropowatość obrobionej powierzchni oraz siły skrawania*, [w:] *Obróbka skrawaniem: zaawansowana technika*, red. H. Latoś, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, s. 73-80.
- [32] VDI 3411:2000-08. *High performance grinding of metallic materials using CBN grinding wheels and high cutting speeds*, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure/Verein Deutscher Ingenieure.
- [33] Feldshtein E., Leksycki K. (2024), *Wybrane zagadnienia wysokowydajnej obróbki mechanicznej: podręcznik*, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra.
- [34] Portalnarzedzi.pl, *Szlifowanie metali (część ii). Gatunki i wielkości ziaren narzędzi ściernych nasypowych*, <https://portalnarzedzi.pl/> [dostęp: 27.11.2024].

- [35] Chen H., Zhao J., Wang Z., Dong J., Yu T. (2021), *Modeling virtual abrasive grain based on random ellipsoid tangent plane*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, R. 113, s. 2049-2064.
- [36] Nadolny K. (2012), Autoreferat, Załącznik do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w dziedzinie Nauk Technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn, Koszalin.
- [37] Wojtewicz M., Baran J., Plichta J., Sienicki W. (2012), *Zastosowanie impregnowanych elementarnych ściernic do szlifowania wielkogabarytowych powierzchni głowicami wielonarzędziowymi*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, R. 5, s. 472-477.
- [38] Kieraś S., Nadolny K., Wójcik R. (2015), *Aktualny stan wiedzy i techniki w zakresie chłodzenia i smarowania strefy obróbki w procesach szlifowania*, „Mechanik”, R. 8-9, s. 204-211.
- [39] Sieniawski J., Nadolny K. (2016), *Experimental study on grinding wheel radial wear in surface grinding of steel CrV12 using a zonal centrifugal coolant provision system*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology”, R. 230(12), s. 1452-1461.
- [40] Sieniawski J., Nadolny K. (2016), *Experimental study into the grinding force in surface grinding of steel CrV12 utilizing a zonal centrifugal coolant provision system*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture”, R. 232(3), s. 394-403.
- [41] Klocke F., Barth S., Mattfeld P. (2016), *High Performance Grinding*, „Procedia CIRP”, R. 46, s. 266-271.
- [42] Jackson M.J., Davis C.J., Hitchiner M.P., Mills B. (2001), *High-speed grinding with CBN grinding wheels – applications and future technology*, „Journal of Materials Processing Technology”, R. 110(1), s. 78-88.
- [43] Kopac J., Krajnik P. (2004), *A Review of High-Speed Grinding and High-Performance Abrasive Tools*, „Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering”, R. 50(4), s. 206-218.
- [44] Sarikaya M., Gupta M.K., Tomaz I., Danish M., Mia M., Rubaiee S., Jamil M., Pimenov D.Y., Khanna N. (2021), *Cooling techniques to improve the machinability and sustainability of light-weight alloys: A state-of-the-art review*, „Journal of Manufacturing Processes”, R. 62, s. 179-201.
- [45] Astakhov V.P., Joks S. (red.) (2012), *Metalworking fluids (MWFs) for cutting and grinding*, Fundamentals and recent advances, Woodhead Publishing Limited, UK.
- [46] De Chiffre L. (1977), *Mechanics of metal cutting and cutting fluid action*, „International Journal of Machine Tool Design and Research”, R. 17(4), s. 225-234.
- [47] Kaneeda T. (2023), *The Lubricant Applying Effect: Review and considerations*, „Precision Engineering”, R. 79, s. 277-290.
- [48] Hernández P., Ares E., Martínez J., Nieto I. (2017), *Analysis of CO₂ dry ice projection on Al 7075, applied to drilling and milling operations*, „Procedia Manufacturing”, R. 13, s. 205-210.
- [49] TotalEnergies, *Wiedzieć więcej. Poradnik: ciecze do obróbki metali*, <https://totalenergies.pl/> [dostęp: 27.11.2024].
- [50] Szczotkarz N. (2023), *Analiza parametrów tworzenia medium czynnego w metodzie zminimalizowanego smarowania z nanocząstkami podczas obróbki stopu tytanu Ti6Al4V*, Rozprawa doktorska, Zielona Góra.
- [51] Bai P., Li S., Jia W., Ma L., Meng Y., Tian Y. (2020), *Environmental atmosphere effect on lubrication performance of gallium based liquid metal*, „Tribology International”, R. 141, 105904.

- [52] Yin W., Liu X., Zhang X., Gao X., Colvin V.L., Zhang Y., Yu W.W. (2020), *Synthesis of Tungsten Disulfide and Molybdenum Disulfide Quantum Dots and Their Applications*, „Chemistry of Materials”, R. 32(11), s. 4409-4424.
- [53] Meng F., Yang C., Han H. (2018), *Study on tribological performances of MoS₂ coating at high temperature*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology”, R. 232(8), s. 964-973.
- [54] Ilyuschenko A. Ph., Feldshtein E.E., Lisovskaya Y.O., Markova L.V., Andreyev M.A., Lewandowski A. (2015), *On the properties of PVD coating based on nanodiamond and molybdenum disulfide nanolayers and its efficiency when drilling of aluminum alloy*, „Surface and Coatings Technology”, R. 270, s. 190-196.
- [55] Nadolny K., Sienicki W., Wojtevicz M. (2015), *The effect upon the grinding wheel active surface condition when impregnating with non-metallic elements during internal cylindrical grinding of titanium*, „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, R. 15(1), s. 71-86.
- [56] Mrugalski R. (2023), *Wybrane zagadnienia procesu wiercenia otworów w stopie aluminium Al-Si10Mg(Cu) w warunkach zminimalizowanego smarowania z systemem dwukanałowym wiertel pęnowęglkowych*, Rozprawa doktorska, Zielona Góra.
- [57] Gupta M.K., Mia M., Singh G., Pimenov D.Y., Sarikaya M., Sharma V.S. (2019), *Hybrid cooling-lubrication strategies to improve surface topography and tool wear in sustainable turning of Al 7075-T6 alloy*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, R. 101, s. 55-69.
- [58] Kırmacı V. (2009), *Exergy analysis and performance of a counter flow Ranque – Hilsch vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air*, „International Journal of Refrigeration”, R. 32(7), s. 1626-1633.
- [59] Kalita P., Malshe A.P., Kumar S.A., Yoganath V.G., Gurumurthy T. (2012), *Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants*, „Journal of Manufacturing Processes”, R. 14(2), s. 160-166.
- [60] Morkavuk S., Köklü U., Bağcı M., Gemi L. (2018), *Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study*, „Composites Part B: Engineering”, R. 147, s. 1-11.
- [61] Bermingham M.J., Palanisamy S., Kent D., Dargusch M.S. (2012), *A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti-6Al-4V cutting*, „Journal of Manufacturing Processes”, R. 212(4), s. 752-765.
- [62] Byrne G., Ahearne E., Cotterell M., Mullany B., O'Donnell G.E., Sammler F. (2016), *High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing – A Roadmap*, „Procedia CIRP”, R. 46, s. 1-6.

PRZESTRZEŃ PRZYJAZNA PRZEDSIĘBIORCZOŚCI



CENTRUM PRZEDSIĘBIORCZOŚCI
I TRANSFERU TECHNOLOGII
UNIwersytetu Zielonogórskiego

Tworzymy przestrzeń dla innowacji i biznesu

www.cptt.uz.zgora.pl

Mazak

KOMPLEKSOWE ROZWIĄZANIA W ZAKRESIE SKRAWANIA I CIĘCIA BLACH

Przyszłość obróbki metalu zaczyna się tutaj. Mazak to połączenie innowacyjnej technologii, inteligentnej automatyzacji i precyzji, które zmieniają standardy produkcji. Dostarczamy nie tylko maszyny – zapewniamy pełne wsparcie w zakresie serwisu, szkoleń i integracji systemów, aby Twój zakład produkcyjny działał szybciej, wydajniej i bez kompromisów.

NOWA ERA CIĘCIA LASEROWEGO 2D



WYDAJNA OBRÓBKA 5-OSIOWA



MAKSYMALNA WYDAJNOŚĆ W OBRÓBCE 5-CIO OSIOWEJ



TOKARKA CNC Z AUTOMATYZACJĄ DLA PŁYNNEJ I WYDAJNEJ PRODUKCJI



WSZECHSTRONNA OBRÓBKA WIELOZADANIOWA



INNOWACJA,
PRECYZJA,
NIEZAWODNOŚĆ
POSTAW NA MAZAK!

ZESKANUJ
PO WIĘCEJ



VARIAxis i-300 AWC

KIEDY LICZY SIĘ CZAS I PRECYZJA

Mazak

POZNAJ VARIAXIS i-300 AWC – MASZYNE, KTÓRA PRZYSPIESZA OBRÓBKĘ SKOMPLIKOWANYCH CZĘŚCI DZIĘKI ZAAWANSOWANEJ TECHNOLOGII 5-OSIOWEJ I AUTOMATYCZNEMU ZMIENIACZOWI DETALI.

Wyposażona w innowacyjne oprogramowanie Smooth AWC oraz kompaktowy magazyn narzędzi, VARIAXIS i-300 AWC gwarantuje najwyższą precyzję i szybkość, umożliwiając efektywną produkcję nawet najbardziej wymagających elementów. Inwestuj w przyszłość z technologią, która przyspiesza każdy proces i podnosi jakość produkcji na nowy poziom.



Kluczowe funkcje VARIAXIS i-300 AWC:

- ▶ **5-OSIOWA OBRÓBKA W JEDNYM USTAWIENIU**
Złożone detale wytwarzane szybko i bez potrzeby przezbrajania.
- ▶ **AUTOMATYCZNY ZMIENIACZ DETALI (AWC)**
Nawet 32 palety – nieprzerwana produkcja bez nadzoru, także w trybie lights-out.
- ▶ **WYSOKOWYDAJNE WRZECIONO DO 30 000 OBR./MIN**
Gotowe na najtrudniejsze materiały i najkrótsze czasy cyklu.
- ▶ **MAZATROL SMOOTHX**
Intuicyjne sterowanie, które zwiększa tempo programowania i skraca czas wdrożenia.
- ▶ **KOMPAKTOWA KONSTRUKCJA**
Więcej mocy na mniejszej przestrzeni – idealna maszyna do nowoczesnych zakładów.

Yamazaki Mazak Central Europe Sp. z o.o. Oddział w Polsce

Centrum Technologiczne Katowice
ul. Trasa Renców 33,
40-878 Katowice, Poland

W: www.mazakeu.pl
E: kontakt@mazak.com.pl
M: +48 32 350 04 60

ZESKANUJ
PO WIĘCEJ





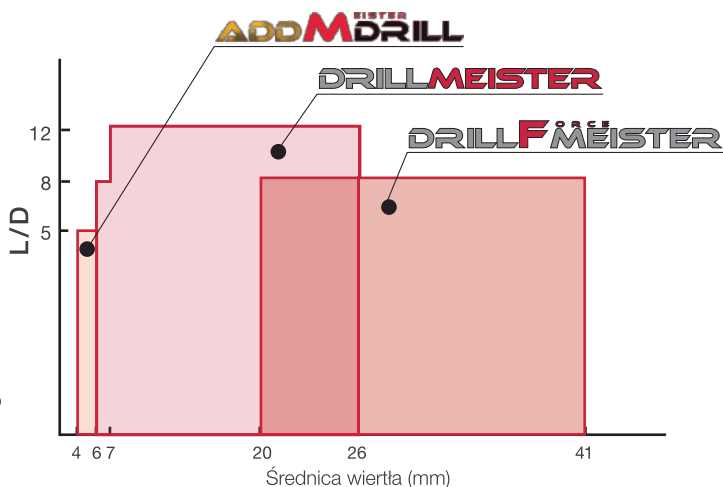
WYJĄTKOWA OFERTA WIERTEŁ Z WYMIENNYMI KOŃCÓWKAMI

Systemy wiertel z wymiennymi końcówkami zapewniają doskonałą wydajność wiercenia i długą żywotność.

Szybka wymiana końcówki wiertła skraca czas przestoju maszyny.

Koszty magazynowania i zarządzania narzędziami są znacznie zmniejszone, ponieważ nie ma potrzeby ponownego szlifowania wiertel.

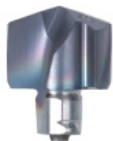
Korpusy wiertel w szerokiej gamie rozmiarów i rodzajów, umożliwiających użycie optymalnego narzędzia dla bezpiecznego i wydajnego wiercenia.



ADDMASTER DRILL

video

e-katalog



DMP

Średn. wiertła:
ø4 – ø5.9 mm

Końcówka wymienna ogólnego przeznaczenia.



DMC

Średn. wiertła:
ø4 – ø5.9 mm

Końcówka wymienna do wiercenia dokładnego z ostrzem samocentryującym.

video

e-katalog



DRILLMEISTER



DMP

Średn. wiertła:
ø6 – ø25.9 mm

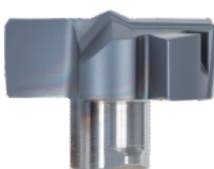
Końcówka wymienna ogólnego przeznaczenia.



DMC

Średn. wiertła:
ø6 – ø25.9 mm

Końcówka wymienna do wiercenia dokładnego z ostrzem samocentryującym i podwójną łysinką.



DMF

Średn. wiertła:
ø6 – ø25.9 mm

Końcówka wymienna z kątem wierzchołkowym 180° do pogłębiania i płaskiego dna.



DMH

Średn. wiertła:
ø6 – ø25.9 mm

Końcówka wymienna ogólnego przeznaczenia ze wzmocnionymi krawędziami skrawającymi.



DMN

Średn. wiertła:
ø6.8 – ø19.5 mm

Końcówka wymienna z ostrzymi krawędziami do obróbki materiałów nieżelaznych.

video

e-katalog



DRILLMASTER



SMC

Średn. wiertła:
ø26 – ø33 mm

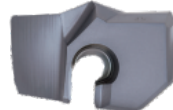
Końcówka wymienna do wiercenia dokładnego z ostrzem samocentryującym.



SMP

Średn. wiertła:
ø20 – ø41 mm

Końcówka wymienna ogólnego przeznaczenia.



SMF

Średn. wiertła:
ø20 – ø41 mm

Końcówka wymienna do wydajnego wiercenia otworów o płaskim dnie.

video

e-katalog



ANDRE ABRASIVE ARTICLES

Producent profesjonalnych narzędzi ściernych



ANDRE to polska firma rodzinna, specjalizująca się w projektowaniu, produkcji i dostarczaniu narzędzi ściernych ze spoiwem żywicznym i ceramicznym, przeznaczonych do obróbki zgrubnej i precyzyjnej różnorodnych materiałów. Jako lider w branży, firma jest silnie obecna zarówno na rynku krajowym, jak i międzynarodowym, współpracując z ponad 1000 stałych odbiorców w Polsce i za granicą. Oferta obejmuje uniwersalne narzędzia ściernie, a także rozwiązania dostosowane do indywidualnych potrzeb klienta. Narzędzia ANDRE znajdują zastosowanie w wielu sektorach, m.in. budownictwie kolejowym, przemyśle narzędziowym, motoryzacyjnym, łózkowym, hutnictwie, odlewnictwie, a także w branży spożywczej, medycznej i tytoniowej.

Zapraszamy do współpracy!

ANDRE ABRASIVE ARTICLES

Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Sp. k.
ul. Przemysłowa 10, 62-600 Koło

CENTRALA

tel.: +48 63 26 26 300

e-mail: aaa@andre.com.pl

BIURO OBSŁUGI KLIENTA

tel.: +48 63 26 26 312/317/345

e-mail: zamowienia@andre.com.pl

www.andre.com.pl

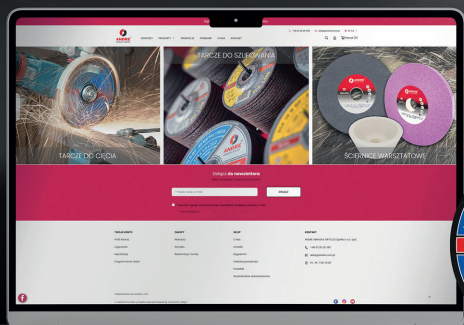


Odwiedź nasz sklep

INTERNETOWY

sklep.andre.com.pl

- **NOWOŚCI**
- **PROMOCJE**
- **PORADY**



Technologia Castrol XBB. Przecina każdy kompromis

Konwencjonalne płyny obróbkowe zawierają bor oraz czynniki uwalniające formaldehydy lub biocydy – są to dodatki wspomagające zachowanie tych produktów we właściwym stanie.

Zastosowanie tych środków chemicznych ograniczane jest na całym świecie przez coraz ostrzejsze regulacje prawne. Im większe restrykcje wobec ich użycia, tym trudniej zapewnić trwałość produktu. Teraz można zrezygnować z kompromisów dzięki technologii XBB.

Od niedawna kontrola czynnika pH stała się łatwiejsza.

Marki Castrol Alusol i Hysol XBB to oferta płynów obróbkowych o dużej trwałości, które gwarantują stabilność systemów bez obniżania produktywności. Wykorzystują unikatową technologię, opartą na formułach niezawierających boru ani biocydów.

Pełna produktywność na dłużej

- Stabilny płyn z technologią kontroli pH
- Czystość systemu i mniejsza emisja odpadów

Mniej interwencji serwisowych

- Rzadsze uzupełnianie dodatków
- Eliminacja lub redukcja użycia biocydów
- Redukcja zużycia zasobów

Precyzja i stabilność działania

- Właściwości smarne – dłuższa żywotność narzędzi, lepsze wykończenie powierzchni
- Mniej odpadów





Krok

w stronę produktywności bez kompromisów



Zdarza się, że w produkcji komponentów dla mechaniki precyzyjnej konieczne są kompromisy ze względu na rosnące założenia produkcyjne.

Castrol Alusol XBB umożliwia pełną precyzję obróbki aluminium bez strat w zakresie produktywności i bez kompromisów w obszarze bezpieczeństwa.



Produkcja komponentów ze stopów żelaza często wymusza kompromisy, by dotrzymać wyśrubowanych celów ilościowych. Nierzadko trzeba wybierać pomiędzy takimi aspektami, jak precyzja działania, warunki pracy systemu, stabilność pH, czystość maszyn i redukcja ryzyka korozji.

Castrol Hysol XBB pomaga w pokonywaniu tych wyzwań, oferując płyny obróbkowe o dużej trwałości, zapewniające stabilność systemu z minimum czynności konserwacyjnych i bez kompromisów w zakresie jakości produkcji.

Zeskanuj kod i dowiedz się więcej na temat produktów Castrol dla przemysłu.





Run MyVirtual Machine

Platforma dla **cyfrowych bliźniaków obrabiarek CNC**



Dowiedz się więcej na:
siemens.pl/filmyCNC

SIEMENS

SIEMENS



SINUMERIK ONE – natywnie cyfrowe **sterowanie CNC**



Dowiedz się więcej na:
[siemens.pl/filmyCNC](https://www.siemens.pl/filmyCNC)

Centrum Przedsiębiorczości i Transferu Technologii Uniwersytetu Zielonogórskiego

- ⇒ Otwieramy drzwi do rynków UE – doradztwo, które działa
- ⇒ Łączymy z partnerami, którzy przyspieszą Twój rozwój
- ⇒ Pomożemy zamienić innowacje na biznesowy sukces
- ⇒ Posiadamy bazę wynalazków – wybierz technologię dla swojego biznesu
- ⇒ Komerctalizujemy krok po kroku – od pomysłu do zysków

ŁĄCZYMY NAUKĘ Z BIZNESEM SKUTECZNIE



www.cptt.uz.zgora.pl





Eugene E. Feldshtein

Profesor dr hab. inż., profesor Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Zainteresowania naukowe: badania skrawalności współczesnych materiałów konstrukcyjnych, m.in. trudnoobrabialnych, spiekanych, kompozytowych; badania efektywności stosowania narzędzi powlekanych oraz powłok wieloskładnikowych na częściach maszyn; badania właściwości tribologicznych kompozytów metalowych oraz powłok wieloskładnikowych. Autor i współautor ponad 280 publikacji naukowych, w tym 23 monografii naukowych i podręczników, 17 rozdziałów w monografiach oraz blisko 200 artykułów w czasopiśmie naukowych, 38 w materiałach konferencyjnych (66 w czasopiśmie z listy JCR). Autor 5 patentów.



Kamil Leksycki

Doktor inż., adiunkt Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Zainteresowania naukowe: badania skrawalności materiałów trudnoobrabialnych, m.in. stali nierdzewnych, stopów tytanu i stopów niklowo-chromowych; badania stanu warstwy wierzchniej materiałów po obróbce; badania warunków chłodzenia i smarowania podczas obróbki; badania właściwości użytkowych materiałów. Autor i współautor ponad 50 publikacji naukowych, w tym 19 rozdziałów w monografiach, 32 artykułów w czasopiśmie naukowych i 10 w materiałach konferencyjnych (20 w czasopiśmie z listy JCR). Współautor 14 zgłoszeń patentowych i wzorów użytkowych krajowych i europejskich. Współautor podręcznika akademickiego.

.....

Książka składa się z trzech rozdziałów, w których opisano współczesne trendy rozwoju zautomatyzowanej obróbki mechanicznej. W rozdziale pierwszym przedstawiono zagadnienia intensyfikacji procesów obróbki skrawaniem, takie jak obróbka z dużymi prędkościami (HSC), obróbka z dużą wydajnością (HPC) oraz obróbka z dużymi posuwami (HFC). W rozdziale drugim rozpatrzono intensyfikację procesów obróbki szlifowaniem, mianowicie współczesne konstrukcje ściernic, szlifowanie z dużymi prędkościami (HSG), szlifowanie zgrubne oraz szlifowanie wysokowydajne (HPG). W rozdziale trzecim opisano rolę mediów technologicznych w procesach obróbki mechanicznej. Uwzględniono ich wpływ na przebieg procesów, rodzaje stosowanych mediów, urządzenia i metody doprowadzania ich do strefy obróbki, a także zależności między właściwościami mediów technologicznych a szczegółami procesu. Książka stanowi podręcznik przeznaczony dla studentów kierunku mechanika i budowa maszyn, może być również użyteczna dla studentów kierunku zarządzanie i inżynieria produkcji oraz uczestników szkół doktorskich w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

.....

The book consists of three chapters that present contemporary trends in the development of automated mechanical machining. The first chapter discusses the intensification of cutting processes, including high speed cutting (HSC), high performance cutting (HPC) and high feed cutting (HFC). The second chapter focuses on the intensification of grinding processes, such as modern designs of grinding wheels, high speed grinding (HSG), rough grinding and high performance grinding (HPG). The third chapter describes the role of technological media in machining processes. It considers their influence on process performance, types of media used, devices and methods for supplying media to the cutting zone, as well as the relationships between media properties and details of the machining process. This book is intended as a textbook for students of Mechanical Engineering and Machine Design. It may also be useful for students of Management and Production Engineering, as well as doctoral students in the discipline of Mechanical Engineering.

.....

ISBN 978-83-7842-586-1

