

2. Ogólna charakterystyka materiałów na narzędzia skrawające

L.A. Dobrzański, D. Pakuła, M. Staszuk, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz – Politechnika Śląska

2.1. Tendencje rozwoju obróbki skrawaniem

Inżynieria wytwarzania (zwana też inżynierią produkcji²⁾) jest dyscypliną inżynierską zajmującą się zasadami projektowania produktów i technologiami ich wytwarzania oraz podstawami sterowania, eksploatacji, organizacji i zarządzania procesami wytwarzania. Inżynieria wytwarzania stanowi zespół działań mających na celu efektywną realizację procesu wytwarzania od rozpoznania potrzeby do jej całkowitego zaspokojenia. Inżynieria wytwarzania stanowi połączenie technologii wytwarzania oraz nauki o zarządzaniu.

Technologiami wytwarzania są różne rodzaje obróbek stosowanych do kształtowania elementów maszyn, nadawania im wymaganych struktury i własności, łączenia ich, spajania i montażu, a także związanych z tym pomiarów i kontroli jakości produktów. Do najważniejszych z nich należą m.in. obróbka skrawaniem, obróbka erozyjna, oraz technologie procesów materiałowych, w tym odlewnictwo, obróbka plastyczna, obróbka cieplna, obróbka cieplno-plastyczna, obróbka powierzchni, spawanie, zgrzewanie, obróbka materiałów polimerowych.

Obróbka skrawaniem jest rodzajem obróbki ubytkowej polegającej na oddzielaniu warstwy materiału o wymaganej grubości zwanej naddatkiem od przedmiotu obrabianego, przez klinowe ostrze narzędzia, przesuwające się z założoną prędkością skrawania względem przedmiotu obrabianego, w celu nadania mu założonych cech geometrycznych (kształtu, wymiarów, chropowatości), a najczęściej także wymaganych własności warstwy powierzchniowej. W wyniku nacisku ostrza narzędzia następuje lokalne odkształcenie sprężyste i plastyczne materiału obrabianego i jego dekohezja w postaci wióra, głównie poprzez ścinanie.

Wióry powstające w zależności od własności materiału obrabianego i warunków skrawania sklasyfikowano w normie PN-ISO 3685. Wióry wstęgowe, oplatające się wokół narzędzi i elementów obrabiarki, grożą okaleczeniami operatorów i uszkodzeniem obrabiarek,

²⁾ W zależności od kraju – USA lub Japonia, stosowane są zamiennie obydwie określenia odpowiednio inżynieria wytwarzania lub inżynierią produkcji; w Polsce niekiedy próbuje się i to niesłusznie rozróżniać te pojęcia, pomimo że to są synonimy, preferując na ogół określenie inżynieria produkcji.

zwłaszcza podczas obróbki zautomatyzowanej. Właściwie dobierając warunki skrawania można uzyskać wióry odpryskowe powstające podczas obróbki materiałów kruchych, np. żeliwa lub segmentowe tworzące się w wyniku obróbki materiałów o średniej twardości ze średnimi prędkościami skrawania, które są łatwo usuwalne z przestrzeni skrawania i łatwe do składowania. W celu korygowania kształtu i podziału wiórów wstęgowych na krótkie odcinki stosowane są łamacze wiórów w postaci rowka wzdłuż krawędzi skrawającej, albo odpowiedniej nakładki zewnętrznej.

Wyróżnia się obróbkę skrawaniem: zgrubną, kształtującą, wykończającą i dokładnościową, w zależności od wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej i założonej chropowatości powierzchni. Przebieg skrawania zależy od warunków skrawania, związanych z obrabiarką, narzędziem, przedmiotem obrabianym i otoczeniem, a w szczególności od warunków geometrycznych, związanych z cechami geometrycznymi ostrza narzędzia i przekrojem warstwy skrawanej oraz od warunków technologicznych, w tym prędkości skrawania, prędkości posuwu oraz głębokości skrawania.

Udział kształtowania elementów maszyn metodami obróbki skrawaniem, m.in. przez toczenie, frezowanie, wiercenie, struganie, przeciąganie, sięga nawet 70% wśród technologii wytwarzania, a w przemyśle maszynowym wynosi ok. 50%. Udział ten zmniejsza się jednak systematycznie, w miarę wprowadzania technologii dokładnościowych (j. ang. *near net shape*), polegających na projektowaniu procesu technologicznego w ten sposób, aby kształt i wymiary półproduktu były bardzo zbliżone do ostatecznych, przez co zmniejszeniu ulega zakres obróbek wykończających i zredukowane są naddatki technologiczne, co wpływa na skrócenie czasów technologicznych i zmniejszenie ogólnych kosztów wytwarzania. Technologie obróbki skrawaniem rozwijają się, m.in. jako:

- obróbka skrawaniem z dużymi prędkościami (j. ang. *High Speed Cutting* – HSC), zapewniająca bardzo dużą wydajność ubytkową, wyższą jakość obrabianej powierzchni, mniejsze siły skrawania oraz poprawę stabilności obróbki,
- obróbka wysokowydajna (j. ang. *High Productive Cutting* – HPC), przy standardowej prędkości skrawania ze zwiększonym posuwem i z możliwością stosowania konwencjonalnych obrabiarek, lecz nie zapewniającej wysokiej gładkości powierzchni, co decyduje o jej ograniczonym zastosowaniu,
- obróbka na sucho, bez stosowania lub z ograniczonym zastosowaniem cieczy chłodząco-smarujących, intensywnie rozwijana ze względów ekonomicznych i ekologicznych,

- obróbka na twardo, polegająca na skrawaniu materiałów twardych z wyeliminowaniem szlifowania, a pomimo tego zapewniająca wysoką dokładność kształtu i wysoką gładkość powierzchni, rozwijana ze względów ekonomicznych i ekologicznych,
- hybrydowa obróbka ze wspomaganie dodatkową energią, np. ze wspomaganie przez nagrzewanie laserowe, stosowana w przypadku obróbki materiałów trudno obrabialnych (stopy tytanu lub niklu, ceramika specjalna),
- obróbka kompletna, polegająca na wykonywaniu operacji zapewniających zmianę kształtu, wymiarów i jakości powierzchni obrabianego przedmiotu na jednej obrabiarce i w jednym zamocowaniu, głównie w centrach obróbkowych sterowanych numerycznie (j. ang. *Computer Numerical Control* – CNC) z użyciem różnych, automatycznie wymienianych narzędzi, co eliminuje drogi transportowe i ogranicza czasy przygotowawczo-zakończeniowe, dzięki czemu zapewniana jest bardzo wysoka dokładność i jakość obrabianych przedmiotów.

2.2. Charakterystyka narzędzi skrawających i mechanizmów ich zużycia

Bardzo istotnym czynnikiem decydującym zarówno o wydajności technologicznej, jak i jakości powierzchni elementu wykonanego z wykorzystaniem obróbki skrawaniem, są cechy konstrukcyjne i materiał narzędzia skrawającego.

Cechy geometryczne ostrza narzędzi skrawających są określane przez wzajemne położenie powierzchni, krawędzi oraz kątów ostrza, w tym:

- powierzchni natarcia, po której spływa wiór,
- głównej powierzchni przyłożenia, stykającej się z materiałem obrabianym,
- głównej krawędzi skrawającej na przecięciu powierzchni natarcia i przyłożenia,
- kątów ostrza z kątem natarcia γ , od którego zależy sposób spływania wióra z ostrza skrawającego i kąt przyłożenia α , wpływający na zmniejszenie oporów tarcia pomiędzy narzędziem a materiałem obrabianym.

Zwiększenie kąta natarcia, wpływa na zmniejszenie energii odkształcenia wióra, jednak powoduje równoczesne zmniejszenie wytrzymałości ostrza. Zerowy kąt natarcia jest stosowany w narzędziach kształtowych, natomiast ujemny umożliwia bardzo duże prędkości skrawania, m.in. narzędziami z węglków spiekanych.

Narzędzie skrawające, by spełnić swoją rolę musi sprostać licznym wymaganiom, co determinuje kryteria jego doboru. Ogólnie można przyjąć, iż kryteriami tymi są [1, 15-17]:

- **wymagana trwałość ostrza;** przy ustalonych warunkach skrawania wybranego materiału zastosowanie narzędzia z materiału o większej odporności na zużycie przyczynia się do wzrostu wymaganej trwałości ostrza,
- **własności materiału obrabianego;** struktura i własności materiału skrawanego wpływają na intensywność zużycia ostrza, co jest związane z jego trwałością i wydajnością obróbki; materiały narzędziowe bardziej odporne na zużycie dobiera się do skrawania materiałów o większej twardości, wytrzymałości i odporności na ścieranie w celu zachowania nie zmniejszonej trwałości ostrza,
- **rodzaj obróbki;** z rodzajem obróbki jest związana zmiana warunków skrawania; z racji, że prędkość skrawania ma największy wpływ na temperaturę skrawania i trwałość ostrza, przy zmianie rodzaju obróbki od zgrubnej do dokładnościowej jest zalecane stosowanie innych materiałów narzędziowych, wykazujących większą odporność na zużycie w podwyższonej temperaturze,
- **względy techniczno-ekonomiczne;** koszt wykonania z danego materiału powinien być rozpatrywany na tle ogólnych kosztów jego wykonania i eksploatacji; koszt materiału narzędzia stanowi bowiem tylko niewielki udział w całkowitym koszcie jego wykonania.

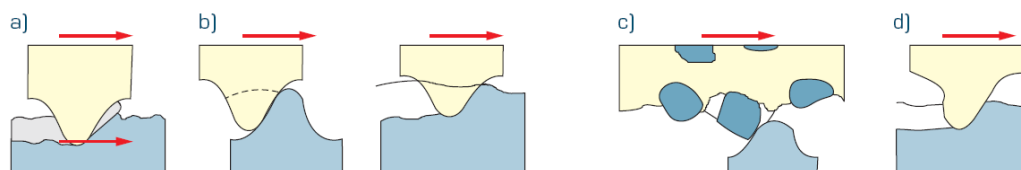
W skali światowej ok. 30-50% energii produkowanej corocznie pochłaniają opory tarcia. Wskutek zużycia corocznie eliminowane są setki tysięcy maszyn. Nauką o tarcu i procesach towarzyszących tarcu jest **trybologia**, której zakres nie ogranicza się tylko do procesów tarcia w maszynach, lecz dotyczy także wszystkich procesów tarcia w przyrodzie i technice. Ważnymi zjawiskami towarzyszącymi tarcu, o dużym znaczeniu technicznym, są procesy zużywania materiałów trących oraz smarowanie. **Zużycie trybologiczne** jest rodzajem zużycia spowodowanego procesami tarcia, w którym następuje zmiana masy oraz struktury i fizycznych własności warstw wierzchnich obszarów styków. Intensywność zużycia trybologicznego zależy od odporności obszarów tarcia warstw wierzchnich oraz od rodzaju oddziaływania. Procesy zużycia trybologicznego, mają m.in. istotne znaczenie w przypadku niszczenia i uszkodzenia narzędzi skrawających, chociaż ich znaczenie jest znacznie szersze, gdyż zwykle jest częstą, chociaż pośrednią przyczyną niesprawności i niezdatności w ogólności maszyn i urządzeń. Procesy zużycia trybologicznego można podzielić między innymi na:

- zużycie ściernie,
- zużycie adhezyjne,
- scuffing,
- zużycie z udziałem utleniania,
- zużycie zmęczeniowe.

Zużycie ściernie ma miejsce, gdy w obszarach tarcia współpracujących elementów występują utwardzone albo luźne cząstki ścierniwa, lub wystające nierówności twardego materiału. Zużycie ściernie może następować przez [1,4]:

- ziarna umocowane we współpracujących powierzchniach,
- luźne pojedyncze ziarna ściernie, w tym także powstające w obszarze tarcia w wyniku utleniania produktów zużycia,
- warstwę ścierną występującą między współpracującymi powierzchniami,
- strumień ścierny, tj. strumień płynu, w którym są zawieszone cząstki ścierniwa,
- ścieranie w środowisku ściernym, gdy styk ziarna ze ścieraną powierzchnią następuje pod działaniem sił wykonujących pracę ścierania i zgniatania materiału ścierniwa.

Elementarne procesy zużywania ściernego przedstawiono na rysunku 2.1.



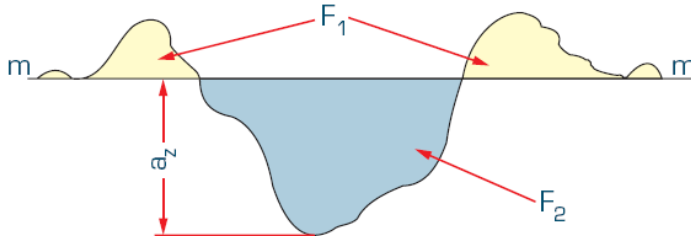
Rysunek 2.1. Model dynamiczny elementarnych procesów zużywania a) brzdowanie, b) ścinanie nierówności, c) ścinanie nierówności ścierniwem przez występ nierówności, d) odkształcanie plastyczne materiału [1, 4]

Podziału zużycia ściernego dokonuje się ze względu na kryterium, którym jest iloraz powierzchni przekrojów poprzecznych sumy obustronnych spęczeń materiału obok rysy F_1 i zagłębienia rysy F_2 (rys. 2.2).

Ubytek materiału w warstwie wierzchniej podczas zużycia ściernego związany jest z:

- **brzdowaniem**, czyli odkształceniem plastycznym obszarów styku i spęczenia materiału z obu stron brzdę, gdy stosunek $F_1/F_2 = 1$,
- **mikroskrawaniem**, gdy stosunek $F_1/F_2 = 0$,

- **rysowaniem**, gdy materiał jest częściowo odkształcany plastycznie oraz częściowo skrawany w postaci wiórów jako produktów zużywania, gdy stosunek $0 \leq F_1/F_2 \leq 1$.



Rysunek 2.2. Kryterium wyróżniające rodzaje zużywania; a_z – głębokość bruzdy, $m-m$ – poziom odniesienia [1, 4]

Zużycie adhezyjne polega na lokalnym **szepianiu metalicznym** (adhezji) powierzchni trących w mikroobszarach odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej, a zwłaszcza najwyższych wierzchołków chropowatości zbliżonych na odległość działania sił molekularnych i następnym ich rozrywaniu związanym z odrywaniem cząstek metalu lub jego rozmazywaniem na powierzchniach tarcia. Zużycie adhezyjne występuje przy styku dwóch powierzchni metali, charakteryzujących się dużym powinowactwem chemicznym.

O skłonności do szepiania się metali decydują siły elektrodynamiczne wywołane drganiami atomów powierzchniowych. Zdolność metali do połączeń adhezyjnych zależy przede wszystkim od struktury elektronowej ich atomów, rodzaju sieci krystalicznej i plastyczności. Metale wzajemnie nierozpuszczalne w stanie stałym lub tworzące fazy międzymetaliczne cechują się najmniejszą intensywnością szepiania się. Atomy obce w sieci, dodatki stopowe i domieszki zwykle utrudniają szepianie się.

Szepianiu się sprzyja podobieństwo struktury krystalicznej oraz zbliżone wartości parametru sieci. W podwyższonej temperaturze zwiększa się skłonność do szepiania się elementów z tego samego metalu lub metali o zbliżonej strukturze krystalicznej. Sprzyjają temu także zgmiot oraz sprężyste odkształcenie sieci.

W wysokiej temperaturze oraz przy dużych odkształceniach plastycznych mikroobszarów tarcia następuje, jako odmiana szepiania adhezyjnego, **zrastanie tarciove**, które polega na trwałym łączeniu się stykających się obszarów trących powierzchni metalowych w wyniku dyfuzji poprzez granicę styku.

Proces ten zależy od wzajemnej rozpuszczalności w stanie stałym materiałów pary trącej, współczynników dyfuzji lub samodyfuzji, temperatury mikroobszarów tarcia, czasu styku i wartości odkształcenia plastycznego.

Oprócz skłonności metali do szepiania i zrastania drugim czynnikiem decydującym o podatności na zużycie adhezyjne jest skłonność metalu do tworzenia na powierzchni **warstw tlenkowych**. Tlenki metali o wiązaniach atomowych tworzą potencjał sił elektrostatycznych powierzchni, których zasięg jest mniejszy od sił charakterystycznych dla metali. Warstwy tlenkowe praktycznie nie wykazują skłonności do szepiania. Warstwa tlenków na powierzchni metalu zmniejsza oddziaływanie adhezyjne obszarów styku metali.

Całkowita siła przyciągania adhezyjnego zależy od wartości sił międzycząsteczkowych i rzeczywistej powierzchni styku. Przyciąganie adhezyjne bez trwałych wiązań międzypowierzchniowych nie powoduje zużycia.

Rozrywanie szepień powoduje często na granicy umocnionego materiału ubytki na powierzchni i tworzenie na drugiej powierzchni narostów o twardości większej od rdzenia. Narosty działają jak mikroostrza umocowane w jednej z powierzchni.

Gwałtowne zużycie spowodowane zachwianiem równowagi termicznej i mechanicznej w wyniku przzerwania warstwy olejowej, polegające na zaczepianiu nierówności powierzchni i podwyższeniu temperatury w warunkach, gdy warstwa olejowa istnieje, lecz jest zbyt cienka w stosunku do wysokości nierówności, nazywane jest **scuffingiem**. Ten rodzaj zużycia łączy w sobie elementy zużycia ściernego i adhezyjnego i polega na szepianiu się i następnym rozrywaniu połączeń wierzchołków nierówności w mikroobszarach styku.

W przypadku gdy intensywność niszczenia powierzchni przez ścieranie jest mniejsza od intensywności tworzenia warstw tlenków, występuje **zużycie z udziałem utleniania**. Zużycie to polega na niszczeniu warstwy wierzchniej metali i stopów w warunkach tarcia w wyniku oddzielania warstw tlenków utworzonych w strefie tarcia wskutek adsorpcji tlenu oraz warstw roztworów stałych powstałych następnie w wyniku dyfuzji tlenu w odkształcone plastycznie lub sprężyste obszary metalu. Zużycie z udziałem utleniania występuje przy tarcu:

- ślizgowym,
- tocznym.

Przy tarcu tocznym, zużyciu z udziałem utleniania zawsze towarzyszy zużycie zmęczeniowe.

Cykliczne oddziaływanie naprężeń kontaktowych w warstwach wierzchnich współpracujących elementów tarciovych wywołuje zmęczenie materiału i w wyniku tego miejscową utratę spójności i związane z tym ubytki materiału, co stanowi istotę **zużycia zmęczeniowego**. Ubytek masy następuje dopiero po przekroczeniu przez poszczególne mikroobszary materiału granicznej liczby cykli obciążenia i granicy zmęczenia. W zależności od parametrów i rodzaju procesu tarcia oraz od wielkości obciążenia ubytek masy poprzedzony jest powstawaniem mikropęknięć, a następnie makropęknięć materiału.

Zużycie zmęczeniowe może być:

- **powierzchniowe**, charakteryzujące się miejscowymi ubytkami warstwy wierzchniej materiału spowodowanymi obciążeniami kontaktowymi,
- **objętościowe**, związane z tworzeniem się pęknięć zmęczeniowych w wyniku wielokrotnych makroskopowych odkształceń sprężystych oraz wielokrotnych odkształceń sprężysto-plastycznych lub plastycznych spowodowanych przez tarcie i wywołujących powierzchniowe pęknięcia zmęczeniowe.

Do rodzajów zużycia zmęczeniowego należą:

- **zużycie przez łuszczenie** (spalling),
- **zużycie gruzelkowe** (pitting).

Zużycie przez łuszczenie (spalling) polega na odpadaniu od podłoża cząstek materiału, utworzonych w wyniku rozprzestrzeniania się mikropęknięć zainicjowanych wewnątrz warstwy wierzchniej skojarzonych elementów tarciovych, wskutek cyklicznego oddziaływania naprężeń kontaktowych i dochodzenia tych mikropęknięć do powierzchni przez narastanie naprężeń.

Na zużycie przez łuszczenie wpływają następujące czynniki:

- głębokość warstwy wierzchniej odkształconej plastycznie,
- wartość odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej.

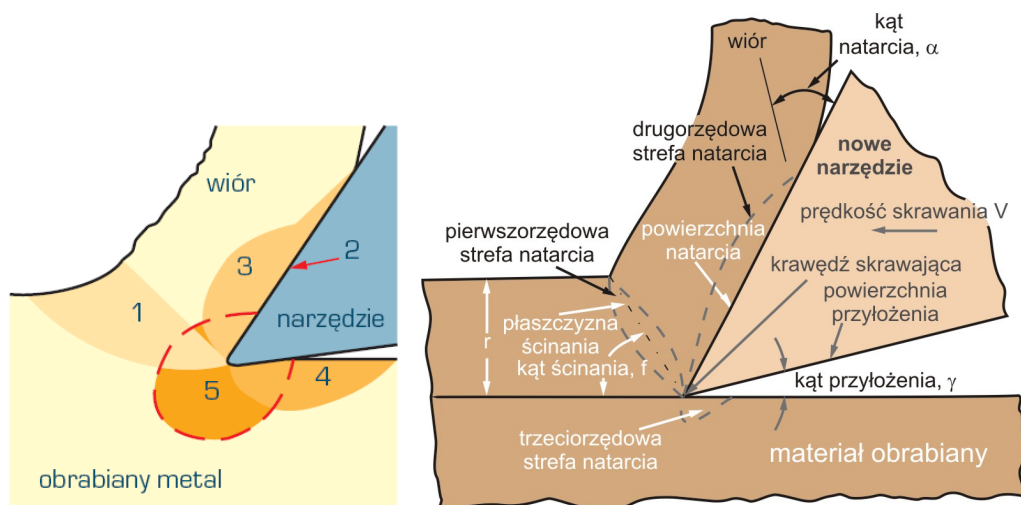
Zużycie przez łuszczenie występuje przy tarcia tocznym metali twardych o wysokiej granicy plastyczności. Procesom zużycia zmęczeniowego przez łuszczenie towarzyszą zwykle procesy utleniania materiału warstwy wierzchniej.

Zużycie gruzelkowe (pitting) występuje w obecności oleju i w warstwach wierzchnich skojarzonych elementów tarciovych wskutek cyklicznego oddziaływania naprężeń kontaktowych. Można wyróżnić następujące etapy zużycia gruzelkowego przez pitting:

- zmęczenie materiału i inicjacja pęknięć, w obecności oleju opóźnione w porównaniu ze zużyciem niesmarowanych skojarzonych elementów tarcowych,
- rozwój i rozprzestrzenianie się pęknięć w wyniku właczania oleju pod znacznym ciśnieniem w szczeliny istniejące na powierzchni i ich rozklinowywania pod działaniem dużych nacisków,
- wrywanie przez olej cząstek, które utraciły lub zmniejszyły spójność z rodzimym materiałem.

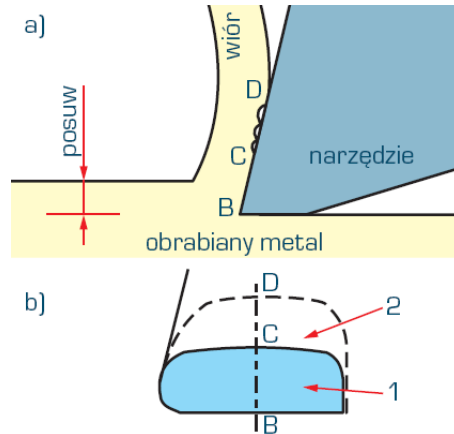
Frettingiem jest zużycie związane ze zjawiskami mechanicznymi, cieplnymi, chemicznymi i elektrycznymi zachodzącymi w obszarze kontaktu skojarzonych elementów tarcowych, przemieszczających się w wyniku drgań lub pulsacji obciążeń wzajemnie względem siebie o kilkadziesiąt do kilkuset μm , przy ruchu postępowo- lub obrotowo-zwrotnym.

Wymienione, ogólne mechanizmy zużycia elementów wytwarzanych z materiałów inżynierskich występują oczywiście w różnym stopniu i w różnym nasileniu podczas eksploatacji narzędzi skrawających. **Proces skrawania** metali oraz podstawowe strefy, w których następuje zużytkowanie energii dostarczonej do procesu, przedstawiono schematycznie na rysunku 2.3.



Rysunek 2.3. Schemat procesu skrawania; 1 – strefa ścinania, 2 – powierzchnia przylegania narzędzia i wióra, 3 – strefa wtórnego odkształcenia plastycznego wióra, 4 – strefa oddziaływania powierzchni przyłożenia narzędzia w obrabianym materiale, 5 – strefa oddziaływania ostrza narzędzia [1, 4, 18]

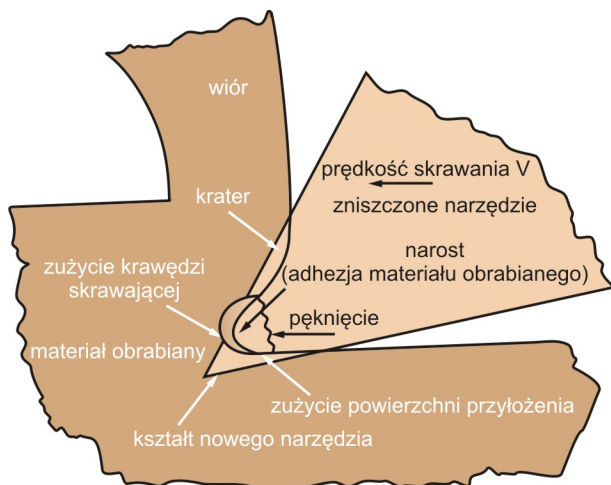
Podczas procesu skrawania następuje lokalne szepianie narzędzia z obrabianym metalem na powierzchni przyłożenia oraz na powierzchni natarcia, na której wiór przylega do narzędzia, co schematycznie przedstawiono na przykładzie noża tokarskiego na rysunku 2.4 [1,4]



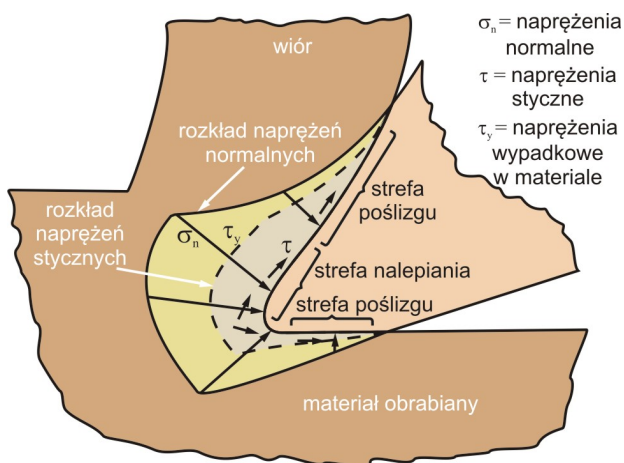
Rysunek 2.4. Schemat lokalnego spajania się narzędzia z obrabianym materiałem i wiórem
 a) przekrój w płaszczyźnie prostopadłej do krawędzi skrawającej, b) widok powierzchni natarcia narzędzia w pobliżu ostrza; 1 – strefa lokalnego spajania się, 2 – strefa kontaktu przerywanego [1, 4]

Zużycie ostrego narzędzia może następować na skutek oddziaływania prędkości skrawania oraz sił przyłożonych do niego w czasie procesu skrawania. Wzdłuż powierzchni natarcia ruch wióra i duże naprężenia normalne tworzą trwałe uszkodzenie nazywane zużyciem kraterowym (kraterem). Może to wpływać na słabe wykończenie powierzchni obrabianej. Kiedy wzdłuż powierzchni przyłożenia posuw narzędzia i duży nacisk normalny wzrastają zwiększa się obszar styku między narzędziem a przedmiotem, powodując zużycie na powierzchni przyłożenia, które jest jednak łatwiejsze do zmierzenia, wobec czego przyjmuje się je jako wskaźnik określający trwałość ostrza. Położenie oraz rozmiar tego zużycia powierzchniowego odgrywają istotną rolę w określeniu okresu pracy narzędzia skrawającego [18-24].

Połączenie zużycia powierzchni przyłożenia oraz krateru prowadzi do pogorszenia powierzchni obrabianej i może spowodować przekroczenie tolerancji obrabianej części. Powoduje to zmniejszenie kąta między powierzchnią natarcia a powierzchnią przyłożenia. Te zmiany geometryczne prowadzą do osłabienia krawędzi skrawającej i mogą prowadzić do złamania ostrza. Rysunek 2.5 przedstawia jak proces zużycia zmienia geometrię narzędzia skrawającego [15, 25-28].



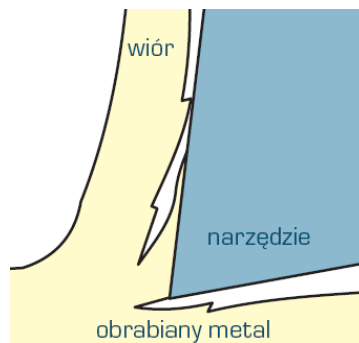
Rysunek 2.5. Zużycie powierzchni bocznej i krater na narzędziu skrawającym [18]



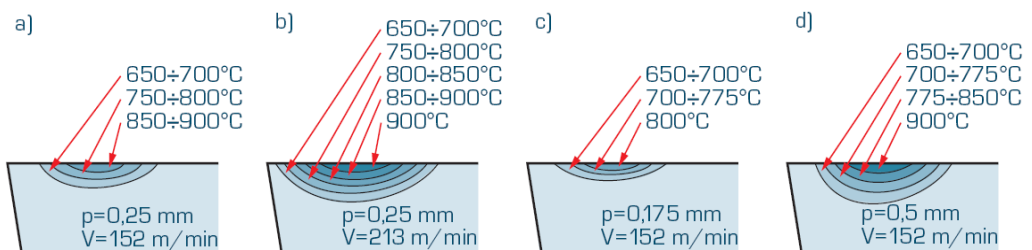
Rysunek 2.6. Rozkład naprężeń powstały podczas toczenia [18]

Z kolei na rysunku 2.6 przedstawiono przybliżony rozkład naprężeń na powierzchni obrabianej. Naprężenia normalne, σ_n , powodowane są siłami normalnymi działającymi wzdłuż powierzchni natarcia, krawędzi skrawającej oraz powierzchni przyłożenia. Dodatkowo na narzędzie działają również naprężenia styczne. Naprężenia styczne, τ , występują wzdłuż powierzchni narzędzia i są związane z przywieraniem i poślizgowym procesem ścinania. W strefie przywierania wiór ma skłonność do adhezji z przedmiotem obrabianym i okresowego

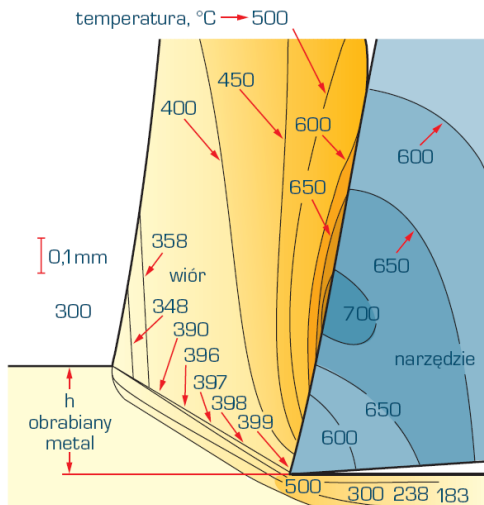
oddzielania się wzdłuż stycznej do płaszczyzny pęknięcia wewnątrz metalu, opuszczając przylegający materiał po narzędziu lub w obrębie narzędzia, co staje się następnie przyczyną zużycia narzędzia. Obecność i rozmiar strefy przywierania zależy od wielkości sił normalnych i warunków tarcia wzdłuż tej powierzchni. Większość materiału obrabianego może narastać przez jakiś okres czasu. Materiał ten nazywany narostem znacząco zmienia geometrię ostrza narzędzia, co schematycznie przedstawiono na rysunku 2.7. Przerwanie lokalnych spoin utworzonych w procesie skrawania wpływa na krótkotrwałe podwyższenie temperatury na powierzchni przyłożenia narzędzia i obrabianego metalu oraz na powierzchni przylegania narzędzia i wióra. Powoduje to tworzenie się pól temperaturowych na powierzchniach narzędzia, przedstawionych na rysunku 2.8, o wartościach zależnych od prędkości skrawania i posuwu. W przypadku gdy podczas skrawania na powierzchni narzędzia tworzy się narost, rozkład temperatury w narzędziu jest nieco inny, a temperatura jest niższa. Rozkład temperatury w skrawanym materiale i narzędziu skrawającym na podstawie obliczeń teoretycznych przedstawiono przykładowo na rysunku 2.9.



Rysunek 2.7. Schemat tworzenia się narostu na powierzchni natarcia narzędzia [1, 4]



Rysunek 2.8. Pole temperaturowe w nożach tokarskich podczas obróbki stali niskowęglowej z posuwem 0,25 mm w czasie 20 s [1, 4]



Rysunek 2.9. Rozkład temperatury w narzędziu skrawającym i w obrabianym metalu; kąt natarcia 10° , kąt ścinania 30° , głębokość skrawania $h = 0,32$ mm [1, 4]

Temperaturę na powierzchni styku narzędzie/wiór nazywa się temperaturą skrawania. Temperatura powstała podczas skrawania zależy od prędkości skrawania (względna prędkość między powierzchnią boczną a przedmiotem), prędkości wióra (względna prędkość między wiórem a powierzchnią natarcia narzędzia) i naprężeń stycznych na powierzchni obrabianej. Wielkość tych prędkości oraz naprężeń stycznych na powierzchni styku określa wartość uwolnionej energii cieplnej. Różnica między wartością energii cieplnej uwolnionej a energią cieplną strat określa temperaturę materiału i narzędzia w strefie zużycia. Energia cieplna strat jest funkcją przewodności termicznej narzędzia i materiału obrabianego. Dodatkowo, wielkość przedmiotu obrabianego oraz ciepło właściwe określają pojemność cieplną przedmiotu obrabianego, żeby zmniejszyć obszar, powierzchnia wymienia ciepło w sposób konwekcyjny i przez promieniowanie do otaczającego powietrza. Większość energii rozprzestrzeniającej się w czasie skrawania zamieniana jest na energię cieplną. Około 75% ciepła absorbuje z powierzchni styku narzędzie/wiór sam wiór, reszta jest dzielona między narzędzie i przedmiot obrabiany [1, 15, 25, 18, 54].

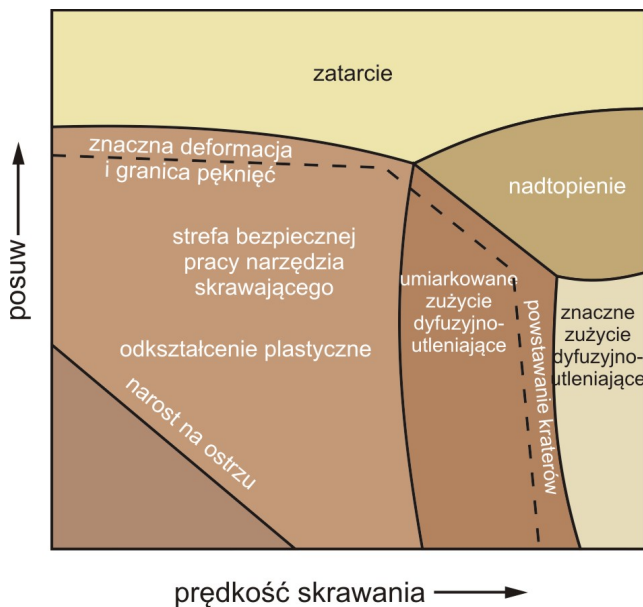
Strefy poślizgu posiadają siły tarcia i towarzyszące naprężenia styczne powierzchniowe, które ulegają zmianom zgodnie z siłą normalną i współczynnikiem tarcia. Na wielkość tych naprężeń mają wpływ zarówno chropowatość powierzchni jak i występowanie smarowania. Naprężenia normalne mogą stać się bardzo duże i przekroczyć wytrzymałość narzędzia

powodując wykruszenie krawędzi skrawającej. Wielkość naprężeń w obszarze skrawania jest zmienna w czasie i w połączeniu ze zmianami obciążenia może tworzyć środowisko dla uszkodzeń zmęczeniowych [18, 33].

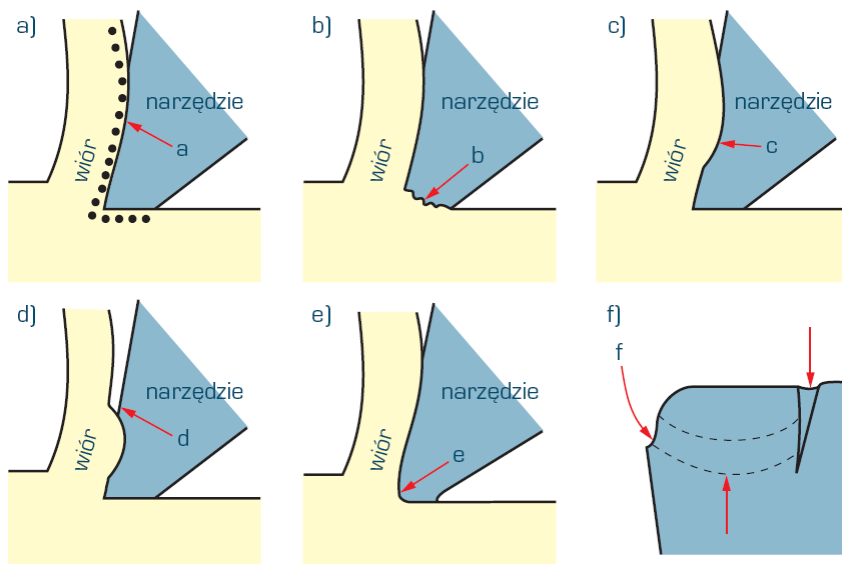
Ścieranie twardymi cząstkami występującymi w obrabianym materiale powoduje pojawienie się **rowków** lub **wyzłobień** na powierzchniach natarcia lub przyłożenia narzędzia.

Zużycie narzędzi jest zależne od naprężenia stycznego, temperatury, fizycznych i chemicznych właściwości stykających się materiałów i względnych prędkości na powierzchni styku zużywających się powierzchni [15]. W celu właściwego doboru stykających się materiałów używa się map mechanizmów zużycia, określających zakres nacisków oraz prędkości skrawania będących rezultatem specyficznych mechanizmów zużycia [31]. Na rysunku **2.10** przedstawiono 4 główne klasy mechanizmów: zatarcie, nadtopienie, zużycie z przewagą utleniania/dyfuzji i zużycie w przeważającej części plastyczne. Nacisk (naprężenia normalne), prędkość skrawania i zużycie powierzchni mają wpływ na temperaturę. Linie przerywane na rysunku oznaczają największe dopuszczalne warunki pracy [18].

Różne prędkości skrawania, wielkości posuwu i grubości warstwy skrawanej decydują o zróżnicowanym **zużyciu narzędzi** (rys. **2.11**). Zależnie od materiału obrabianego, operacji,



Rysunek 2.10. Mapa mechanizmów zużycia materiałów narzędziowych [18]



Rysunek 2.11. Schemat podstawowych mechanizmów zużycia narzędzi skrawających
a) zużycie ściernie, b) zużycie adhezyjne, c) zużycie dyfuzyjne, d) zużycie w wyniku powierzchniowego odkształcenia plastycznego, e) zużycie w wyniku odkształcenia plastycznego krawędzi skrawającej pod działaniem naprężeń normalnych, f) zużycie przez wykruszanie w wyniku poślizgu [1, 4]

materiału narzędzia i warunków skrawania całkowite zużycie narzędzia może obejmować zarówno jeden typ zużycia jak i kombinację kilku różnych typów. W procesie frezowania wykończającego dominują zużycie ściernie i dyfuzyjne, mniej istotne są natomiast zużycie adhezyjne lub korozyjne. Przy małej prędkości skrawania mechanizmami zużycia narzędzi skrawających są głównie zużycie ściernie i zużycie adhezyjne. Generalnie o zużyciu występującym na narzędziach skrawających w sposób dominujący decydują cztery główne typy, takie jak [18, 25-34, 55, 56]:

- zużycie adhezyjne,
- zużycie ściernie,
- zużycie dyfuzyjne,
- zużycie korozyjne.

Zużycie adhezyjne występuje, gdy bezpośredni kontakt następuje między przedmiotem obrabianym a płaszczyznami narzędzia skrawającego. W przylegających do siebie obszarach powierzchni tworzą się wtedy silne wiązania. Jeżeli są one silniejsze niż miejscowa

wytrzymałość, wtedy cząstka materiału może przejść z jednej powierzchni na drugą. Jeśli zdarzy się to kilka razy wówczas może się ukształtować luźny fragment, który może opuścić system jako cząstka zużyta. Z kolei gdy te usuwane cząstki są bardzo małe (submikroskopowe) wtedy proces jest nazywany zużyciem ściernym. Zużycie adhezyjne wpływa na otoczenie w obrębie strefy skrawania, gdyż wraz z tym zużyciem znacznie spada w niej stężenie tlenu, gdyż nie może uformować się ochronna warstewka tlenków. Zanieczyszczenia metalurgiczne obniżają zużycie adhezyjne narzędzi pod wpływem temperatury. W skrajnym przypadku zużycie adhezyjne, czasami nazywane zużyciem ciągłym, występuje na narzędziach ze stali szybko tnącej używanej przy wymagającej obróbce skrawaniem. Wówczas temperatura w kraterze może osiągnąć 700°C i bezpośredni kontakt z wiórem powoduje, że atomy z materiału narzędzia dyfundują z narzędzia do wióra. Ten rodzaj zużycia adhezyjnego nazywany jest zatarciem. Rozwiązaniem tego problemu jest zmniejszenie prędkości skrawania, pokrywanie narzędzia twardą powłoką ceramiczną oraz poprawa smarowania oraz chłodzenia [15, 18, 35, 54].

Zużycie ścierne występuje gdy twarda faza z materiału obrabianego oddziałuje na narzędzie skrawające. Faza twarda może być wtrąceniem lub zanieczyszczeniem osadzonym w miękkiej osnowie, tak jak wtrącenia tlenkowe znajdują się w stalach lub aluminium, bądź też może być transportowana przez ciecz, w postaci zanieczyszczenia w chłodziwie lub smarach. Znaczenie występującego ścierania zależy od twardości materiału narzędzia. Ścieranie się materiału narzędzia skrawającego powoduje dodanie twardych cząstek do odpadów, co sprzyja większemu ścieraniu. W każdym przypadku następuje częściowe usunięcie metalu, częściowo wpływając na wycieranie oraz wywoływane przez tarcie dalsze ścieranie [18, 23, 34, 36].

Zużycie dyfuzyjne spowodowane jest wzajemnym przenikaniem atomów z materiału obrabianego do narzędzia i odwrotnie w wyniku ich ruchów cieplnych. Proces ten jest zależny od temperatury w miejscu styku narzędzia i wióra oraz narzędzia i przedmiotu obrabianego i zależy od podobieństwa wiązań atomowych narzędzia oraz materiału obrabianego. Zużyciu dyfuzyjnemu często towarzyszy dekompozycja składników jednej z przesuwających się powierzchni. Na przykład, w czasie skrawania stopów żelaza narzędziem z węgliku wolframu przy dużej prędkości skrawania (wysoka temperatura) następuje przemiana żelaza α w żelazo γ na powierzchni wióra. Żelazo γ ma silne powinowactwo do węgla, węgiel wolframu na powierzchni narzędzia rozkłada się, a węgiel, który został uwolniony dyfunduje do materiału wióra. Wzrost stężenia węgla umacnia wiór, który z kolei zwiększa szybkość zużycia [1, 15, 34-36].

Badania nad tym typem zużycia narzędzi są bardzo trudne do przeprowadzenia, ponieważ nie można odtwarzać idealnie wszystkich warunków. Wyjątek stanowią próby skrawania, które pociągają za sobą występowanie innych rodzajów zużycia. Testy nieobejmujące skrawania, które polegają na umieszczeniu różnych materiałów obrabianych w kontakcie z materiałem narzędzia w stałej temperaturze przez pewien czas, są niewymierne i mało użyteczne, ponieważ warunki takie bardzo znacznie różnią się od rzeczywistych warunków występujących podczas skrawania.

Zużycie korozyjne nie jest zazwyczaj główną przyczyną nadmiernego zużycia narzędzi, ale może stać się najistotniejszym mechanizmem zużycia stali w wysokiej temperaturze lub podczas obróbki plastycznej. Zużycie to związane jest z pękaniem warstwy skorodowanej na powierzchni narzędzia w wyniku naprężeń występujących w trakcie skrawania i następną korozję nowo odsłoniętej powierzchni. Ta forma zużycia może być ograniczona przez właściwe smarowanie, wyższe stężenie chromu w narzędziach lub przez nanoszenie powłok [1, 22].

W procesie zużycia można wyróżnić trzy główne etapy charakteryzujące się zróżnicowaną szybkością zużycia [17, 18, 37-40]:

- pierwszy krótkotrwały okres charakteryzujący się dużą szybkością zużycia wynikającą z docierania się pary trącej (narzędzie-przedmiot obrabiany),
- etap umiarkowanego zużycia uwarunkowany tymczasowym ustabilizowaniem się warunków kontaktu trących powierzchni,
- gwałtowne przyspieszenie zużycia w efekcie długotrwałej pracy, prowadzące do uszkodzenia narzędzia.

I – krótkotrwały etap zużycia narzędzia

W tym okresie szybkość zużycia zmniejsza się w czasie. Każdy ze stykających się materiałów wykazuje chropowatość powierzchni w postaci występowania nierówności. Na powierzchni styku nierówności te dotykając się tworzą niewielkie obszary styku. Całkowity obszar tych stykających się punktów jest częścią przewidywanego obszaru stykających się powierzchni. W tych obszarach naprężenia i ciepło wzmagają się, co jest wynikiem częściowego usunięcia nierówności spowodowanego ścieraniem, któremu towarzyszy ścinanie nierówności lub nadtopienie. Kiedy te nierówności zostaną usunięte chropowatość powierzchni ulega zmianie a obszar styku powiększa się. Jeżeli siły pozostają niezmiennione, nacisk maleje

i efektywne mechanizmy zużycia zmieniają się w odkształcenie plastyczne i/lub umiarkowane zużycie dyfuzyjne. W tym wstępnym okresie na powierzchni uwidacznia się niewielkie zużycie [1, 15, 34-36].

II – umiarkowany etap zużycia narzędzia

W tym okresie szybkość zużycia jest stała w czasie obróbki skrawaniem. Obciążenia normalne, które bezpośrednio decydują o ścieraniu oraz nadtopieniu, stanowią przyczynę zupełnego uszkodzenia narzędzia i należy ich unikać. W razie braku nie występowania takich warunków zużycie powierzchni stale wzrasta. Jeżeli natomiast dominuje odkształcenie plastyczne, małe cząstki materiału zdeformowane mechanicznie i pęknięte są usuwane z powierzchni obrabianej. Wiąże się z zużyciem ściernym i może występować na każdej zużywającej się powierzchni. Jest to najbardziej powszechny proces zużycia na powierzchni przyłożenia lub bocznej większości narzędzi skrawających. Ze względu na nierównomierność obciążeń normalnych i temperatury w różnych miejscach styku narzędzia i przedmiotu obrabianego, mechanizm zużycia dominujący w jednym miejscu narzędzia w innym miejscu nie musi występować. Maksymalna temperatura powierzchni narzędzia występuje w niewielkiej odległości od krawędzi skrawającej na powierzchni natarcia narzędzia. Ze względu na wysoką temperaturę występującą w tym obszarze dominującym jest zużycie dyfuzyjne, nazywane kraterowym. Wysoka temperatura oraz miejscowy nacisk powodują przenikanie atomów z narzędzia do materiału obrabianego lub wióra, a zużycie przyjmuje postać krateru. W twardych materiałach skrawających takich jak ceramika czy węgliki spiekane, które są zwykle stosowane przy dużych prędkościach skrawania, proces zużycia dyfuzyjnego może być odpowiedzialny za większość zużycia [17, 24, 40, 48, 54].

Warunki narostu na ostrzu (j. ang. *built-up edge* – BUE) przedstawione na rysunku 2.10 wpływają na proces zużycia dwojako [18]. Przy krawędzi skrawającej większy nacisk mogą powodować cząstki materiału przylegającego do narzędzia skrawającego w strefie nalepiania (rys. 2.6). Jeżeli siła styczna spowodowana ruchem wióra jest wystarczająco duża więź będzie tymczasowa i przylegający materiał odpadnie od powierzchni narzędzia. Kiedy narost odłamie się małe cząstki materiału narzędzia mogą odpaść wraz z nim. Staje się tak, gdy procesowi towarzyszą warunki zza linii BUE. Drugi efekt występuje, kiedy narost nie odpadnie wraz z wiórem, lecz zamiast tego pozostaje zmieniając geometrię ostrza narzędzia. Obecność narostu zmienia kąt ścinania powodując niestałość w procesie formowania wióra w równym

stopniu jak uszkodzenia powierzchni obrabianej. Uszkodzenie powierzchni obrabianej powoduje stopień ostrza, co wpływa z kolei na niską jakość powierzchni obrabianej tym narzędziem. Własności smarujące płynów używanych w obróbce skrawaniem pomagają eliminować zjawisko narostu. Jednakże obecność narostu nie zawsze jest szkodliwa, gdyż przykładowo przy obróbce zgrubnej obecność stałego narostu może być korzystna jako warstwa pośrednia między narzędziem a przedmiotem obrabianym [24-30].

Zużycie może również może być związane z wykruszeniem krawędzi skrawającej. Takie wykruszenia występują zazwyczaj, gdy krawędź skrawająca nieregularnie usuwa materiał jak w przypadku frezowania. Jest to spowodowane przez okresowy kontakt narzędzia z przedmiotem obrabianym i nagrzewanie krawędzi skrawającej, w wyniku czego powstają małe pęknięcia, które powiększając się prowadzą do wykruszenia narzędzia [54-56].

Zużycie ścierne, dyfuzyjne, adhezyjne oraz wykruszenia występują w warunkach pracy wewnątrz strefy bezpiecznej przedstawionej na rysunku 2.10 i powodują stopniowe zużywanie się powierzchni narzędzia. Wydłużenie okresu zużycia w stanie ustalonym prowadzi do zwiększenia trwałości narzędzia [15, 29, 34].

III – przyspieszony etap zużycia narzędzia

Po osiągnięciu krytycznego zużycia w stadium ustalonym następuje trzeciorzędowy lub przyspieszony okres zużycia narzędzia. Naciski oraz prędkości skrawania w tym okresie zapoczątkowują wzrost temperatury, a dyfuzja oraz miejscowe zatarcia lub nadtopienia powodują gwałtowne zniszczenie narzędzia. W narzędziach pokrytych powłokami odpornymi na zużycie, jak TiC, przyspieszone zużycie tej powłoki powoduje odsłonięcie mniej odpornego na ścieranie materiału podłoża. To przyspieszone zużycie powoduje uszkodzenie powierzchni przedmiotu obrabianego, który może następnie wymagać naprawy lub stać się odpadem. Dlatego istotne jest, aby wymieniać narzędzia przed rozpoczęciem trzeciorzędowego okresu zużycia narzędzi [18, 19, 30, 42].

W wyniku drugiego mechanizmu fragment wióra adhezyjnie szczepia się z powierzchnią narzędzia i następnie odłamuje się wraz ze szczepionym z nim materiałem narzędzia, powodując **ubytki** narzędzia.

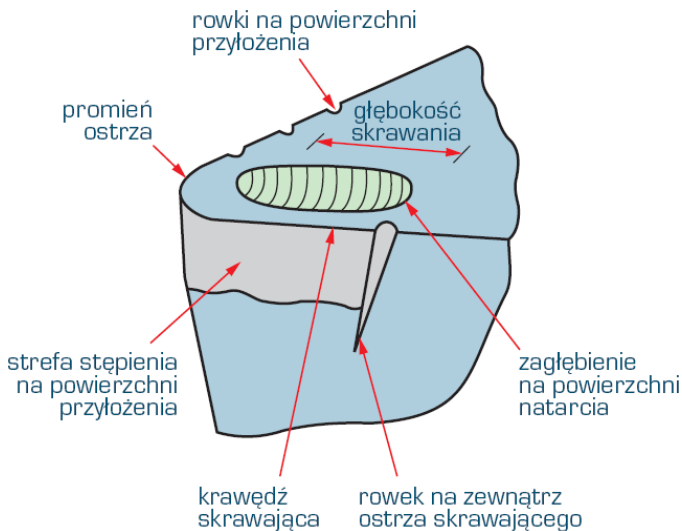
W przypadku gdy temperatura skrawania przekracza ok. 550°C, przeważające jest zużycie adhezyjne. Wielkość odrywających się cząsteczek zmniejsza się przy tym wraz z podwyższeniem temperatury procesu.

W wyniku wzajemnego przenikania atomów materiału ostrza do materiału skrawanego i odwrotnie, zwłaszcza w strefie styku metalicznego, występuje **zużycie dyfuzyjne ostrza**, bardzo gwałtowne w momencie zetknięcia obu materiałów i malejące z upływem czasu.

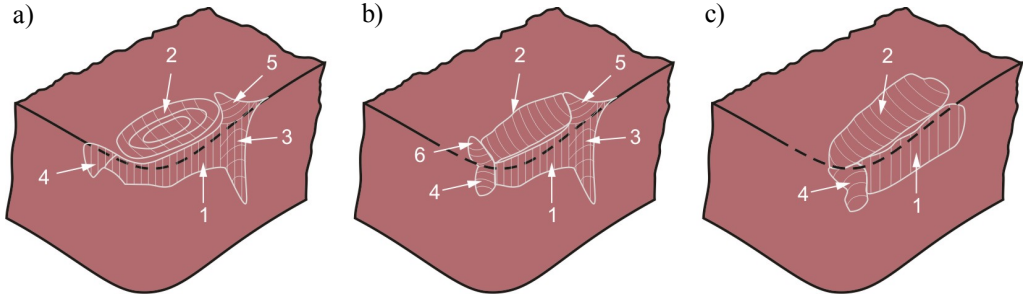
W przypadku stosowania cieczy chłodząco-smarujących materiał ostrza tworzy ponadto z otaczającym go ośrodkiem powierzchniowe związki chemiczne, słabo związane z podłożem i łatwo ulegające ścieraniu, co decyduje o **zużyciu chemiczno-ściernym ostrza**.

Przy dużej prędkości skrawania czynnikiem decydującym o zużyciu narzędzia jest jego **odkształcenie plastyczne**. Charakterystycznym przejawem zużycia jest wówczas **zagłębienie** na powierzchni natarcia na odcinku nagrzanym do najwyższej temperatury, utworzone w wyniku powierzchniowego odkształcenia plastycznego narzędzia. W wyniku działania naprężeń normalnych krawędź skrawająca ulega odkształceniu plastycznemu, co wpływa na zwiększenie sił skrawania i sprzyja przez to przyspieszeniu zużycia narzędzia. Lokalnie w miejscach, w których występuje przerywany lub ciągły poślizg, następuje pęknięcie i wykruszanie makrocząsteczek materiału narzędziowego, w wyniku czego na powierzchni przyłożenia występują głębokie **rowki** prostopadłe do krawędzi skrawającej ostrza narzędzia.

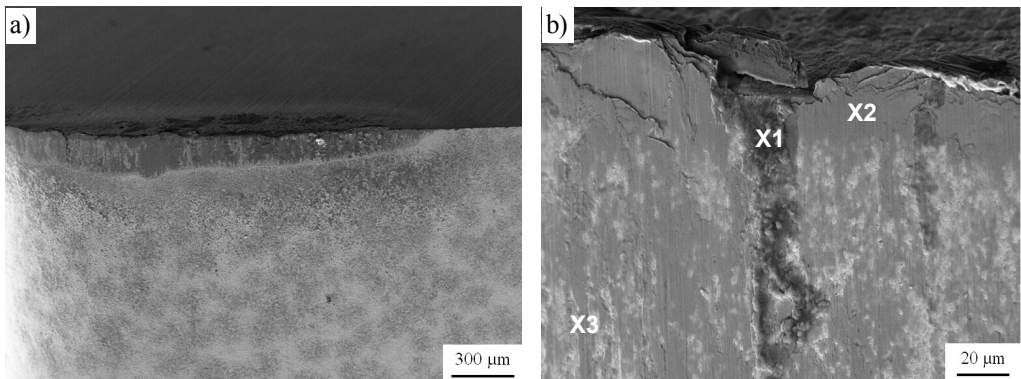
Na rysunku **2.12** przedstawiono schematycznie typowe **zużycie narzędzia skrawającego** na przykładzie noża tokarskiego, a rysunkach **2.13-2.20** przedstawia różnice w zużyciu narzędzi wykonanych z różnych materiałów narzędziowych, w tym ceramiki.



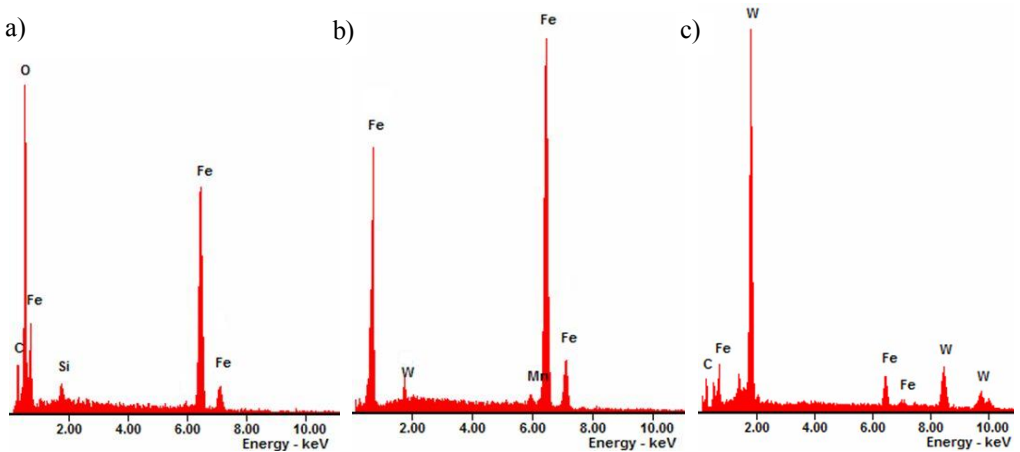
Rysunek 2.12. Schemat typowego zużycia noża tokarskiego [1, 4]



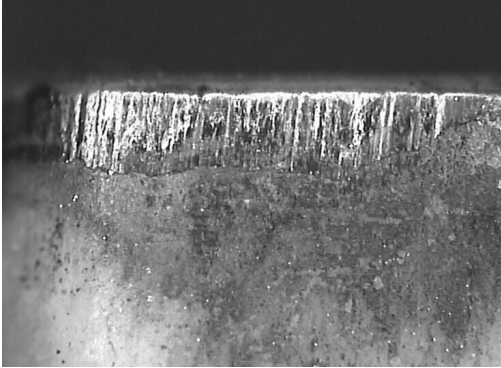
Rysunek 2.13. Zużycie materiałów narzędziowych: a) stal szybkołącząca b) węgiel spiekany, c) ceramika; 1 – zużycie głównej powierzchni przyłożenia, 2 – krater na powierzchni natarcia, 3 – zużycie wrębne na głównej powierzchni przyłożenia, 4 – zużycie wrębne na pomocniczej powierzchni przyłożenia, 5 i 6 – zużycia wrębne na powierzchni natarcia [18]



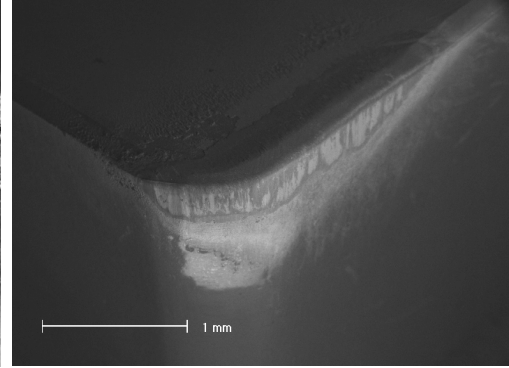
Rysunek 2.14. Obraz zużycia powierzchni przyłożenia węglika spiekanego typu WC-Co bez powłoki, czas skrawania 2 min [87]



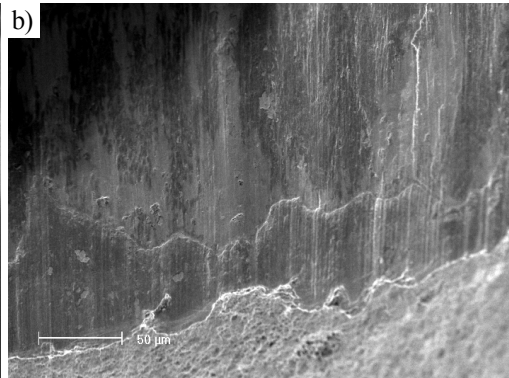
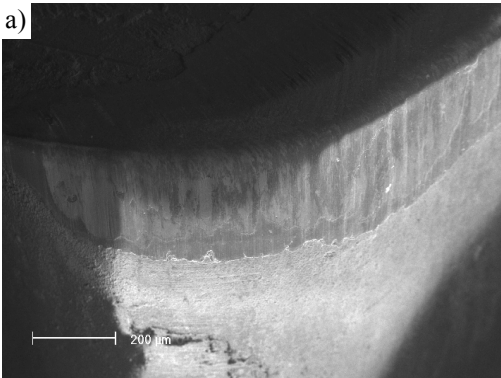
Rysunek 2.15. Wykres energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego z mikroobszaru na rysunku 2.14b: a) X1, b) X2, c) X3 [87]



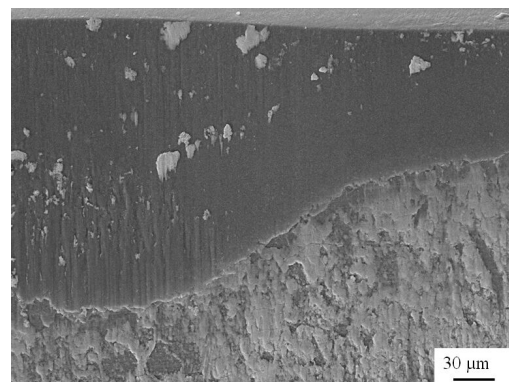
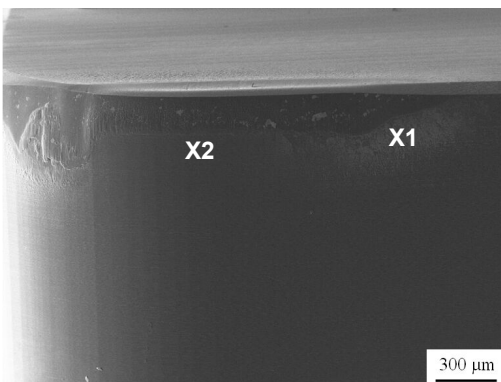
Rysunek 2.16. Szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia VB dla niepokrytej ceramiki azotkowej Si_3N_4 ; czas skrawania 8 min (pow. 40x) [86]



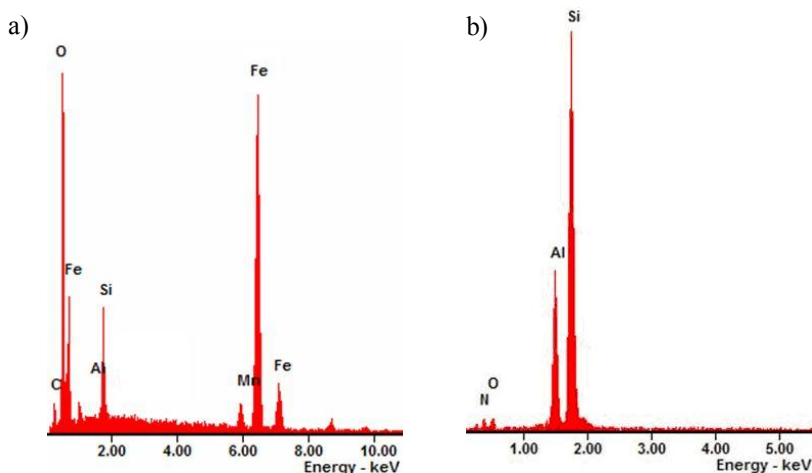
Rysunek 2.17. Naroże płytki niepokrytej z ceramiki azotkowej Si_3N_4 ; czas skrawania 8 min [86]



Rysunek 2.18. a) Widok zużycia powierzchni przyłożenia płytki wieloostrojowej z ceramiki azotkowej Si_3N_4 , b) szczegół z rysunku a); czas skrawania 8 min [86]

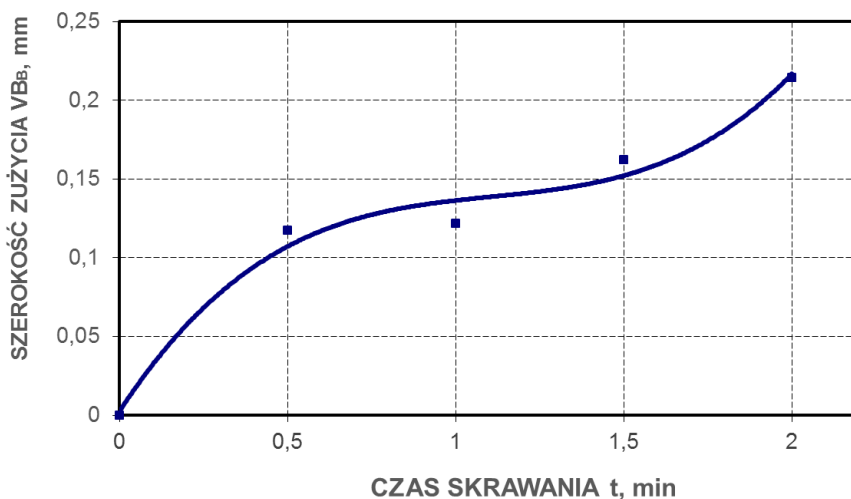


Rysunek 2.19. Obraz zużycia powierzchni przyłożenia sialonowej ceramiki narzędziowej bez powłoki; czas skrawania 11 min [87]

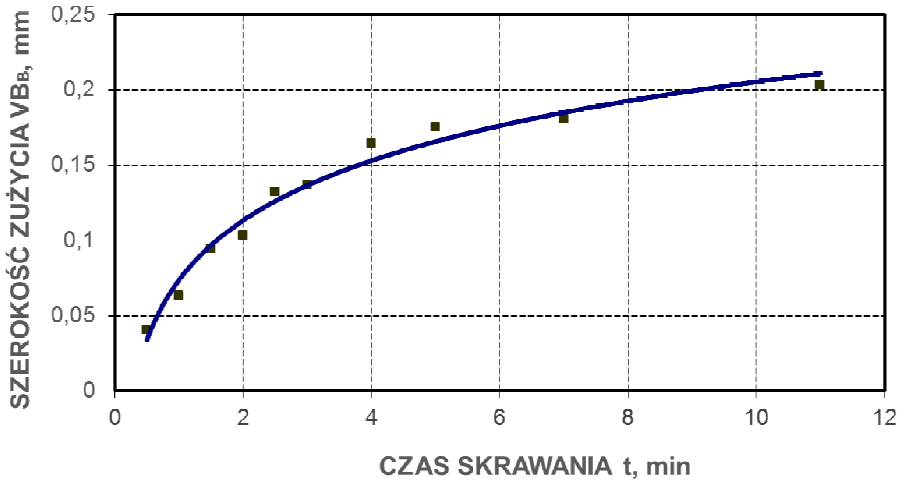


Rysunek 2.20. Wykres energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego z mikroobszaru na rysunku 2.19a: a) X1, b) X2 [87]

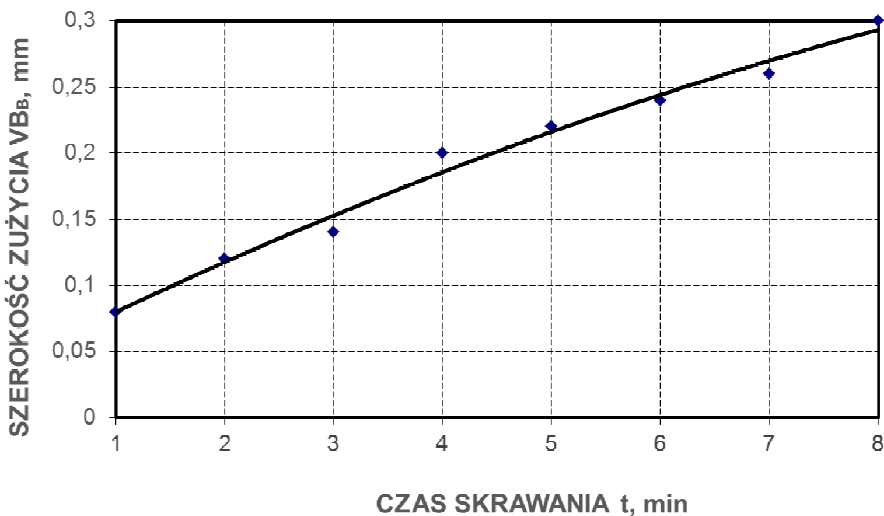
W przypadku węglików spiekanych trwałość ostrza niepokrytego wynosi $T = 2$ min, natomiast trwałość ostrza z ceramiki sialonowej wynosi $T = 11$ min ciągłego toczenia (rys. 2.21 i 2.22). Przykładowe wyniki badań dotyczące ceramiki azotkowej Si_3N_4 przedstawiono na rysunku 2.23.



Rysunek 2.21. Wykres zależności pasma zużycia na powierzchni przyłożenia V_{B_B} od czasu skrawania T dla węglików spiekanych [87]



Rysunek 2.22. Wykres zależności pasma zużycia na powierzchni przyłożenia VB_B od czasu skrawania T dla ceramiki sialonowej [87]



Rysunek 2.23. Wykres zależności pasma zużycia na powierzchni przyłożenia VB od czasu skrawania t dla ceramiki azotkowej Si_3N_4 [86]

Dominujący mechanizm i związana z tym szybkość zużycia decydujące o skrawności narzędzia są uzależnione od wielu czynników. Można je usystematyzować w trzech grupach:

- uzależnione od składu chemicznego i struktury materiału obrabianego i narzędzia,
- decydujące o temperaturze i naprężeniach w narzędziu,

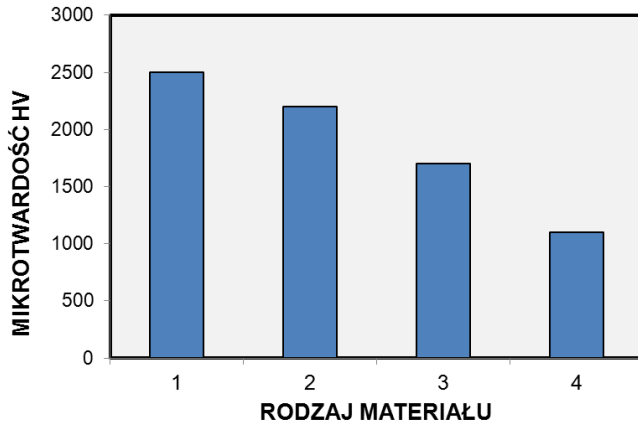
- związane z cechami geometrycznymi narzędzia, sztywnością obrabiarki, chłodzeniem i smarowaniem w procesie skrawania (tabl. 2.1).

Tablica 2.1. Czynniki wpływające na skrawność narzędzia [4]

I	Skład chemiczny i struktura materiału obrabianego i narzędzia
II	Temperatura skrawania w relacji z twardością na gorąco materiału narzędziowego Podwyższona temperatura, duże obciążenie, mała wytrzymałość materiału obrabianego Naprężenia normalne w strefie ostrza narzędzia Wytrzymałość adhezyjna połączenia wióra i narzędzia w pobliżu ostrza skrawającego Wzajemna rozpuszczalność między wiórem a narzędziem Udział objętościowy twardego ścierniwa w materiale obrabianym
III	Cechy geometryczne narzędzia i promień ostrza Wibracje narzędzia w obrabiarce Ciecze chłodzące i smarujące w procesie skrawania

W związku ze stale rosnącymi własnościami materiałów obrabianych, narzędziom stawiane są coraz wyższe wymagania, związane przede wszystkim z czasem pracy ostrza, jego twardości, prędkości oraz głębokości skrawania. Powszechnie dąży się do zwiększenia wydajności pracy narzędzia przez zwiększenie grubości skrawanego materiału i skrócenie czasu pojedynczego przejścia. Determinuje to własności, jakie powinno mieć narzędzie, przede wszystkim twardość ostrza, ale nie tylko. Równie ważne w przypadku narzędzi pokrywanych są przyczepność powłoki do podłoża, z czego wynika wytrzymałość zmęczeniowa i mechaniczna. Przyczepność powłoki do podłoża ma wpływ przede wszystkim na żywotność ostrza. Istotne jest także zmniejszenie współczynnika tarcia, co ma duży wpływ na warunki obróbki, obniża bowiem temperaturę obróbki i eliminuje ciecze chłodzące, które z kolei wpływają na zwiększone zagrożenie korozją. W tym celu prowadzi się liczne badania mające na celu poprawienie własności narzędzi [14, 15, 43-58].

Twardość ostrza jest równie ważna, jak jego odporność na zużycie, właściwie jedno determinuje drugie. Przykładowe wartości twardości różnych powłok przedstawiono na rysunku 2.24. Na podstawie struktury powłok oraz wykresów ich twardości można zauważyć, że powłoki wielowarstwowe mają większą twardość, jeżeli warstwa znajdująca się na zewnątrz składa się nie z jednego pierwiastka, a z dwu lub więcej, np. (Ti,Al)N lub Ti(C,N) [47, 50].



Rysunek 2.24. Porównanie twardości powłok azotkowych nanoszonych na narzędzia:
 1) $(Ti,Al)N$, 2) $Ti(C,N)$, 3) TiN , 4) Ti_2N [50]

W praktyce technologicznej koniec okresu trwałości narzędzia następuje zwykle wtedy, gdy narzędzie przestaje zapewniać uzyskanie przedmiotu o pożądanych wymiarach i jakości powierzchni. Okres do chwili, w której narzędzie staje się niezdolne do dalszego skrawania, także może być traktowany jako okres trwałości narzędzia. Zużycie ostrza przejawia się w formie ubytku jego materiału przez starcie, wyszczerbienie i wykruszenie krawędzi skrawającej lub wyłamanie ostrza. Miarą zużycia ostrza jest ilościowy ubytek jego materiału [16, 25, 33].

Do ogólnych objawów zużycia ostrza można zaliczyć [18]:

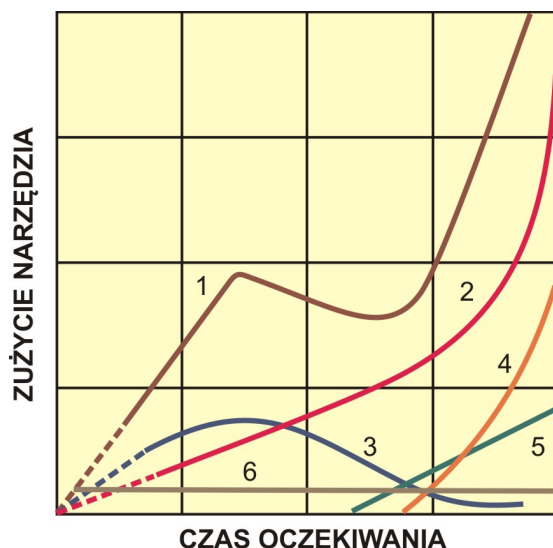
- wyszczerbienie i wykruszenie (krawędzi skrawającej),
- starcie (żłobek) powierzchni natarcia,
- zwiększone starcie na granicy styku ostrza z materiałem obrabianym,
- starcie pomocniczej powierzchni przyłożenia,
- głębokie rysy wywołane odrywającą się częścią narostu i wciskaną w materiał przedmiotu na powierzchni skrawania,
- zwiększone starcie wywołane intensywnym utlenianiem materiału ostrza na granicy styku ostrza z materiałem obrabianym,
- starcie głównej powierzchni przyłożenia.

Ze względu na sposób wzrastania zużycia ostrza rozróżnia się:

- zużycie bezstopniowe (ciągłe) i

- skokowe (wytrzymałościowe).

Zużycie ciągle wzrasta bez większych ubytków materiału ostrza, w krótkim czasie obserwacji przebiegu tego zużycia. Zużycie skokowe polega na jednorazowym lub powtarzającym ubytku ostrza lub jego uszkodzeniu przez np. pęknięcie ostrza. Na rysunku 2.25 przedstawiono zależność różnych rodzajów zużycia od czasu skrawania [16, 25, 33, 99].



Rysunek 2.25. Zależność wzrostu zużycia ostrza narzędzia od czasu pracy: 1 – zużycie ubytkowe, 2 - zużycie ściernie (abrazyjne), 3 – zużycie adhezyjne, 4 – zużycie dyfuzyjne, 5 – zużycie w wyniku utleniania, 5 – odkształcenie plastyczne [15]

Przyczynami zużycia ciągłego są [1, 33]:

- zużycie mechaniczno-ściernie polegające na ścinaniu nierówności powierzchni ostrza przez materiał skrawany i wiór oraz powstawaniu nowych nierówności na powierzchniach ostrza przez skrawne działanie twardych mikrowtrąceń struktury materiału skrawanego,
- zużycie chemiczno-ściernie polegające na tworzeniu się w materiale ostrza powierzchniowych warstw związków chemicznych słabo związanych z podłożem w wyniku działania aktywnych chemicznie składników płynu obróbkowego lub tlenu z otaczającego powietrza,
- zużycie adhezyjne polegające na wrywaniu z materiału ostrza jego cząstek przez szepione z nimi siłami adhezji cząstki materiału skrawanego,
- zużycie dyfuzyjne polegające na szkodliwym przenikaniu atomów materiału ostrza do materiału skrawanego oraz atomów materiału skrawanego do materiału ostrza, przez co

tworzy się warstwa dyfuzyjna materiału ostrza o mniejszej twardości i większej kruchości niż rodzimy materiał ostrza; gorsze własności tej warstwy powiększają intensywność zużycia ostrza.

W konkretnych warunkach skrawania występują jednocześnie różne rodzaje zużycia ciągłego, przy czym dominujące znaczenie mają niektóre z nich.

Przyczyną zużycia skokowego jest miejscowe przekroczenie doraźnej lub zmęczeniowej wytrzymałości materiału ostrza, którego objawami są [18, 33]:

- wyszczerbienia – małe ubytki materiału ostrza występujące na krawędzi skrawającej i nie przekraczające wymiarami swego obrysu 0,5 mm,
- wykruszenia – większe ubytki materiału ostrza nie wykraczające poza obszar kontaktu ostrza z materiałem skrawanym,
- wyłamania – duże ubytki materiału ostrza wykraczające poza obszar kontaktu ostrza z materiałem skrawanym.

Zużycie wiąże się bezpośrednio ze stopieniem ostrza. Za ostrze stepione uważane jest ostrze, w którym zużycie osiągnęło określoną granicę, czyli nastąpiło zużycie dopuszczalne. Rozróżnia się trzy grupy kryteriów stopienia ostrza [15, 52, 53]:

- **Kryteria fizyczne** uwzględniają jedynie możliwości skrawne narzędzia. Z fizycznego punktu widzenia ostrze jest uznawane za stepione wówczas, gdy stan jego zużycia, określony wybranym wskaźnikiem (najczęściej V/B_p), poprzedza moment zaistnienia zużycia katastroficznego.
- **Kryteria ekonomiczne** uwzględniają optymalne pod względem wydajności, wykorzystanie narzędzia w całym okresie użytkowania, mając na uwadze liczbę wykonanych zabiegów technologicznych między kolejnymi ostrzeniami narzędzia i liczbę dopuszczalnych ostrzeń narzędzia, wynikającą z przewidywanego zapasu na ostrzenie oraz grubość warstwy materiału ostrza usuwanej podczas jednego ostrzenia. Ustalenie ekonomicznego zużycia ostrza dokonuje się w odniesieniu do narzędzi pracujących w warunkach produkcji wielkoseryjnej lub masowej (narzędzie wykonuje zawsze ten sam zabieg technologiczny).
- **Kryteria technologiczne** odnoszą się do wymagań obróbki rozpatrywanym narzędziem.

Z technologicznego punktu widzenia ostrze jest uznawane za stepione wówczas, gdy jego zużycie odpowiada przekroczeniu dopuszczalnej chropowatości powierzchni obrobionej lub zmianie wymiaru obróbkowego w granicach dopuszczalnej tolerancji jego wykonania.

Niektóre badania skrawności używają tylko jednego kryterium dla określenia skrawności narzędzia, inne potrzebują pięciu bądź sześciu różnych zmiennych. Najczęściej używanymi kryteriami oceny łatwości skrawania są [54-56]:

1. Trwałość ostrza między ponownymi ostrzeniami, wyrażona różnymi okresami w testach trwałości narzędzia.
2. Wielkość sił działających na narzędzie podczas obróbki skrawaniem lub zużyta moc określona w testach sił skrawania.
3. Jakość powierzchni obrobionej, zbadana w testach powierzchni obrobionej.

Trzy główne kryteria: trwałość ostrza, siły skrawające i jakość powierzchni obrobionej należy odnieść do ogólnych kosztów obróbki uzyskanych w praktyce. Logiczne więc jest, że te trzy wielkości powinny stać się najpowszechniej przyjmowanymi miarami skrawności dla użytku praktycznego. Od dawna jednak trwałość ostrza jest zazwyczaj dominującym kryterium określającym skrawność i wpływającym na koszt operacji. Stosowanie testów trwałości ostrza jest jedną z najistotniejszych ekonomicznie okoliczności w obróbce skrawaniem, a porównanie alternatyw (narzędzi, materiału obrabianego, cieczy obróbkowych) jest uzasadnione z ekonomicznego punktu widzenia [15, 35].

Jak większość produktów narzędzia zużywają się. Zużycie to będzie prowadzić albo do konieczności zregenerowania narzędzia lub do ich wymiany. Dzieje się tak dlatego, że obciążenia normalne na powierzchni obrabianej są duże, jak również dlatego, że wióry oraz przedmiot obrabiany przenoszą szybko te obciążenia na całą powierzchnię. Obciążenia na zużywającej się powierzchni narzędzia wytwarzają tarcie pośrednio zwiększając temperaturę, a w rezultacie zwiększają chemiczne i fizyczne procesy zużycia, tak więc ułatwiają zwiększanie się zużycia narzędzia. Te duże siły i posuwy są niezbędne by usunąć niepotrzebny materiał z przedmiotu obrabianego i są częścią procesu. Dlatego zużycie narzędzia powinno być rozpatrywane jako czynnik ekonomiczny obróbki skrawaniem. Koszty towarzyszące zużyciu narzędzia mogą być zminimalizowane, jeżeli proces skrawania jest zaplanowany i sterowany w oparciu o gruntowną wiedzę o procesach zużycia towarzyszących wykonywanym operacjom [18, 22, 27].

Nanoszenie powłok na powierzchniach narzędzi skrawających ze stali szybko tnących, z cermetali narzędziowych i węglików spiekanych oraz ceramiki narzędziowej powoduje kilkakrotne zwiększenie trwałości ostrza przez zmniejszenie zużycia krawędzi skrawających

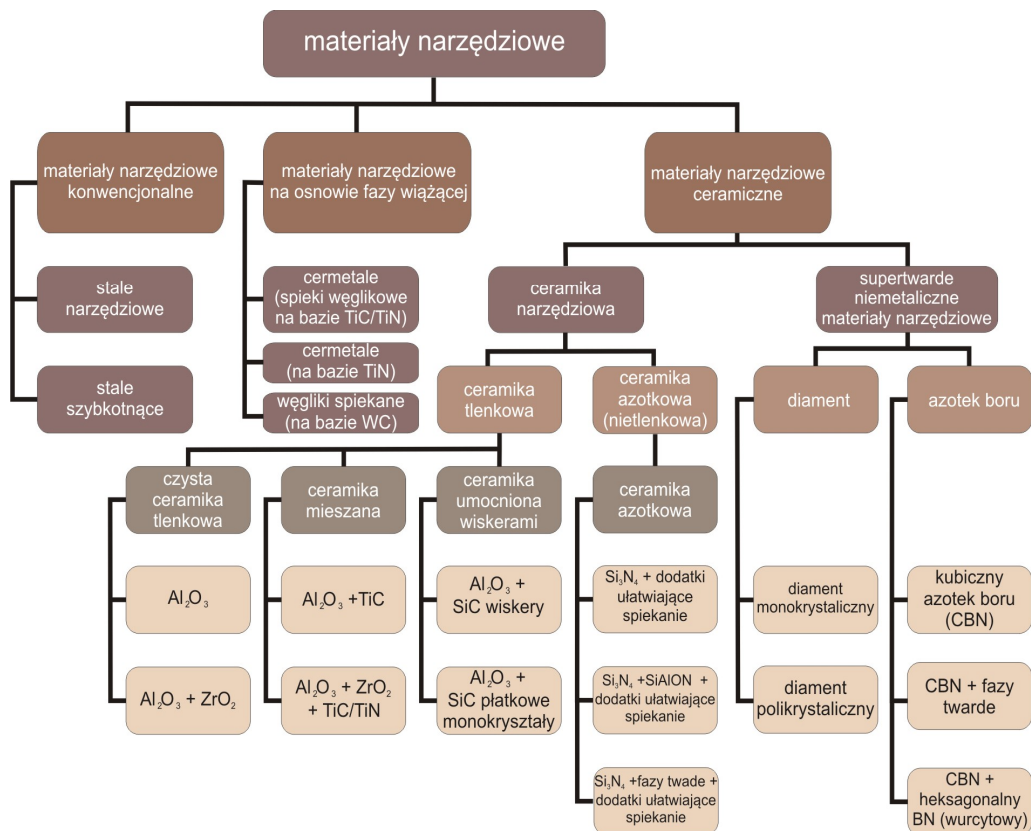
w porównaniu do narzędzi niepokrywanych lub pokrytych prostymi powłokami opartymi na monoazotkach lub węglikoazotkach, poprawę warunków kontaktu trybologicznego w obszarze styku narzędzie-wiór-materiał obrabiany oraz zabezpieczenie ostrza narzędzia przed utlenianiem i nadmiernym przegrzaniem. Gwałtowny rozwój technologii PVD zapoczątkowany w latach osiemdziesiątych, związany z szerokim stosowaniem trudno topliwych związków węgla, azotu, boru w szczególności z metalami przejściowymi, do nanoszenia cienkich, twardych, przeciwzużyciowych powłok jest jednym z najważniejszych sposobów ograniczenia zużycia narzędzi. Ograniczenie szybkości zużycia oraz zwiększenie trwałości, mały współczynnik przewodności cieplnej, odporność na oddziaływanie wysokiej temperatury, a w wielu przypadkach ograniczenie procesów utleniania i korozyjnych decyduje w głównej mierze o wykorzystaniu powłok otrzymywanych w procesie PVD, a w wybranych przypadkach w procesie CVD do pokrywania materiałów narzędziowych [14].

2.3. Klasyfikacja materiałów narzędziowych i szczególne wymagania stawiane spiekany materiałom narzędziowym

Materiał narzędzia powinien posiadać zespół cech, które pozwolą mu pracować w różnych warunkach. Do wymagań stawianych narzędziom skrawającym należą [14, 16, 20-23]:

- duża twardość oraz wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, skręcanie i zginanie,
- wysoka odporność na zużycie (ściernie, adhezyjne, dyfuzyjne i chemiczne),
- duża odporność na zmęczenie mechaniczne i cieplne,
- znaczna odporność na zmianę własności skrawnych w podwyższonej temperaturze oraz ciągliwość,
- dobra przewodność cieplna i duży opór właściwy.

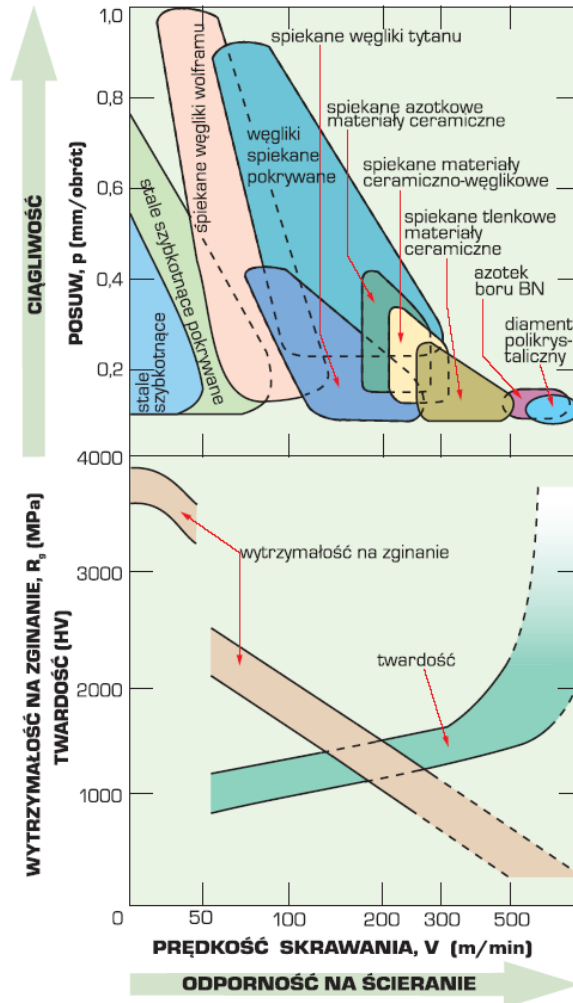
Istnieje kilka podziałów materiałów narzędziowych, m.in. ze względu na rodzaj obróbki, do jakiej są przeznaczone, materiału, z jakiego są wykonane, warunków, w jakich będą pracować. Podział ze względu na materiał, z jakiego są wykonane materiały narzędziowe stosowane współcześnie przedstawia rysunek 2.26 [1]. Materiały narzędziowe można podzielić na wykonywane metodami tradycyjnymi oraz wytwarzane za pomocą metalurgii proszków (spiekane). Do pierwszej grupy należą stale narzędziowe oraz szybko tnące. Drugą grupę stanowią m.in. węgliki spiekane, cermetale, ceramika narzędziowa.



Rysunek 2.26. Przegląd nowoczesnych materiałów narzędziowych [16]

Żaden z dostępnych obecnie na rynku materiałów nie posiada jednocześnie wszystkich pożądanych własności, co jest zrozumiałe gdyż niektóre z nich wykluczają się wzajemnie. Powoduje to ustalenie obszarów zastosowań określonych grup materiałów, w których przypadku minimalizacja zużycia, a w konsekwencji trwałość ostrza, są podstawowym kryterium doboru określonego materiału (rys. 2.27) [1, 14, 15].

Spiekane materiały narzędziowe stanowią zasadniczą grupę stosowaną na narzędzia skrawające. Szybko rozwijająca się technika i technologia stwarza konieczność zwiększania wymagań stawianych spiekany materiałom narzędziowym w zakresie własności mechanicznych, między innymi odporności na zużycie. Nieustanny rozwój nowoczesnych spiekanych materiałów narzędziowych związany jest z szybkim postępem w dziedzinie inżynierii materiałowej. Nowoczesne spiekane materiały narzędziowe ze względu na charakter ich



Rysunek 2.27. Schemat: a) zakresów szybkości skrawania i dopuszczalnego posuwu, b) twardości i wytrzymałości na zginanie różnych spiekanych materiałów narzędziowych i konwencjonalnych stali szybko tnących [3, 8]

charakter ich pracy oraz złożoność mechanizmów zużycia, którym podlegają ostrza narzędzi skrawających, powinny spełniać liczne wymagania, do których należą między innymi [8]:

- wysoka twardość,
- duża udarność,
- odporność na złożone zużycie (adhezyjne, dyfuzyjne, ściernie i cieplne),
- odporność na wysoką temperaturę,
- duża wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, skręcanie i zginanie,

- wysoka odporność na zmęczenie mechaniczne i cieplne,
- dobra przewodność cieplna i pojemność cieplna,
- stabilność krawędzi skrawających,
- dobra ciągliwość.

Materiał narzędziowy o uniwersalnym zastosowaniu, powinien łączyć w sobie podane własności w największym możliwym stopniu, a szczególnie największą odporność na zużycie i twardość z dużą wytrzymałością i dobrą ciągliwością przy jednoczesnej obojętności chemicznej w stosunku do obrabianego materiału. Jednakże pomimo intensywnego rozwoju inżynierii materiałowej ciągle nie wytworzono materiału narzędziowego spełniającego takie wymagania, ze względu na podstawową sprzeczność między takimi własnościami jak twardość i ciągliwość.

Najogólniej – w grupie spiekanych materiałów narzędziowych – można wydzielić:

- stale i cermetale oparte na węglkach metali przejściowych oraz cermetale oparte na azotkach lub mieszaninach azotków i węglików metali przejściowych,
- materiały ceramiczne zawierające głównie $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ i/lub Si_3N_4 , ewentualnie z dodatkiem tlenków innych pierwiastków,
- materiały mieszane – ceramiczno-węglkowe – zawierające zarówno $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ oraz (lub) Si_3N_4 , jak i węgliki metali przejściowych z ewentualnym dodatkiem tlenków lub azotków innych pierwiastków,
- supertwarde materiały spiekane – w tym polikrystaliczny syntetyczny diament i azotek boru BN o regularnej sieci przestrzennej, zwany borazonem – przeważnie nakładane na płytki z węglków spiekanych.

Grupę materiałów opartych na węglkach metali przejściowych, ze względu na udział objętościowy węglików w strukturze, można dodatkowo podzielić na:

- spiekane stale szybko tnące,
- węglkostale spiekane,
- węgliki spiekane.

W zależności od składu fazowego oraz udziału cząstek twardych faz w spiekanych materiałach narzędziowych (od ich obecności lub nie) oraz składu chemicznego materiału wiążącego, a także możliwości poddania materiału obróbce cieplnej zróżnicowane są własności i zastosowanie produktów gotowych ze spiekanych materiałów narzędziowych.

Zakresy zastosowania poszczególnych grup tych materiałów narzędziowych w procesach obróbki skrawaniem podano orientacyjnie na rysunku 2.27.

W tabelicy 2.2 przedstawiono możliwości zastosowania spiekanych materiałów narzędziowych do obróbki różnych materiałów.

Tablica 2.2. *Możliwości zastosowania różnych spiekanych materiałów narzędziowych[3,8]*

Materiał narzędziowy	Materiał obrabiany					
	stal	żeliwo	stale odporne na korozję	stopy niklu	metale nieżelazne	materiały niemetale
Cermetale narzędziowe TiN	☉/☾	☉/☾	☉/☾	☉	☉/☾	☉/☾
Tlenkowe materiały ceramiczne	☉	☉/☾	●	●	●	●
Tlenkowo-węglkowe materiały ceramiczne	☉/☾	☉/☾	☉	☉	●	●
Spiekany azotek krzemu	●	☉/☾	●	☉/☾	●	●
Sialony	●	☉/☾	●	☉/☾	●	●
Lity regularny azotek boru	☉/☾	☉/☾	●	●	●	●
Ostrza płytkowe z regularnego azotku boru	☉	☉	☉	☉	●	●
Ostrza płytkowe z polikrystalicznego syntetycznego diamentu	●	●	●	●	☉/☾	☉/☾
Oznaczenia: ☉ zalecane do toczenia, ☉/☾ zalecane do frezowania, ● niezalecane.						

2.4. Charakterystyka węglików spiekanych

Materiałami powszechnie stosowanymi na narzędzia skrawające, tradycyjnie wytwarzanymi metodami metalurgii proszków są spiekane węgliki metali.

Węgliki spiekane są materiałami składającymi się z węglików metali trudno topliwych, głównie W, a także Ti, Ta i Nb, o udziale objętościowym ok. 65-95% oraz metalu wiążącego, którym jest zwykle kobalt (tabl. 2.3, według normy PN-88/H-89500). Ponadto mogą być produkowane węgliki spiekane, w których metalem wiążącym jest nikiel, molibden oraz żelazo lub ich stopy z kobaltem.

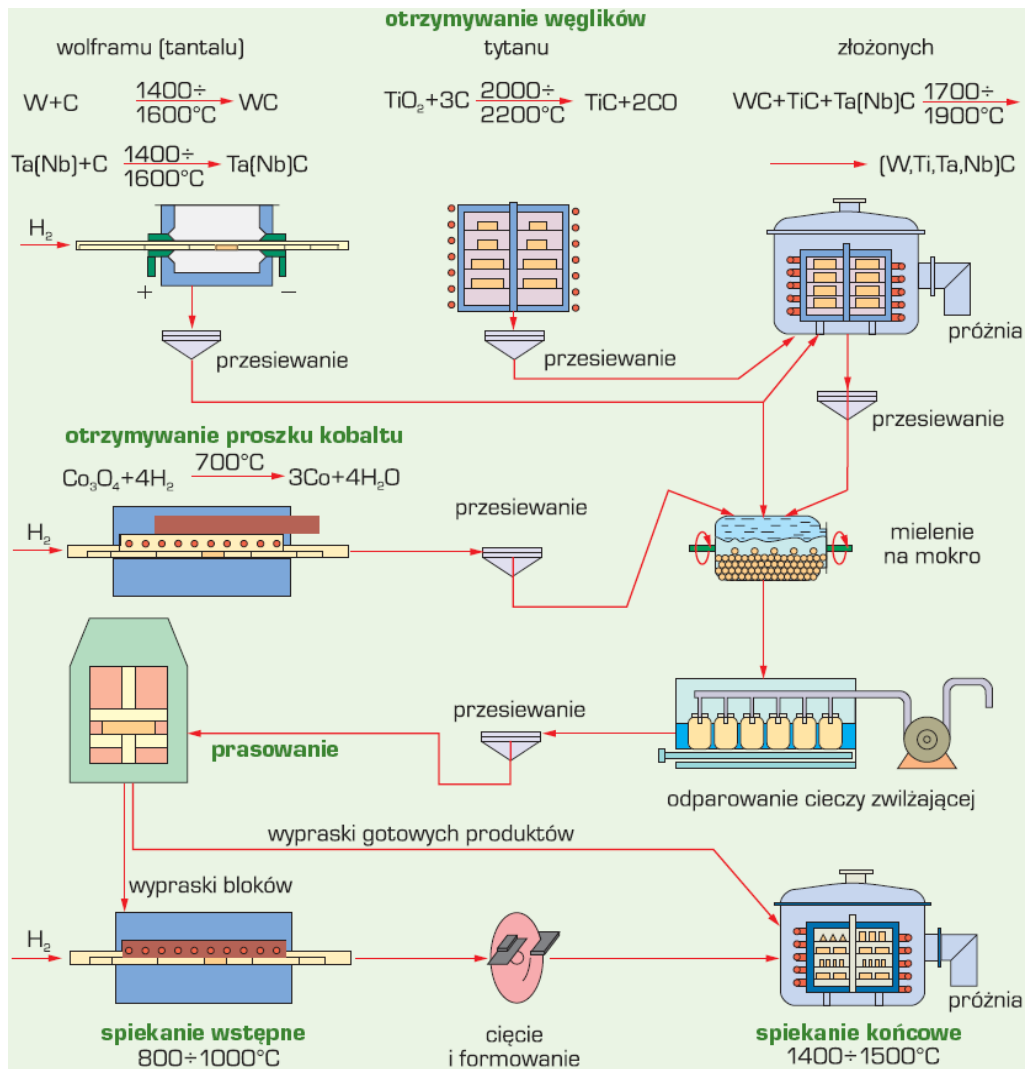
Tablica 2.3. Orientacyjny skład chemiczny węglików spiekanych niepokrywanych [3]

Grupa i zastosowanie	Gatunek	Udział masowy składników, %		
		WC	TiC+TaC+NbC	Co
S (P)¹⁾ Gatunki stosowane do obróbki skrawaniem materiałów dających długi wiór, głównie stali i staliwa	S10S	56	35	9
	S10	78	16	6
	S20S	58	31,5	10,5
	S20	78	14	8
	SM25	69,5	21	9,5
	S30S	79	13	8
	S30	87	5	8
	S35S	78	12	10
	S40S	79	7	14
U (M)¹⁾ Gatunek stosowany do obróbki skrawaniem materiałów dających zarówno długi, jak i krótki wiór	U10S	84,8	9,7	5,5
H (K)¹⁾ Gatunki stosowane do obróbki skrawaniem materiałów dających krótki wiór, głównie żeliwa	H03	94	–	6
	H10S	91	4,5	4,5
	H10	94	–	6
	H15X	92,5	0,5	7
	H20S	92	2,5	5,5
	H20	94	–	6
	H30	91	–	9
G Gatunki stosowane do obróbki plastycznej i na elementy urządzeń odporne na ścieranie	G10	94	–	6
	G15	91	–	9
	G20	89	–	11
	G25N	86,5	–	13,5
	G30	85	–	15
	G35N	82	–	18
	G40	80	–	20
	G50S	74,8	0,2	25
B Gatunki stosowane do zbrojenia narzędzi górniczych	B0	93	–	7
	B1	92	–	8
	B2	91	–	9
	B23	90,5	–	9,5
	B40	89	–	11
	B45	89	–	11

¹⁾ Oznaczenie głównej grupy obróbki wiórowej według PN-ISO 513:1999 (porównaj tabl. 2.4).

Pierwszy etap produkcji węglików spiekanych polega na wytwarzaniu proszku węglików. Spośród licznych metod jego wytwarzania można wyróżnić:

- metodę stapiania,
- nawęglanie proszków czystych metali, tlenków lub wodorków metali w stanie stałym przez spiekanie,
- nawęglanie proszków czystych metali, tlenków lub wodorków metali gazami zawierającymi węgiel,



Rysunek 2.28. Schemat procesu technologicznego węglików spiekanych [3]

- wydzielanie z fazy gazowej,
- wytrącanie węglików ze stopionych metali,
- elektrolizę soli.

Węgliki otrzymane różnymi metodami są poddawane zwykle oczyszczaniu i rozdrabnianiu.

Produkty z węglików wytwarza się przez prasowanie i spiekanie oraz prasowanie na gorąco. Coraz większego znaczenia nabierają ponadto inne technologie, polegające np. na spiekaniu pod ciśnieniem z ogrzewaniem indukcyjnym, wyciskanie prętów i tulejek z proszków z dodatkiem plastyfikatorów oraz odlewanie w zawieszynie.

Zwykle węgliki spiekane wytwarza się jedną z trzech metod (rys. 2.28):

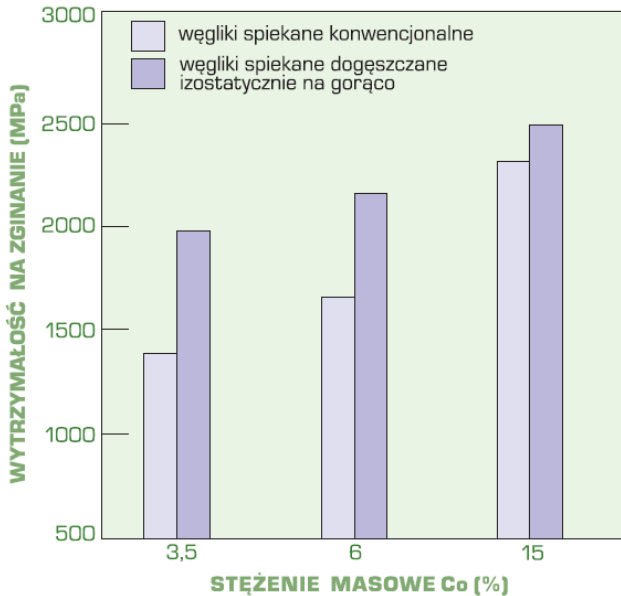
- wielostopniową,
- skróconą,
- jednostopniową.

Ze względu na największą wydajność i najniższe koszty najczęściej jest stosowana metoda skrócona. Spiekanie odbywa się zwykle w piecach próżniowych indukcyjnych lub oporowych. Metoda jednostopniowa jest stosowana do celów specjalnych – do wytwarzania produktów dużych i bez porów, a także do wytwarzania produktów narażonych w czasie eksploatacji na obciążenia udarowe oraz produktów stosowanych na narzędzia do obróbki plastycznej. Dodatkowe dogęszczanie podczas prasowania izostaticznego na gorąco w temperaturze 1350-1450°C pod ciśnieniem argonu 100-300 MPa wpływa decydująco na zwiększenie wytrzymałości na zginanie węglików spiekanych i zwiększenie ich gęstości (rys. 2.29).

Węglików spiekanych nie poddaje się obróbce cieplnej, gdyż metal wiążący nie podlega przemianom fazowym. Węgliki spiekane nie nadają się również do obróbki plastycznej i mechanicznej polegającej na toczeniu i frezowaniu. Mogą być jednak szlifowane lub docierane.

W strukturze węglików spiekanych w temperaturze pokojowej mogą występować następujące fazy [3]:

- α – spiekane cząstki pierwotne węglika wolframu WC,
- α_1 – roztwór stały wtórny kobaltu w węgliku wolframu WC, nieprzekrystalizowanym w czasie spiekania, występujący w postaci drobnych zaokrąglonych ziarn,
- α_2 – roztwór stały wtórny kobaltu w węgliku wolframu WC, utworzony w wyniku przekrystalizowania w czasie spiekania, występujący w postaci dużych ziarn o regularnych kształtach,



Rysunek 2.29. Wpływ dogęszczania izostatycznego na gorąco na wytrzymałość na zginanie węglików spiekanych WC-Co o różnym stężeniu kobaltu [3]

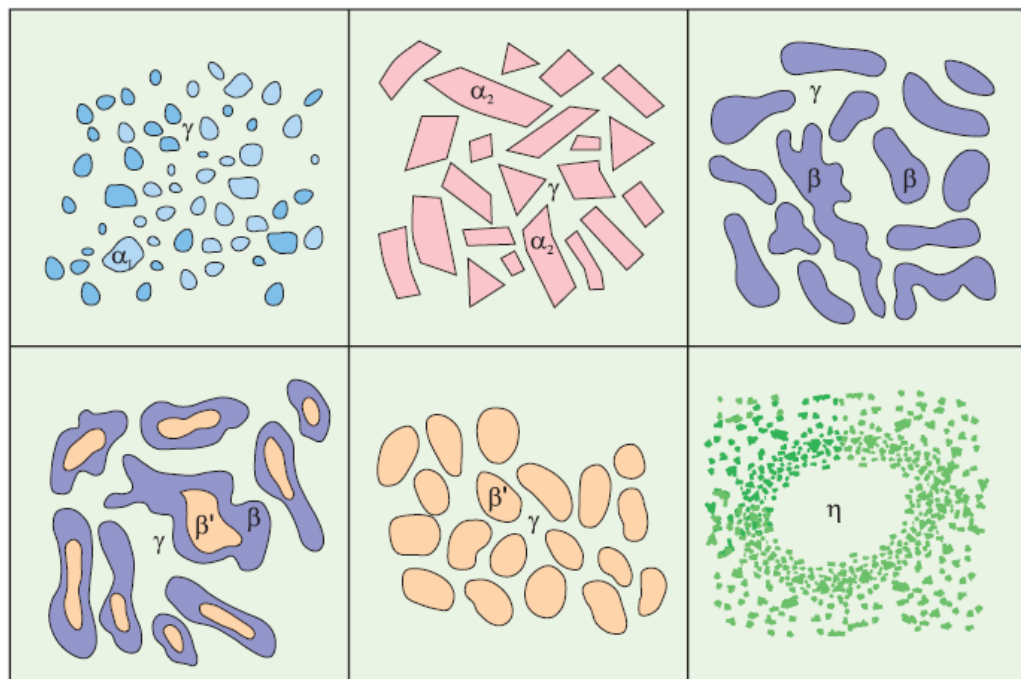
- γ – roztwór stały wolframu, tantalu i węgla w kobalcie,
- β – węgliki (Ti,W)C, (Ta,W)C lub (Ti,Ta,W)C w postaci łańcuchów lub ziarn kulistych,
- β' – faza β zubożona w wolfram o zwiększonym stężeniu tytanu lub tantalu.

W przypadku niedomiaru węgla mogą utworzyć się fazy:

- η – faza o strukturze złożonej $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$,
- Θ – faza o strukturze złożonej $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}_2$,
- χ – faza o strukturze złożonej $\text{Co}_3\text{W}_{10}\text{C}_4$,
- δ – faza typu Co_3W .

Na rysunku 2.30 przedstawiono schematycznie morfologię niektórych faz występujących w węglkach spiekanych. Osnowę węglików spiekanych stanowi roztwór stały γ .

W gatunkach węglików spiekanych z grup zastosowań S, U i H według PN (tabl. 2.3) – odpowiednio P, M i K według PN-ISO (tabl. 2.4) – występują fazy α_2 , β i γ lub tylko β i γ . W gatunkach tych faza β występuje w postaci łańcuchów. W przypadku niewłaściwego spiekania następuje rozpad fazy β na pojedyncze okrągłe ziarna. Jeżeli węglik tytanu nie jest nasycony wolframem, to powstaje faza β' . Znaczne zwiększenie udziału węglika (Ti,W)C powoduje zanik fazy α w strukturze.



Rysunek 2.30. Morfologia poszczególnych faz w strukturze węglików spiekanych [3]

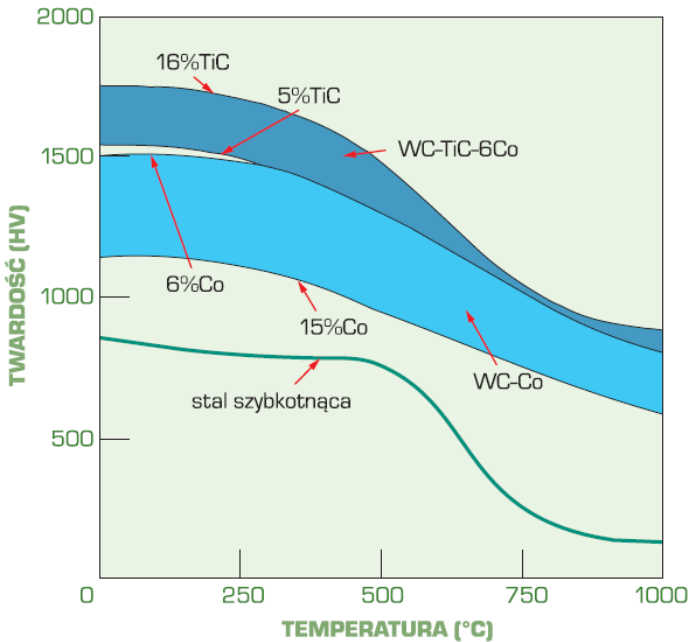
W gatunkach węglików spiekanych z grup zastosowań C i B wg PN (tabl. 2.3) złożonych z węglików wolframu WC niezawierających węglików tytanu TiC i tantalu TaC występują jedynie fazy α_1 , α_2 i γ .

Własności węglików spiekanych zależą głównie od składu chemicznego i składu fazowego węglików, kształtu i wielkości jego ziarn oraz udziału objętościowego w strukturze.

Węglik spiekane wykazują dużą odporność na działanie wysokiej temperatury – do ok. 1000°C nie tracą swej dużej twardości (rys. 2.31) i odporności na ścieranie. Umożliwia to ich stosowanie do skrawania z dużą szybkością.

Wytrzymałość na zginanie węglików spiekanych ulega zwiększeniu ze wzrostem stężenia kobaltu, zwiększeniem udziału węgliku tantalu i zmniejszeniem udziału węgliku tytanu. Wytrzymałość na zginanie zależy również od wielkości ziarn osnowy i ziarn węglików, przy czym maksymalna wytrzymałość na zginanie odpowiada określonej wielkości ziarn osnowy zwiększającej się ze zwiększeniem stężenia kobaltu w węglkach spiekanych.

Węglik spiekane wykazują bardzo dużą wytrzymałość na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się ze zwiększeniem stężenia kobaltu oraz udziału węgliku tytanu.

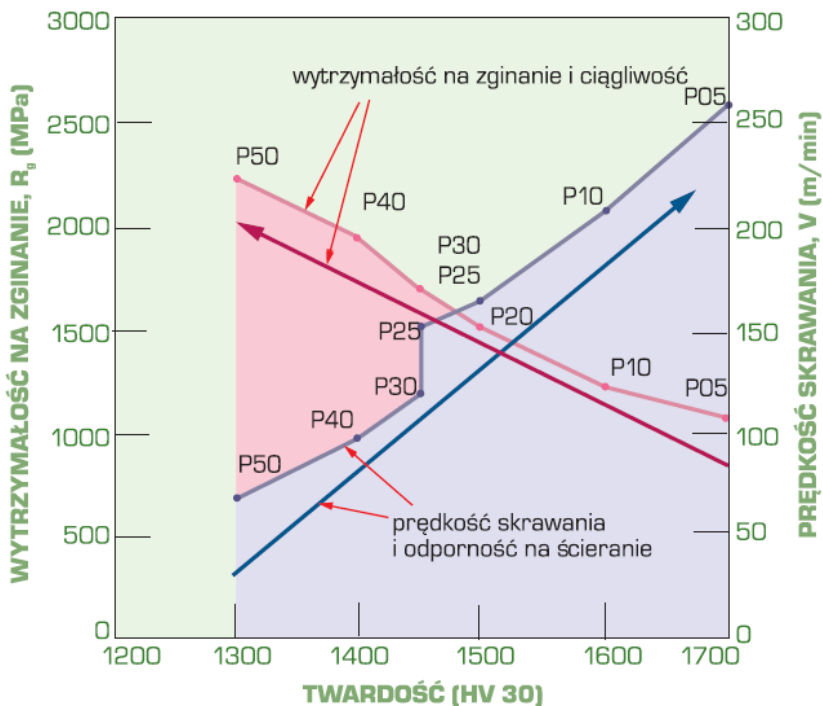


Rysunek 2.31. Wpływ temperatury badania na twardość węglików spiekanych na osnowie kobaltu WC-Co i WC-TiC-Co oraz stali szybko tnącej [3]

W licznych zastosowaniach węglików spiekanych wykorzystano ich bardzo dużą odporność na ścieranie, która zależy od składu chemicznego. Największą odporność na ścieranie uzyskują węgliki spiekane WC-Co z małym stężeniem kobaltu. Gatunki te mogą być stosowane wyłącznie w przypadku, gdy w czasie pracy nie występują uderzenia, a głównym mechanizmem zużycia jest ścieranie. W przypadku, gdy w czasie pracy występują obciążenia udarowe, stosuje się węgliki spiekane o większym stężeniu kobaltu.

Do podstawowych własności użytkowych węglików spiekanych należą bardzo dobre własności skrawne, ulegające polepszeniu ze zmniejszeniem stężenia kobaltu oraz ze zwiększeniem udziału węgla TiC w węgliku spiekany. Polepszeniu własności skrawnych spowodowanych zwiększeniem twardości węglików spiekanych towarzyszy zmniejszenie ciągliwości, której miarą jest m.in. wytrzymałość na zginanie (rys. 2.32) [3].

Do obróbki z dużą prędkością skrawania i w wysokiej temperaturze skrawania stosuje się węgliki spiekane z dodatkiem węgla tytanu TiC. Dodatek węgla TiC zmniejsza około 20-krotnie skłonność węglików spiekanych do zgrzewania się z materiałem obrabianym i wykazuje większą od węgla WC odporność na ścieranie w wysokiej temperaturze. Powoduje on

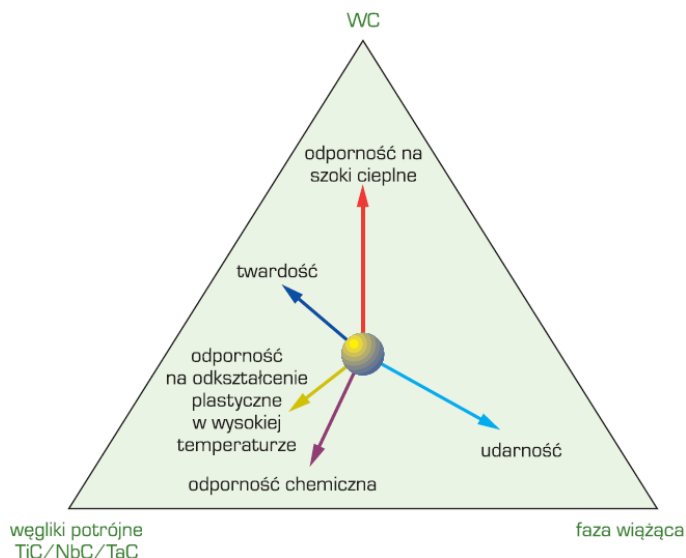


Rysunek 2.32. Zależności prędkości skrawania i odporności na ścieranie oraz wytrzymałości na zginanie i ciągliwości od twardości węglików grupy zastosowania P wg PN-ISO (tabl. 2.4); $VB = 0,3 \text{ mm}$, $\varepsilon = 10 \text{ min}$, $a = 2 \text{ mm}$, $s = 0,46 \text{ mm}$, materiał obrabiany – stal 0,6% C [3]

jednak równocześnie zmniejszenie własności wytrzymałościowych, w tym głównie wytrzymałości na ściskanie, dlatego też węgliki spiekane zawierające w składzie chemicznym węgliki TiC stosowane są głównie do obróbki metali. Nowoczesne gatunki węglików spiekanych zawierają oprócz WC i TiC, także węgliki TaC oraz niewielki udział węgliku NbC. Dodatki węglików tantalum i niobu sprzyjają znacznemu zwiększeniu twardości i wytrzymałości na zginanie w wysokiej temperaturze skrawania, a ponadto zmniejszeniu skłonności do erozji w wyniku przywierania wióra. Wpływ składu chemicznego na własności węglików spiekanych przedstawiono schematycznie na rysunku 2.33.

Wśród licznych działań dotyczących poprawy własności węglików spiekanych, podjętych głównie w przedostatnim i ostatnim dziesięcioleciu XX wieku, należy wymienić [3]:

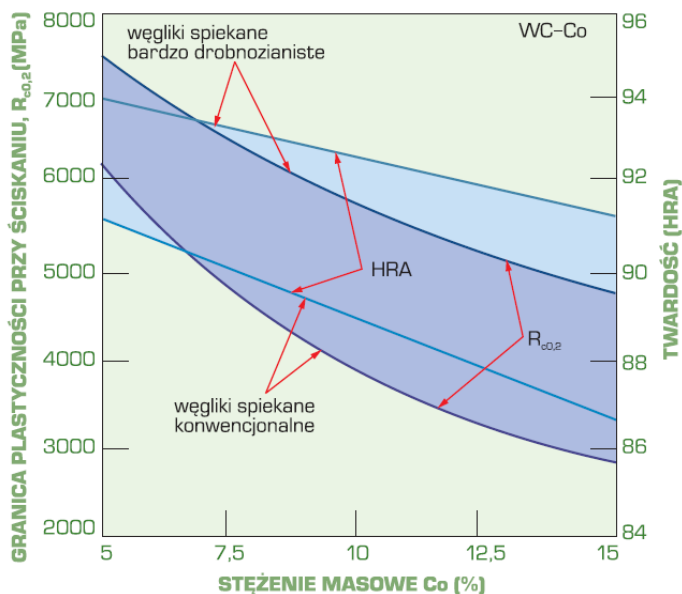
- doskonalenie procesu wytwarzania węglików spiekanych w celu zapewnienia powtarzalności własności produktów, głównie przez dodatkowe dogęszczanie podczas prasowania izostaticznego na gorąco w temperaturze 1350-1450°C pod ciśnieniem argonu 100-300 MPa,



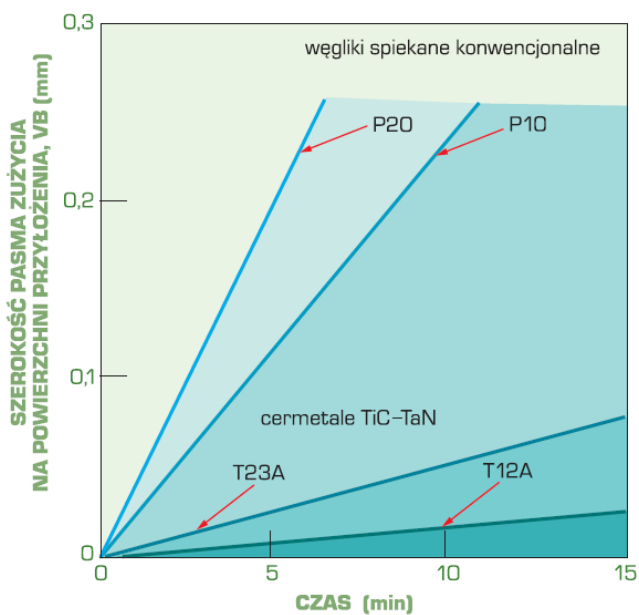
Rysunek 2.33. Schemat wpływu składu chemicznego na wybrane własności węglików spiekanych typu WC-Co (opracowano według pomysłu W. Grzesika) [3]

co wpływa decydująco na zwiększenie wytrzymałości na zginanie węglików spiekanych, a ich gęstość osiąga w przybliżeniu teoretyczną gęstość krystaliczną,

- stosowanie stopów układu Fe-Ni-Co oraz niklu i żelaza jako osnowy technicznych węglików w miejsce czystego kobaltu,
- opracowanie węglików spiekanych typu WC-Co, bardzo drobnoziarnistych o jednolitej wielkości ziarn stosowanych w przypadku, gdy występuje głównie zużycie ściernie narzędzi (rys. 2.34),
- wykorzystanie odkształcenia plastycznego ziarn fazy WC w węglkach spiekanych typu WC-Co podczas quasi-izostaticznego ściskania,
- stosowanie wyłącznie węglików TiC w miejsce węglików WC, co wpływa na znaczne zmniejszenie zużycia ostrza w porównaniu z węglakami konwencjonalnymi (rys. 2.35) lub stosowanie mieszaniny węglików WC, TaC i TiC, a także TiC, TaC i Mo_2C przy równoczesnej zamianie kobaltu w osnowie na nikiel i molibden lub mieszaninę tych pierwiastków z kobaltem,
- stosowanie azotków TaN i TiN częściowo w miejsce węglików TiC w węglkach spiekanych o osnowie Ni-Mo typu TaN-TiC-Ni-Mo i TiC- Mo_2C -TiN-TaN-Ni-Mo oraz o osnowie niklu typu TiC-TiN- Mo_2C -Ni,



Rysunek 2.34. Wpływ drobnociarności na własności spiekanych węglków WC-Co o różnym stężeniu kobaltu [3]



Rysunek 2.35. Porównanie własności konwencjonalnych węglków spiekanych oraz cermetali zawierających TiC-TaN zamiast węglków WC; materiał obrabiany: stal stopowa Cr-Mo, $p = 0,36 \text{ mm/obrót}$, $a = 1,5 \text{ mm}$, $V = 170 \text{ m/min}$ (według materiałów firmy Sumitomo Electric Industries Ltd., Itami, Hyogo, Japan) [3]

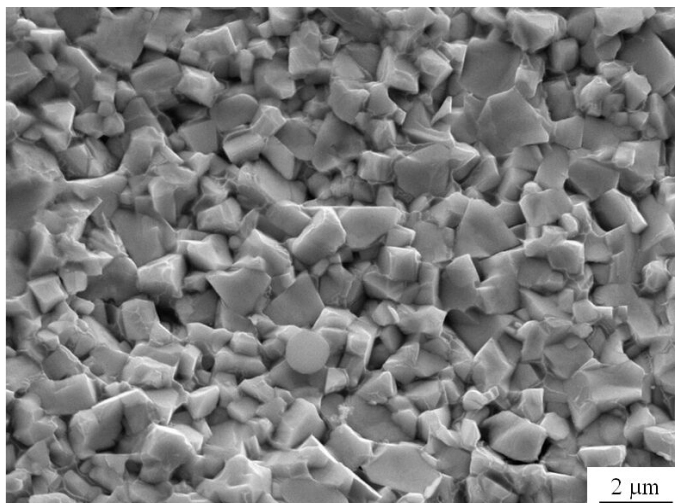
- dobór składów chemicznych i fazowych węglików spiekanych umożliwiających rozpuszczanie lub wydzielanie faz Lavesa i innych faz międzymetalicznych w osnowie węglików spiekanych podczas chłodzenia z temperatury spiekania lub podczas ewentualnej obróbki cieplnej.

Węgliki spiekane znalazły zastosowanie głównie na nakładki narzędzi używanych do obróbki wiórowej, a także na ostrza świdrów i narzędzi górniczych, narzędzia do obróbki plastycznej i inne narzędzia lub elementy o dużej twardości i odporności na ścieranie. Twarde materiały skrawające (do których należą i węgliki spiekane) pod względem zastosowania podzielono według PN-ISO 513:1999 na trzy główne grupy (tabl. 2.4).

Tablica 2.4. Klasyfikacja twardych materiałów skrawających pod względem zastosowania [3]

Grupa zastosowania			Zmiana parametru	
Oznaczenie	Materiał obrabiany	Zastosowanie i warunki pracy ¹⁾	skrawania	twardego materiału skrawającego
Główna grupa obróbki wiórowej P – do obróbki stopów żelaza dających długi wiór				
P01	stal, staliwo	toczenie i wytaczanie wykończające, duża prędkość skrawania, mały przekrój wióra, dokładne wymiary i powierzchnia, brak drgań podczas obróbki	↑ wzrost prędkości ↓ wzrost posuwu	↑ wzrost odporności na zużycie cieple ↓ wzrost odporności na obciążenia dynamiczne
P10	stal, staliwo	toczenie, kopiowanie, gwintowanie i frezowanie, duża prędkość skrawania, mały i średni przekrój wióra		
P20	stal, staliwo, żeliwo ciągliwe (wiór wstęgowy)	toczenie, kopiowanie, frezowanie, średnia prędkość skrawania i przekrój wióra, toczenie czołowe z małym przekrojem wióra		
P30	stal, staliwo	toczenie, frezowanie, toczenie czołowe, średnia i mała prędkość skrawania, średni lub duży przekrój wióra, niekorzystne warunki pracy ²⁾		
P40	stal, staliwo z zapiaszczeniem i pęcherzami	toczenie, toczenie czołowe, dłutowanie, duża prędkość skrawania, duży przekrój wióra, niekorzystne warunki pracy ²⁾ na obrabiarkach automatycznych		
P50	stal, staliwo o średniej lub małej wytrzymałości z zapiaszczeniem i pęcherzami	obróbka wymagająca materiału skrawającego o bardzo dużej wytrzymałości na obciążenia dynamiczne: toczenie, toczenie czołowe, dłutowanie, mała prędkość skrawania, duży przekrój wióra, obróbka w niekorzystnych warunkach ²⁾ i na obrabiarkach automatycznych		

Grupa zastosowania			Zmiana parametru	
Oznaczenie	Materiał obrabiany	Zastosowanie i warunki pracy ¹⁾	skrawania	twardego materiału skrawającego
Główna grupa obróbki wiórowej M – do obróbki stopów żelaza dających wiór długi lub krótki oraz metali nieżelaznych				
M10	stal, staliwo, stal manganowa, żeliwo szare, żeliwo stopowe	toczenie, średnia lub duża prędkość skrawania, mały lub średni przekrój wióra	wzrost prędkości ↑ ← wzrost posuwu	wzrost odporności na zużycie cierne ↑ ← wzrost odporności na obciążenia dynamiczne
M20	stal, staliwo, stal austenityczna lub manganowa, żeliwo szare	toczenie, frezowanie, średnia prędkość skrawania i przekrój wióra		
M30	stal, staliwo, stal austenityczna, żeliwo szare, stopy żaroodporne	toczenie, frezowanie, toczenie czołowe, średnia prędkość skrawania, średni lub duży przekrój wióra		
M40	stal automatowa, stal o niskiej wytrzymałości, metale nieżelazne i stopy lekkie	toczenie, odcinanie, np. na obrabiarkach automatycznych		
Główna grupa obróbki wiórowej K – do obróbki stopów żelaza dających wiór krótki, metali nieżelaznych oraz materiałów niemetalowych				
K01	bardzo twarde żeliwo szare, wysokokrzemowe stopy Al, stal utwardzona, tworzywa sztuczne ścierne, twardy karton, materiały ceramiczne	toczenie, toczenie wykończające, wytaczanie, frezowanie, skrobanie	wzrost prędkości ↑ ← wzrost posuwu	wzrost odporności na zużycie cierne ↑ wzrost odporności na obciążenia dynamiczne
K10	żeliwo szare >220 HBW, żeliwo ciągliwe (wiór odpryskowy), stal utwardzona, stopy Si-Al, stopy Cu, tworzywa polimerowe, szkło, twarda guma, twardy karton, porcelana, kamień	toczenie, frezowanie, wiercenie, wytaczanie, przeciąganie, skrobanie		
K20	żeliwo szare ≤220 HBW, metale nieżelazne: miedź, stop Cu-Zn, aluminium	toczenie, frezowanie, toczenie czołowe, wytaczanie, przeciąganie, wymagające materiału skrawającego o bardzo dużej wytrzymałości na obciążenia dynamiczne		
K30	żeliwo szare o niskiej twardości, stal o małej wytrzymałości, drewno prasowane	toczenie, frezowanie, toczenie czołowe, dłutowanie, obróbka w niekorzystnych warunkach ²⁾		
K40	miękkie lub twarde drewno, metale nieżelazne	toczenie, frezowanie, toczenie czołowe, dłutowanie, obróbka w niekorzystnych warunkach ²⁾		
¹⁾ Grupa zastosowania nie jest oznaczeniem gatunku twardego materiału skrawającego, dlatego liter P, M, K nie można stosować w handlowych oznaczeniach gatunków. Jeśli występuje rzeczywista potrzeba wyróżnienia pośredniej grupy zastosowania, można ją oznaczyć pośrednią liczbą, np. M15. Jedynie grupę P01 można wyjątkowo dzielić stosując oznaczenia dziesiętne, np. P01.1, P01.2, jeżeli konieczne jest wyróżnienie odrębnych stopni odporności na zużycie cierne i wytrzymałości na kruche pęknięcie materiałów tej grupy. ²⁾ Materiał obrabiany w stanie surowym, półprodukt o kształcie trudnym do obróbki, z naskórkiem odlewniczym lub kuźniczym, o zmiennej twardości i/lub zmiennej głębokości skrawania, możliwość drgań podczas obróbki.				

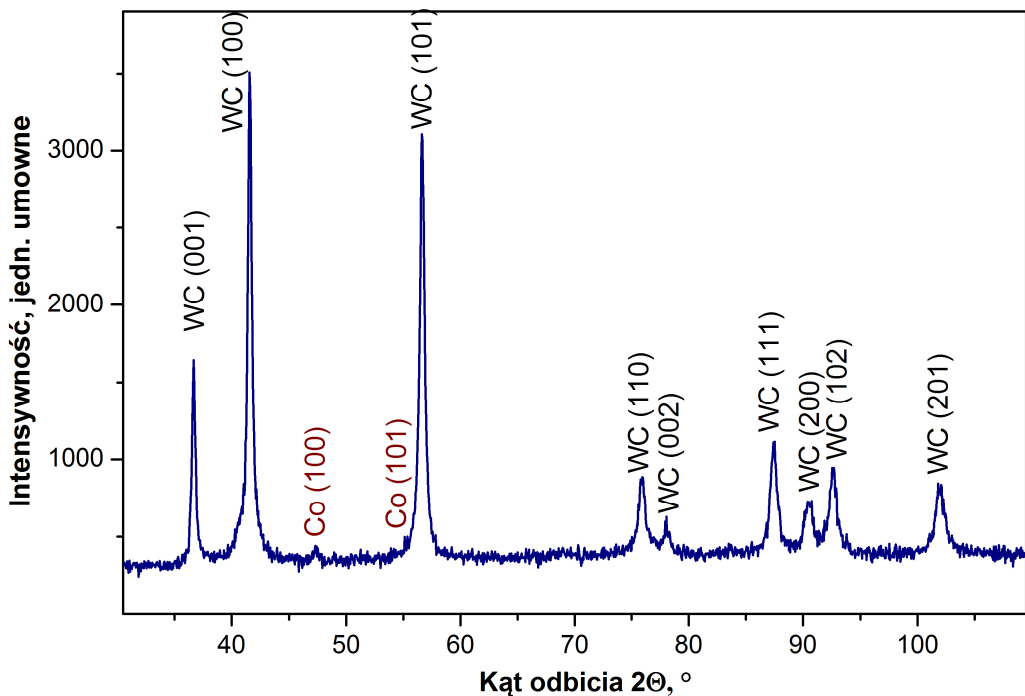


Rysunek 2.36. Powierzchnia przelomu węglików spiekanych [87]

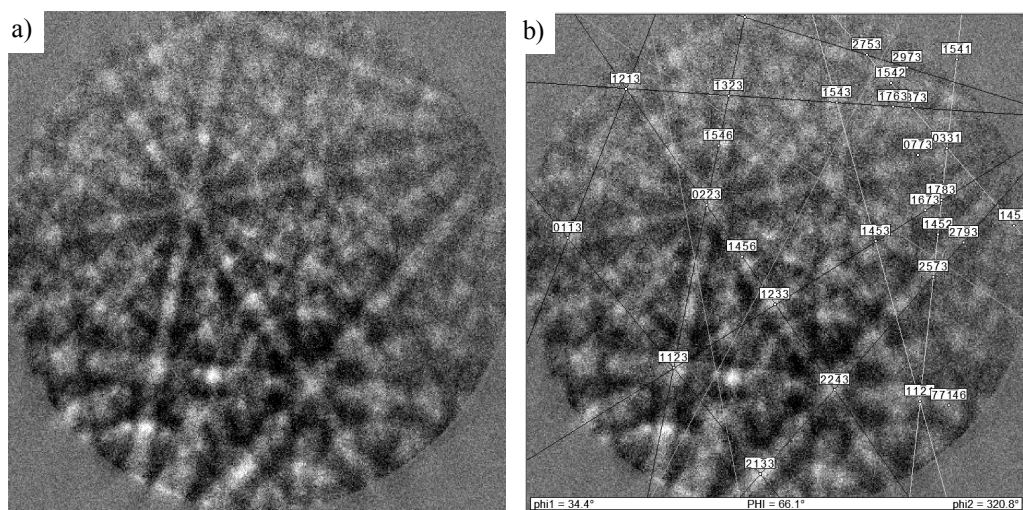
Oznaczenie grupy węglików spiekanych z przeważającym udziałem WC, przeznaczonych do obróbki skrawaniem, składa się z liter HW i oznaczenia grupy zastosowania, np. HW-P20, lub tylko z symbolu grupy zastosowania, np. P40. Niepokrywane spieki zawierające głównie TiC i/lub TiN są oznaczane literami HT i symbolem odpowiedniej grupy zastosowania, np. HT-K01.

Na podstawie badań materiałograficznych wykonanych w skaningowym mikroskopie elektronowym można stwierdzić, że komercyjne węgliki spiekane charakteryzują się dobrze zagęszczoną, zwartą strukturą bez porów (rys. 2.36). Na rysunku 2.37 przedstawiono dyfraktogram rentgenowski z węglików spiekanych typu WC-Co, zawierający refleksy od faz WC oraz słabe refleksy od α -Co. Rysunek 2.38a przedstawia obraz dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (j. ang. *Electron BackScatter Diffraction* – EBSD) z węglika wolframu WC. Położenie linii Kikuchiego jest zależne od orientacji krystalograficznej oraz od danego systemu symetrii. Rozwiązanie dyfrakcji wykonano za pomocą dedykowanego programu komputerowego (rys. 2.38b). Na mapie topografii orientacji (rys. 2.39) przedstawiono orientację krystalograficzną poszczególnych ziarn węglików spiekanych WC przypisując określonym orientacjom poszczególne kolory, które oznaczają kierunek normalny do płaszczyzny powierzchni w każdym ziarnie WC.

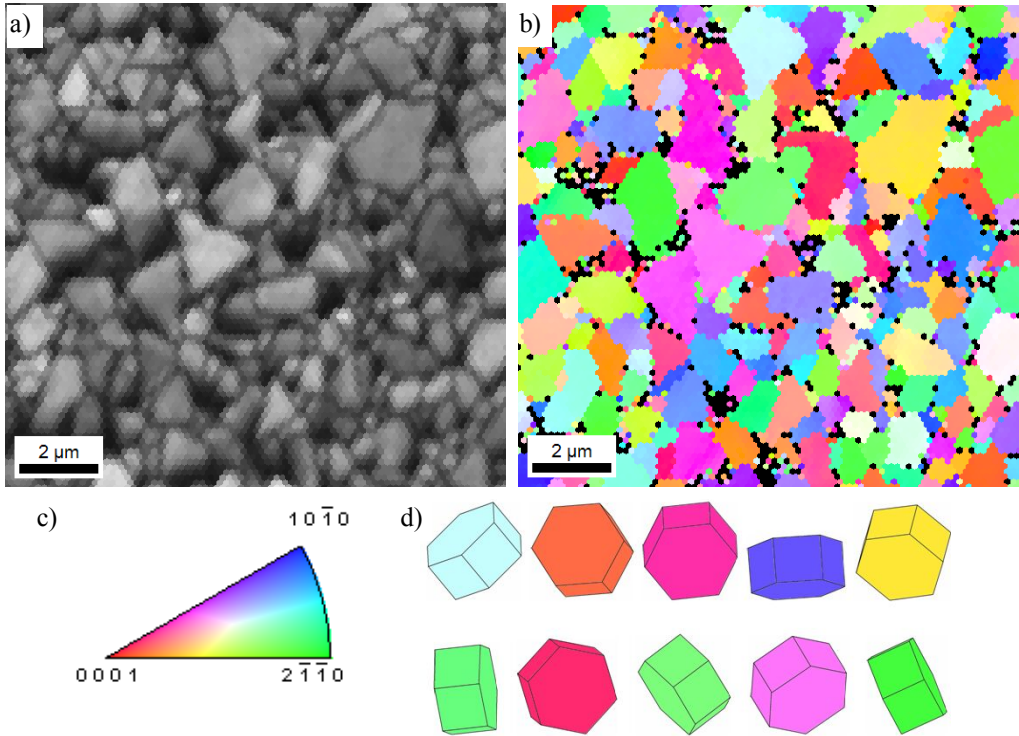
Z pomiaru wielkości ziarn węglików spiekanych (rys. 2.40) wynika, że znaczna część ziarn wykazuje średnicę mniejszą niż $1,5 \mu\text{m}$ co pozwala zakwalifikować badane węgliki spiekane do węglików drobnoziarnistych [87].



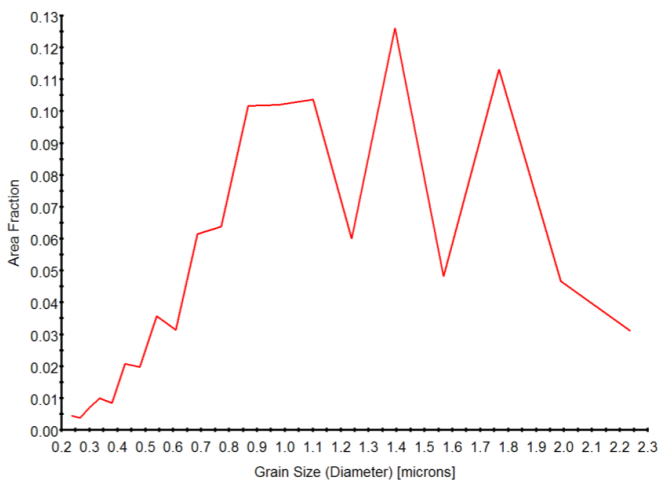
Rysunek 2.37. Dyfraktogram rentgenowski węglika spiekanego WC+Co [87]



Rysunek 2.38. Obraz dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych otrzymany z węglików spiekanych typu WC-Co: a) linie Kikuchiego, b) rozwiązanie dyfraktogramu [87]



Rysunek 2.39. Wyniki analizy węglików spiekanych WC-Co wykonanej metodą dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD), a) mapa rozkładu jakości dyfrakcji, b) mapa orientacji krystalograficznej ziarn WC; c) odwrotna figura biegunowa, d) schemat ilustrujący odcienie szarości przypisane ziarnom o różnej orientacji krystalograficznej [87]



Rysunek 2.40. Wielkość ziarn węglików spiekanych typu WC-Co, określona z wykorzystaniem metody EBSD [87]

2.5. Charakterystyka ceramiki azotkowej

Węgliki spiekane coraz częściej są zastępowane przez spiekany azotek krzemu Si_3N_4 o barwie szarej. Nowoczesna ceramika narzędziowa w tym azotkowa, ale także powstała na jej bazie ceramika sialonowa stanowi obecnie najbardziej obiecującą grupę materiałów narzędziowych, o największej dynamice rozwoju, stawiając przed współczesną nauką istotne problemy w zakresie poprawy jej własności mechanicznych i odporności na zużycie. Azotek krzemu Si_3N_4 zalicza się do nowoczesnych materiałów ceramicznych i przewiduje się, że zakres jego zastosowań będzie się systematycznie rozszerzać, ze względu na unikatowe własności cieplne i mechaniczne. Azotek krzemu krystalizuje w układzie heksagonalnym. Si_3N_4 należy do ceramiki kowalencyjnej, w której sąsiadujące atomy wiążą się w wyniku wymiany elektronów, tworząc ściśle określoną liczbę ukierunkowanych wiązań. W strukturach tych energia minimalizowana jest nie przez zwiększenie gęstości upakowania, lecz dzięki tworzeniu łańcuchów, płaszczyzn lub sieci przestrzennych. Często struktury te są amorficzne. Wiązania atomowe cechują się bardzo dużą siłą przyciągania. Ceramiki te mają więc wysoką temperaturę topnienia i bardzo dobrą wytrzymałość mechaniczną. Bardzo twarde ceramiki, takie jak Si_3N_4 , mają strukturę bardzo zbliżoną do diamentu [16, 57-59].

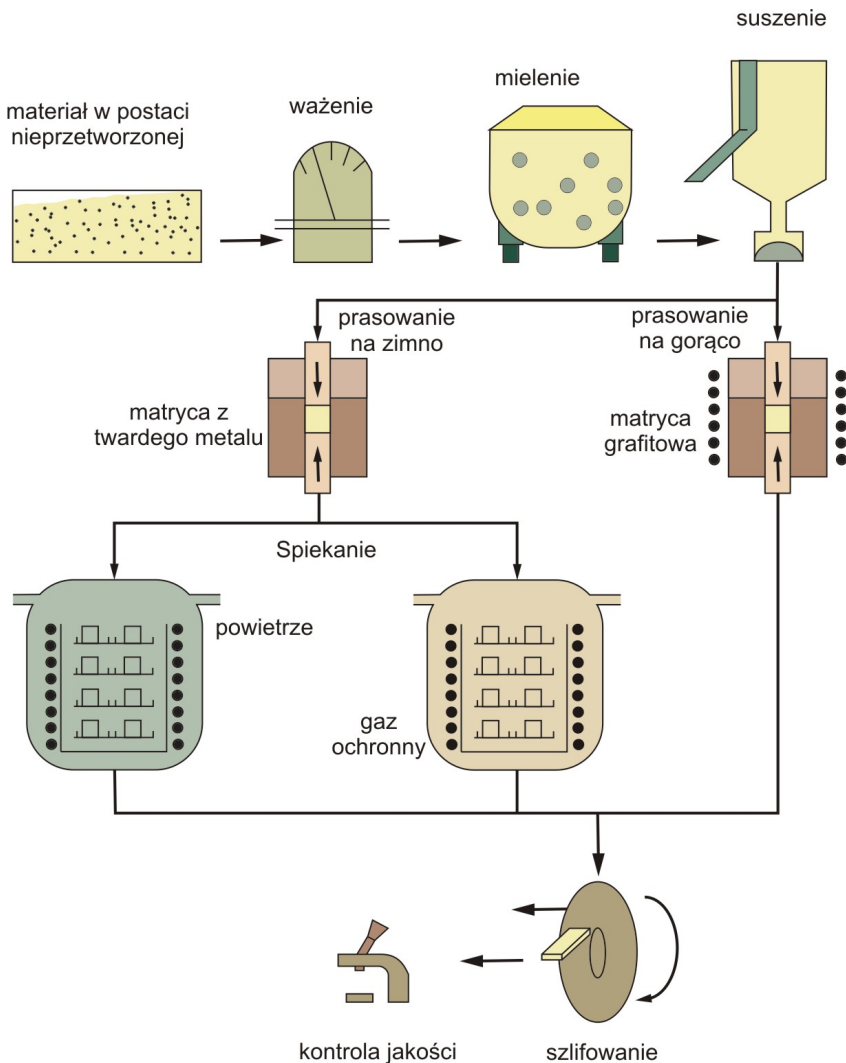
Ceramika azotkowa, dzięki swym wysokim własnościom termomechanicznym, takim jak odporność na oddziaływanie wysokiej temperatury, niski współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz wysoka odporność na gwałtowne zmiany temperatury oraz zmiany środowiska chemicznego, jest uznawana za jeden z najbardziej obiecujących materiałów stosowanych w procesach wysokotemperaturowych. Wykazuje dużą odporność na działanie kwasów i substancji redukujących. Narzędzia z azotku krzemu mogą pracować w temperaturze do ok. 1400°C , zachowując swoje własności mechaniczne. Jednocześnie są odporne na korozję i ścieranie, znoszą bardzo dobrze szoki termiczne.

Azotek krzemu Si_3N_4 uzyskuje się przez roztapianie kwarcu w łuku elektrycznym w atmosferze azotu. Otrzymany w ten sposób produkt poddaje się stabilizacji, polegającej na wygrzewaniu przez 1,5 h w atmosferze argonu w temperaturze $2000\text{-}2100^\circ\text{C}$, w celu ujednorodnienia składu chemicznego. W ostatnich latach opracowano technologię bezpośredniego azotowania krzemu metodą reakcyjnego spiekania [16, 60, 61]. Sproszkowany azotek krzemu jest następnie wykorzystywany do wytwarzania elementów konstrukcyjnych i narzędzi różnymi metodami prasowania i spiekania.

Od wielu lat Si_3N_4 jako materiał o wysokiej wytrzymałości, jest wytwarzany trzema podstawowymi sposobami przez:

- reakcyjne spiekanie (j. ang. *Reaction Bonded Silicon Nitride* – RBSN),
- prasowanie na gorąco (j. ang. *Hot Pressed Silicon Nitride* – HPSN) oraz
- spiekanie (j. ang. *Sintered Silicon Nitrides* – SSN).

Znalazł on szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, m.in. na kulki i wałeczki do łożysk tocznych, materiały narzędziowe, elementy silników napędowych – zawory, wirniki



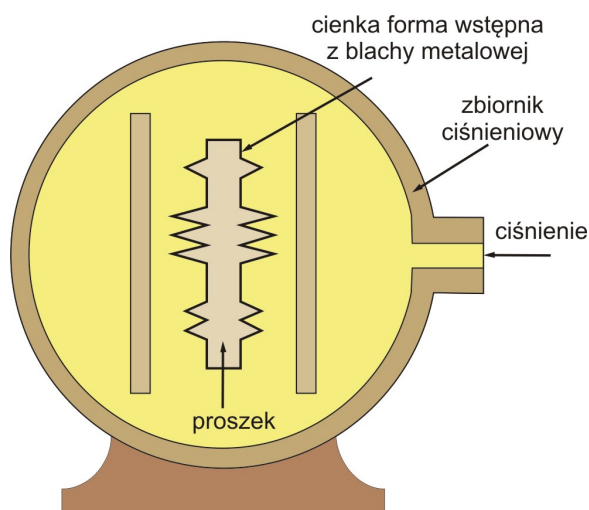
Rysunek 2.41. Schemat procesu wytwarzania ceramiki narzędziowej [15]

turbosprężarek, elementy maszyn ściernych – popychacze, podkładki, elementy turbin – wirniki, elementy matryc – na tłoczniki i rolki oraz przyrządy spawalnicze [58, 62, 67].

Narzędziowa ceramika azotkowa jest wytwarzana za pomocą metalurgii proszków, a w procesie wytwarzania nie zachodzi konieczność roztopienia głównego składnika (rys. 2.41). Proces ten można podzielić na pięć głównych etapów [1, 15]:

- wytworzenie proszku,
- przygotowanie proszku,
- formowanie kształtek,
- spiekanie,
- obróbka wykończająca.

Podczas nagrzewania do temperatury powyżej 750°C Si_3N_4 ulega częściowej dysocjacji, a w temperaturze 2170°C sublimacji. Dlatego proces spiekania azotka krzemu w temperaturze 1800-1900°C prowadzi się w kapsułach szklanych lub metalowych w atmosferze azotu. Spiekana narzędziową ceramikę Si_3N_4 uzyskuje się poprzez prasowanie jednoosiowe lub metodą spiekania HIP oraz spiekanie reakcyjne. Metoda spiekania HIP (j. ang. *Hot Isostatic Pressing*) polega na umieszczeniu sproszkowanej masy Si_3N_4 w kapsule próżniowej i poddaniu izostaticznemu prasowaniu na gorąco (rys. 2.42). Następuje więc jednoczesne formowanie, spiekanie i dogęszczanie. Metoda ta zapewnia narzędziom większą wytrzymałość na zginanie i gęstość teoretyczną spieku [60, 61, 68].



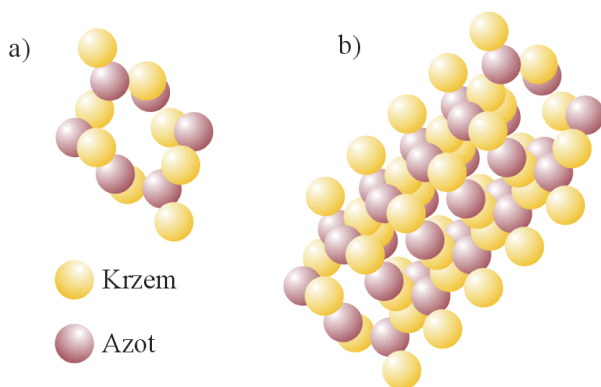
Rysunek 2.42. Schemat wysokotemperaturowego prasowania izostaticznego [16]

Jednakże fakt, iż Si_3N_4 jest materiałem o wiązaniu kowalencyjnym, utrudnia przeprowadzenie procesu spiekania z fazą stałą, którego celem jest zwiększenie gęstości. W większości przypadków stosowany jest proces spiekania z fazą ciekłą, w którym następuje transport masy Si_3N_4 , celem uzyskania spieku w stanie stałym. W procesie tym dochodzi jednak do pogorszenia własności mechanicznych związanych z odpornością na wysoką temperaturę, ponieważ zależą one od charakterystyki faz na granicach ziarn, takich jak: skład, udział oraz rodzaj tych faz. W celu uzyskania Si_3N_4 charakteryzującego się bardzo dobrymi własnościami związanymi z jego zastosowaniem w wysokiej temperaturze, istotnym jest zminimalizowanie udziału fazy ciekłej lub też zastosowanie obróbki, w której nastąpiłaby jej krystalizacja [63-65].

Aby doprowadzić do zagęszczenia Si_3N_4 w wyniku mostkowania pęknięć a następnie ich odkształcenia, należy utworzyć duże, wydłużone ziarna tej fazy. Fakt ten jednak nie gwarantuje powodzenia tych procesów. Zmiany stanu skupienia na stały zachodzą tylko wtedy, gdy pęknięcia mają miejsce pomiędzy ziarnami Si_3N_4 a fazą tworzącą granice ziarn. W czasie pęknięcia na granicach ziarn powinien nastąpić rozpad wiązania na granicy ziarn. Siły kohezji między ziarnami powinny być kontrolowane przez modyfikowanie składu chemicznego faz na granicach ziarn. Przerwanie wiązań na styku między ziarnami osiągnięto przez zwiększanie stosunku itru do aluminium oraz poprzez zmniejszanie stężenia azotu w szklach Si-Al-O-N na granicach ziarn [64, 71]. Dlatego też, zarówno mikrostruktura jak i energia niezbędna dla niszczenia wiązań stycznych mają znaczący wpływ na zwiększenie odporności na kruche pęknięcie. Pod uwagę powinien być brany jeszcze jeden aspekt – własności wysokotemperaturowe. Obszary granic ziarn, które odpowiedzialne są za wysokie własności w niskiej temperaturze, nie muszą być odpowiednie dla zastosowania tej samej ceramiki w wysokiej temperaturze. Aby uzyskać warunki odpowiednie do zastosowania w wysokiej temperaturze, po spiekaniu spowodowano krystalizację fazy amorficznej na granicy ziarn w wyniku obróbki cieplnej. Jako pomoc w uzyskaniu zagęszczenia oraz wzrostu ziarn w wyniku przemiany „in situ” użyto tlenków pierwiastków ziem rzadkich, głównie itru. Podczas spiekania tlenki te wchodziły w reakcje z Si_3N_4 oraz SiO_2 , które obecne są na powierzchni Si_3N_4 tworząc eutektyczną ciekłą fazę, która pozwala na uzyskanie gęstości bliskiej gęstości teoretycznej oraz na przemianę $\text{Si}_3\text{N}_4 \alpha$ (1400°C) w β (1400-1800°C). Faza amorficzna występuje w postaci cienkiej powłoki na granicy ziarn, a fazy krystaliczne są często obecne na styku trzech ziarn. Spośród tlenków pierwiastków ziem rzadkich, najwięcej miejsca poświęcono badaniu oddziaływania Y_2O_3 [64]. Relacje zachodzące w poszczególnych fazach pomiędzy Si_3N_4 - SiO_2 -

(tlenek pierwiastków ziem rzadkich) – inny niż Y_2O_3 , nie są dobrze znane. Jednakże przypuszcza się na podstawie struktury elektronowej, iż są one podobne do tych, występujących w układzie $Si_3N_4-SiO_2-Y_2O_3$. Można się spodziewać, iż tlenek itru, który charakteryzuje się najwyższą temperaturą topnienia spośród tlenków pierwiastków ziem rzadkich, decyduje o odpowiednich własnościach typowych dla granic ziarn Si_3N_4 w podwyższonej temperaturze. Z kolei badania zawarte w pracach [64, 65] układu $Si_3N_4-Yb_2O_3$ dowiodły, iż proces zagęszczania oraz przemiany rozpoczął się w temperaturze 1600-1650°C, co ma związek z punktem eutektycznym w systemie $Yb_2O_3-SiO_2$. Zmiana mikrostruktury była związana ze względnym wzrostem szybkości przemiany $\alpha \rightarrow \beta$ oraz wzrostem wielkości ziarn $\beta-Si_3N_4$ w początkowej fazie spiekania. Stwierdzono również, że dodanie w dużym udziale Yb_2O_3 może przyspieszyć szybkość przemiany $\alpha \rightarrow \beta$ oraz wzrost ziarn, ponieważ te dwa aspekty zależne są od lepkości fazy ciekłej oraz rozpuszczalności fazy α w fazie ciekłej granic ziarn [63, 64].

Czysty Si_3N_4 wykazuje dużą wytrzymałość, twardość i odporność na utlenianie. Po dodaniu w czasie spiekania niezbędnych zagęszczaczy: MgO , Y_2O_3 , Al_2O_3 , HfO_2 lub TiC – te bardzo dobre własności ulegają pogorszeniu. W trakcie pracy w temperaturze 1000-1200°C azotek krzemu jest podatny na oddziaływanie chemiczne materiału obrabianego i na utlenianie. Dalszą poprawę własności ceramiki azotkowej uzyskuje się dzięki wprowadzeniu dodatków w postaci tlenku cyrkonu (ZrO_2), azotka tytanu (TiN) lub wiskerów SiC [17]. Następuje wówczas wzrost twardości, plastyczności i odporności na zużycie. Narzędziowa ceramika azotkowa po spiekaniu wykazuje strukturę krystaliczną β (rys. 2.43) [61, 66]. Azotek Si_3N_4 może być



Rysunek 2.43. Struktura krystaliczna $\beta-Si_3N_4$: a) pojedyncza komórka elementarna, b) sześć komórek elementarnych [86]

stosowany z dodatkiem Y_2O_3 lub w osnowie zawierającej 92% Si_3N_4 , 6% Y_2O_3 i 2% Al_2O_3 mogą być rozmieszczone w 30% dyspersyjne cząstki TiC.

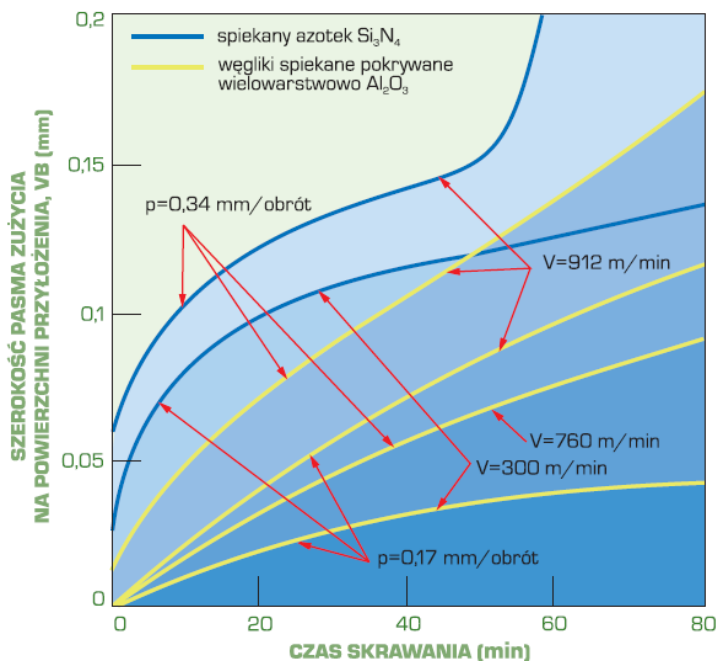
Zastosowanie narzędziowych materiałów ceramicznych na bazie Si_3N_4 przynosi wiele korzyści. Pierwszą jest możliwość stosowania dużych prędkości skrawania [67, 70], a co za tym idzie również wysokiej temperatury nawet do $1500^\circ C$ (nie obniża się twardość narzędzia), jest to spowodowane wysoką odpornością na zużycie. Kolejną korzyścią jest wyeliminowanie cieczy obróbkowych, gdyż ceramika ta ma bardzo małą przewodność cieplną. Właściwie stosowane narzędzia ceramiczne redukują udział braków [68].

W porównaniu z ceramiką białą, na bazie tlenku glinu, ceramika azotkowa wykazuje nieco mniejszą twardość, dużą wytrzymałość na zginanie (równą ceramice umocnionej), cechuje się wyższym krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń.

Ceramika azotkowa powstała z zamiarem połączenia w jednym tworzywie twardości i ciągliwości spieków węglkowych i wymaganej odporności na utlenianie w wysokiej temperaturze. Zastosowanie ceramiki azotkowej pozwala na skrawanie z dużymi posuwami oraz znacznymi prędkościami. Ceramika ta należy do materiałów, które mogą być zastosowane w narzędziach konwencjonalnych mocowanych w obrabiarkach nie wymagających specjalnego usztywnienia. Może być ona stosowana do obróbki zgrubnej stopów niklu i do obróbki zgrubnej i wykończającej żeliw szarych. Do stopów zawierających Fe ceramika azotkowa jest stosowana rzadziej z uwagi na zużycie chemiczne w wysokiej temperaturze [17, 59, 67].

Spiekany azotek krzemu stosowany do toczenia i frezowania żeliwa szarego, sferoidalnego i stopowego, stopów na osnowie niklu w silnie przerywanych procesach technologicznych, umożliwia zarówno przy toczeniu, jak i frezowaniu bardzo znaczne skrócenie głównego czasu skrawania przy prędkościach większych od 1000 m/min, niemożliwych do uzyskania przy obróbce płytkami z węglków spiekanych lub materiałów tlenkowych czy tlenkowo-węglkowych. Trwałość spiekane azotku krzemu, ewentualnie z dodatkiem tlenku itru, a także węglika tytanu, jest większa od innych materiałów ceramicznych (rys. 2.44). Ważnymi cechami azotku krzemu są duża wartość współczynnika przewodzenia ciepła ($30 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) i bardzo mała rozszerzalność cieplna ($3\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [66]. Umożliwia to podczas skrawania chłodzenie cieczą narzędzi z tego tworzywa, co jest niemożliwe przy zastosowaniu węglków spiekanych lub tlenkowych materiałów ceramicznych.

Ceramika azotkowa Si_3N_4 wykazuje w różnych zastosowaniach bardzo dobre własności w szerokim zakresie temperatury. Zaletą jej jest bardzo duża wytrzymałość, duża twardość



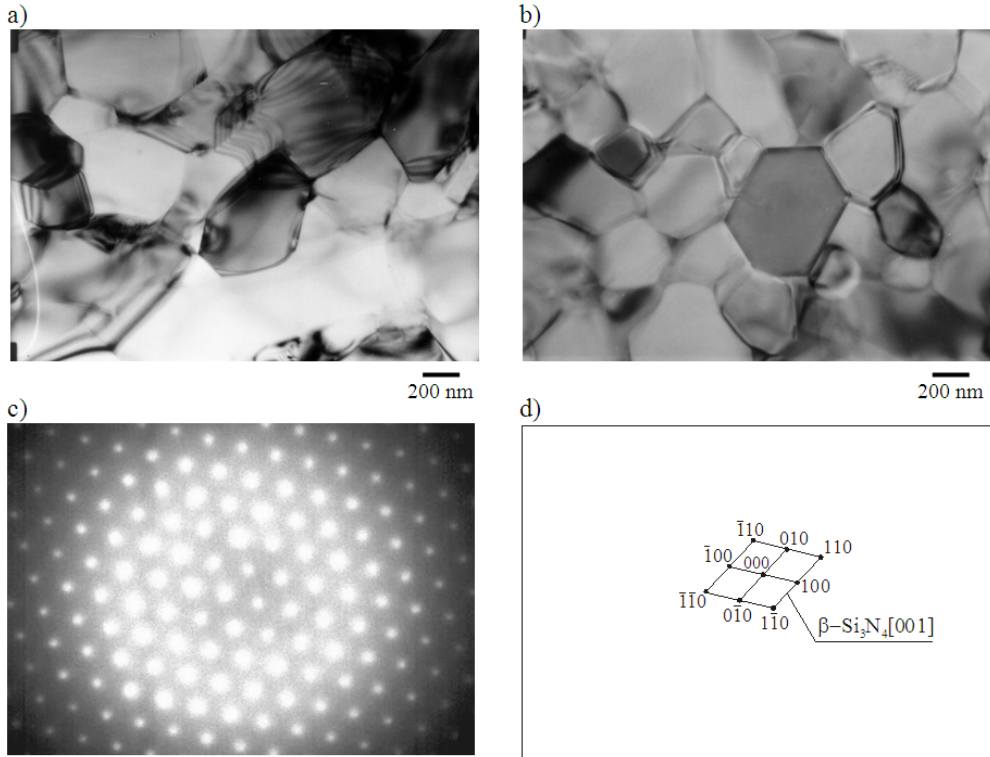
Rysunek 2.44. Porównanie własności skrawanych płytek z Si_3N_4 i węglików spiekanych pokrywanych wielowarstwowo Al_2O_3 [3]

i odporność na utlenianie, dobra przewodność cieplna i odporność na szoki termiczne. Oprócz tych niewątpliwych zalet, ceramika ta jednak obarczona jest pewnymi wadami. Niekorzystną cechą ceramiki na bazie azotku krzemu jest jej skłonność do zużycia chemicznego w wysokiej temperaturze, zwłaszcza podczas skrawania stali tworzącej wiór wstęgowy. Wówczas powstający w temperaturze ok. 1200°C krzemek żelaza prowadzi do bardziej wzmożonego zużycia chemicznego i w końcu do szybkiego stępienia ostrza przy skrawaniu stali [17].

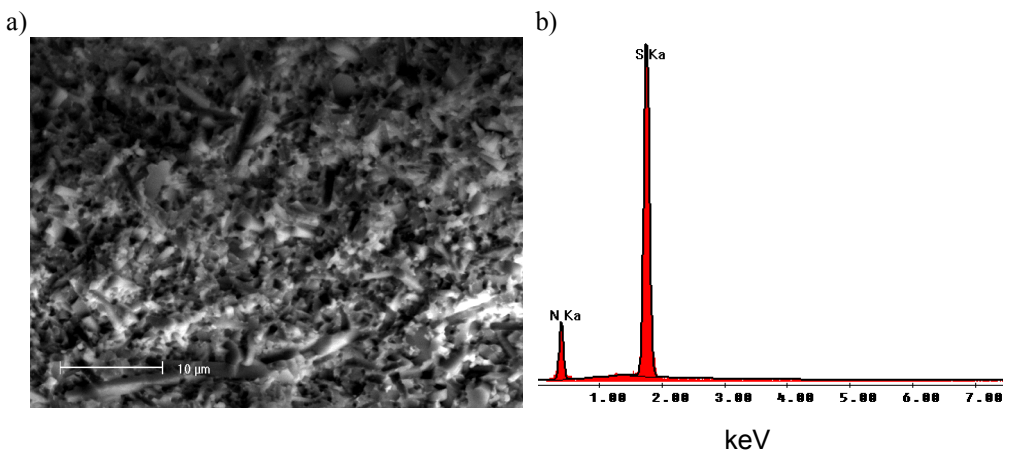
Oznaczenie grupy zastosowania materiałów ceramicznych zawierających głównie azotek krzemu rozpoczyna się od liter CN, np. CN-K10.

Na podstawie badań cienkich folii w transmisyjnym mikroskopie elektronowym stwierdzono, że strukturę narzędziowej ceramiki azotkowej Si_3N_4 stanowi faza $\beta-Si_3N_4$ (rys. 2.45). Stwierdzono ponadto, że wielkość znacznej części cząstek fazy $\beta-Si_3N_4$ jest mniejsza od 500 nm, co jednoznacznie klasyfikuje badaną ceramikę do grupy materiałów drobnziarnistych [86].

Badania metalograficzne wykonane w skaningowym mikroskopie elektronowym pozwalają stwierdzić, że narzędziowa ceramika azotkowa charakteryzują się dobrze zagęszczoną, zwartą



Rysunek 2.45. Struktura narzędziowej ceramiki azotkowej Si_3N_4 ; cienka folia równoległa do powierzchni warstwy (TEM), a) obraz w polu jasnym, b) dyfrakcja z obszaru jak na rysunku a, c) rozwiązanie dyfraktogramu z rysunku b [86, 96]



Rysunek 2.46. a) Powierzchnia przełomu narzędziowej ceramiki azotkowej, b) wykres energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego z ceramiki azotkowej [86]

strukturą bez porów (rys. 2.46). Analiza składu chemicznego powierzchni przelomu ceramiki azotkowej metodą spektrometrii energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego EDS (rys. 2.46, tabl. 2.5) potwierdza istnienie cząstek Si_3N_4 . Metodą tą nie stwierdzono istnienia fazy szklistej na granicy ziarn, która powstaje w wyniku oddziaływania dodatków MgO i Y_2O_3 z warstwą tlenków SiO_2 pokrywających cząstki Si_3N_4 . Faza szklista powstająca w procesie wytwarzania ułatwia spiekanie i przyczynia się do powstania dobrze zagęszczonej struktury badanych spieków z ceramiki azotkowej.

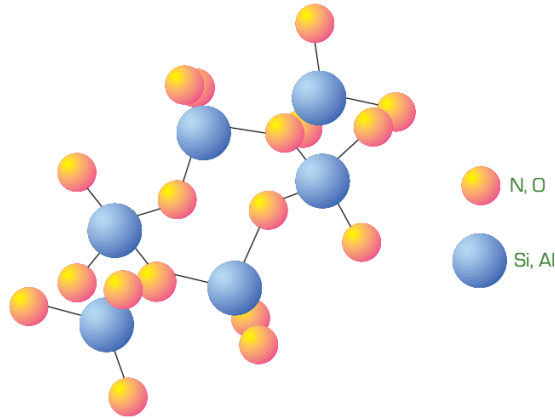
Tablica 2.5. Wyniki ilościowej analizy składu chemicznego ceramiki azotkowej Si_3N_4 [86]

Pierwiastek	Stężenie masowe pierwiastka [%]	Stężenie atomowe pierwiastka [%]
N	60	57,04
Si	40	42,96
Suma	100,00	100,00

2.6. Charakterystyka ceramiki sialonowej

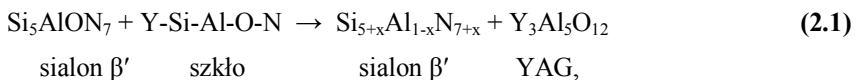
W końcu XX wieku opracowano i wprowadzono do produkcji oraz do eksploatacji w warunkach przemysłowych sialon jako nowy rodzaj spiekanych materiałów skrawających, łączący w sobie zalety tworzyw tlenkowych i beztlenkowych zawierających Si_3N_4 . Nazwa tego materiału pochodzi od pierwszych liter pierwiastków wchodzących w jego skład (j. ang.: *silicon, aluminium, oxy-nitride*). Sialon o składzie chemicznym określonym wzorem $\text{Si}_{6-z}\text{O}_z\text{N}_{8-z}$ jest izomorficzny z azotkiem krzemu Si_3N_4 (rys. 2.47). Liczba $z = 0-4,5$ odpowiada liczbie atomów Al zastępujących Si w sieci azotku β . Ze względu na izomorficzność własności mechaniczne i fizyczne sialonu β' są zbliżone do odpowiednich własności Si_3N_4 . Własności chemiczne tej fazy odpowiadają z kolei tlenkowi aluminium Al_2O_3 . Ceramika sialonowa łączy w sobie wysokie własności fizyczne i mechaniczne dziedziczone z ceramiki Si_3N_4 oraz odporność na oddziaływanie chemiczne w wysokiej temperaturze charakterystyczną dla Al_2O_3 . W sialonie β' zachowującym strukturę heksagonalną $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ rozpuszcza się do 60% Al_2O_3 .

Sialony najczęściej wytwarza się metodą jednostopniowego spiekania reakcyjnego zaformowanej mieszaniny azotku krzemu z dodatkiem tlenku i azotku glinu oraz dodatku spiekającego, najczęściej Y_2O_3 , który podczas spiekania stanowi źródło fazy ciekłej. Metoda wymaga stosowania jako materiału wyjściowego bardzo czystego oraz drobnoziarnistego azotku



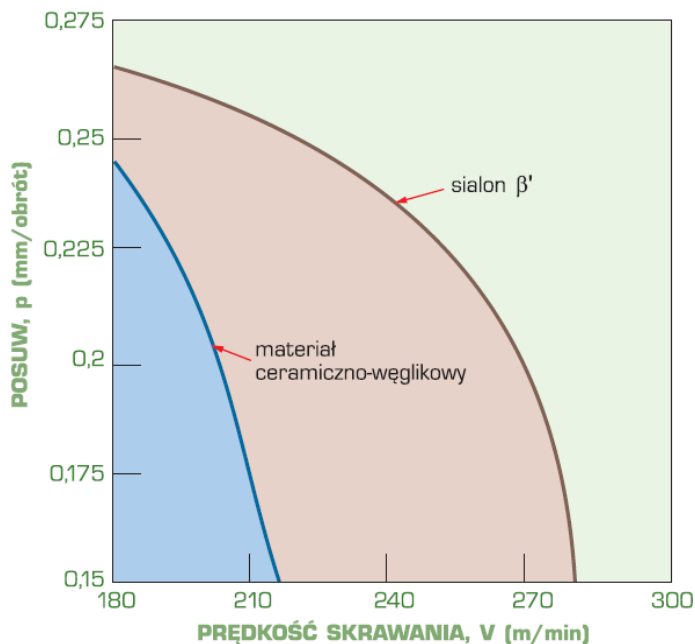
Rysunek 2.47. Rozkład atomów Si, Al, N i O w sieci krystalograficznej sialonu β (według K.H. Jacka)

krzemu. Oprócz tego wymagana jest bardzo precyzyjna kontrola składu chemicznego w trakcie procesu ponieważ nawet niewielki nadmiar tlenu powoduje wzrost udziału fazy ciekłej w trakcie spiekania [1, 72-74]. Ze względów technologicznych korzystne jest wprowadzenie do spieku sialonu β' dodatków innych tlenków, np. Y_2O_3 , gdyż powoduje to zmniejszenie prężności par i decyduje o obniżeniu temperatury topnienia sialonu β' . Umożliwia to spiekanie pod ciśnieniem, a nie na gorąco. W takim przypadku niższa temperatura spiekania umożliwia zachowanie struktury drobnoziarnistej, a przez to podwyższenie własności wytrzymałościowych spieku. Wpływa jednak równocześnie na zmniejszenie odporności na utlenianie i sprzyja przyspieszonemu rozpadowi roztworu w wysokiej temperaturze. Z cieczy powstałej w przestrzeniach międzycząsteczkowych podczas zagęszczania sialonu β' z dodatkiem Y_2O_3 w wysokiej temperaturze w czasie chłodzenia powstaje szkło. Powtórna obróbka cieplna takiego spieku w temperaturze $1400^\circ C$ powoduje przebieg reakcji z osnową sialonu β' :



w wyniku której na granicach ziarn powstaje związek $Y_3Al_5O_{12}$ nazywany granatem itrowoaluminiumowym, w skrócie oznaczonym YAG (j. ang.: *Yttrium-Aluminium-Garnet*). Występowanie tego związku bardzo efektywnie polepsza odporność sialonu β' na utlenianie i odporność na pęczanie.

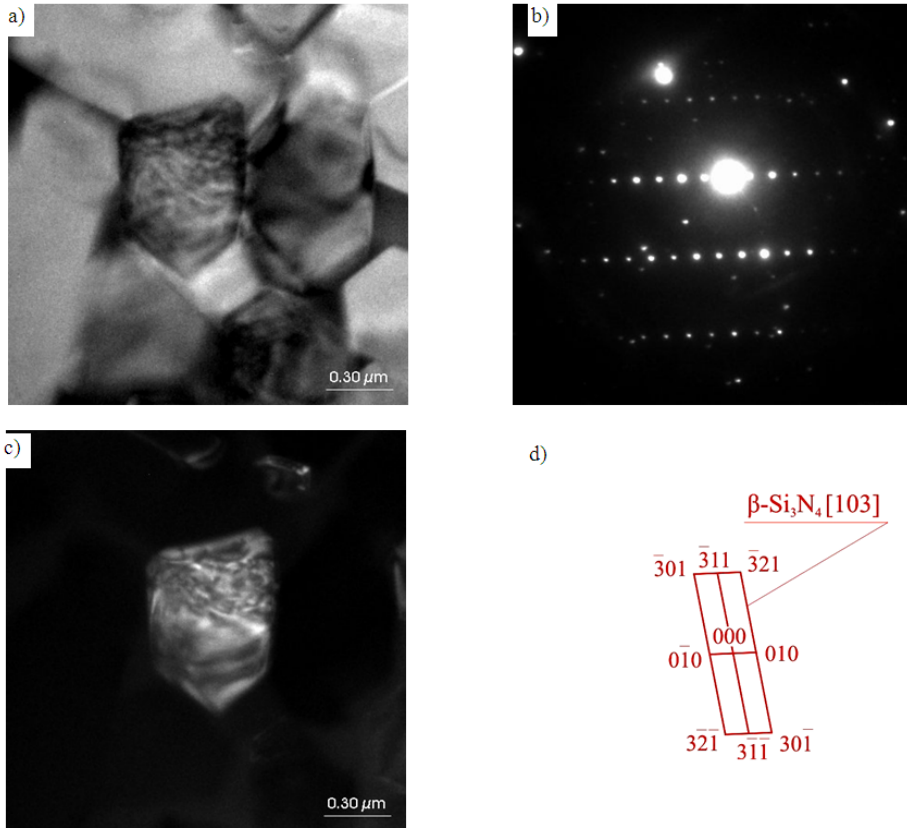
Sialony można otrzymać przez prasowanie na gorąco w formach grafitowych w temperaturze ok. $1700-1750^\circ C$. Stosowane jest jednak częściej bezciśnieniowe spiekanie reakcyjne



Rysunek 2.48. Porównanie własności skrawalnych płytek z materiałów ceramiczno-węglkowych i sialonu β' przy toczeniu żarowytrzymałego stopu niklu (Inconel 718) [3]

w atmosferze azotu w temperaturze 1750-1850°C. Przed spiekaniem produkty z sialonu β' są formowane na zimno lub na gorąco metodami stosowanymi zwykle przy wytwarzaniu tlenkowych materiałów ceramicznych, tj. przez prasowanie izostaticzne, prasowanie jednoosiowe, wyciskanie na zimno i na gorąco, formowanie wtryskowe lub odlewanie gęstwy. Przed spiekaniem wypraski mogą być obrobione przez toczenie konwencjonalnymi narzędziami, cięcie piłami taśmowymi, frezowanie, wiercenie i szlifowanie konwencjonalnymi ściernicami. Umożliwia to ograniczenie do minimum szlifowania ściernicami diamentowymi gotowych spieków, zapewniającego im cechy geometryczne z wymaganą dokładnością. Stosowane jest również polerowanie ultradźwiękowe gotowych spieków. Mogą być one również przecinane z wykorzystaniem lasera.

Narzędzia wykonane z sialonu β' z powodzeniem są stosowane do toczenia i frezowania stali i stopów trudno obrabialnych (rys. 2.48), m.in. żeliwa, stali ulepszonej cieplnie, stopów niklu, tytanu i aluminium oraz stopów wysokożarowytrzymałych [72-74]. Wydajność skrawania przy użyciu sialonu β' jest znacznie większa niż w przypadku zastosowania innych materiałów ceramicznych lub węglków spiekanych pokrywanych wielowarstwowo.

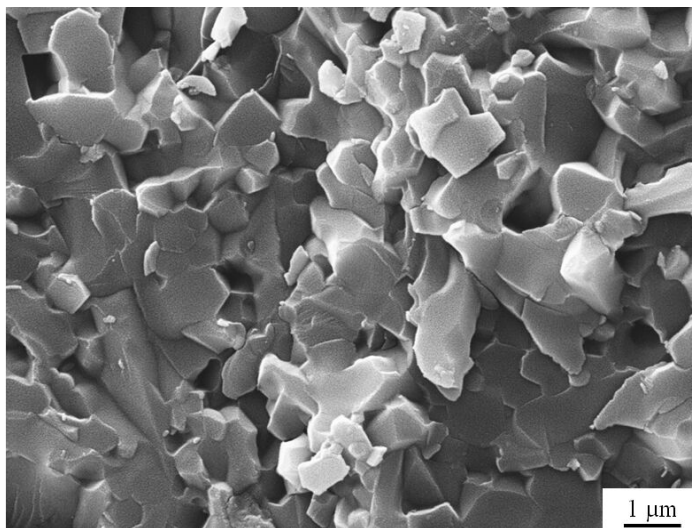


Rysunek 2.49. Struktura sialonowej ceramiki narzędziowej; cienka folia równoległa do powierzchni a) obraz w polu jasnym, b) dyfrakcja z obszaru jak na rysunku a, c) obraz w polu ciemnym z refleksu $0\bar{1}0$, d) rozwiązanie dyfraktogramu z rysunku b [87, 116]

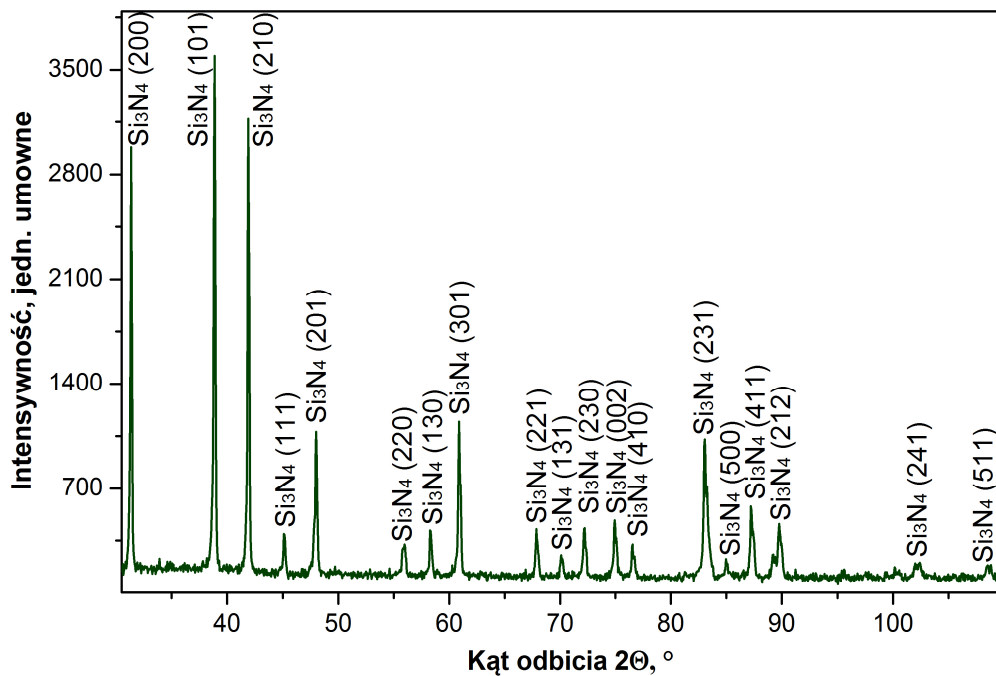
Stwierdzono przy tym, że zużycie narzędzi zmniejsza się ze wzrastającą prędkością skrawania. Sialony znalazły także zastosowanie na narzędzia do ciągnięcia rur i drutów, narzędzia do ciągłego odlewania metali oraz narzędzia górnicze do skał i węgla kamiennego.

Na podstawie badań cienkich folii w transmisyjnym mikroskopie elektronowym potwierdzono, że sialonowa ceramika narzędziowa ma strukturę izomorficzną z azotkiem krzemu Si_3N_4 o sieci heksagonalnej (grupa przestrzenna $P6_3/m$) (rys. 2.49) [87].

Badania w skaningowym mikroskopie elektronowym pozwalają stwierdzić, sialonowa ceramika narzędziowa charakteryzuje się dobrze zagęszczoną, zwartą strukturą bez porów (rys. 2.50). Na rysunku 2.51 przedstawiono dyfraktogram rentgenowski z ceramiki sialonowej zawierający refleksy odpowiednie dla fazy $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ [87].



Rysunek 2.50. Powierzchnia przelomu ceramiki sialonowej [87]



Rysunek 2.51. Dyfraktogram rentgenowski ceramiki sialonowej [87]