

TADEUSZ SAŁACIŃSKI*

POSTĘPY W KONSTRUKCJI NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH DO UZĘBIEŃ WALCOWYCH

ADVANCES IN CYLINDRICAL GEAR CUTTING TOOLS DESIGN

Streszczenie

Duża produktywność współczesnych procesów technologicznych wymaga dokładnych, trwałych i wytrzymałych narzędzi, które podążają warunkom obróbki na sucho w stanie utwardzonym, dużym prędkościom skrawania i posuwów. Bardzo duże wymagania stawiane są narzędziom do uzębienia, których budowa i geometria, jak również warunki pracy, są szczególnie skomplikowane. W ramach niniejszego referatu nakreślone zostaną obszary postępu i tendencje w konstrukcji narzędzi skrawających do uzębienia walcowych dotyczące w szczególności materiałów na narzędzia, narzędzi składanych i zespołowych, kinematyki kształtowania oraz sposobów chłodzenia.

Słowa kluczowe: przekładnia zębata walcowa, narzędzia skrawające do kół zębatach walcowych

Abstract

High productivity of modern manufacturing processes requires accurate, durable and tough tools, capable of dry machining of hardened material, high speeds and feeds. There are very high requirements for gear cutting tools, having exceptionally complex construction and geometry, as well as difficult work conditions. This paper will outline areas of advancement and trends in the design of machining tools for cylindrical gear cutting, focusing on: tool material, carbide insert and tandem tools, kinematics of profile generation and methods of cooling.

Keywords: cylindrical gear, cylindrical gear cutting tools

* Dr hab. inż. Tadeusz Sałaciński, prof. PW, Instytut Techniki Wytwarzania, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska.

1. Wstęp

Ostatnie dwie dekady zaznaczyły się znaczącym postępem w dziedzinie konstrukcji narzędzi skrawających, w tym narzędzi do kół zębatach. Powstały nowe strategie produkcji, takie jak:

- HSC – (*High Speed Cutting*) – skrawanie z dużymi prędkościami,
- HPC – (*High Performance Cutting*) – skrawanie wysoko wydajne (wysokoproduktywne) stawiające na większe posuwy i dosuwy,
- obróbka w stanie utwardzonym i na sucho,
- stosowanie narzędzi zespołowych.



Rys. 1. Trendy w konstrukcji narzędzi do uzębień walcowych

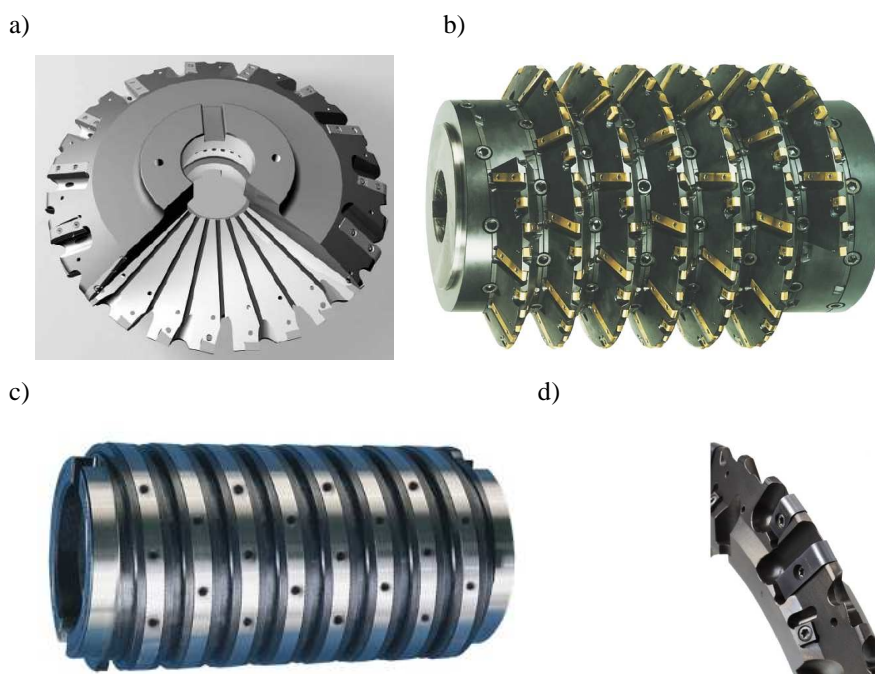
Fig. 1. Trends in the design of cylindrical gear cutting tools

Strategie te wywołały ogromne zmiany w wytwarzaniu kół zębatach oraz narzędzi do ich obróbki. Wymagania współczesnego rynku przemysłu maszynowego, takie jak: duża wydajność, krótkie czasy maszynowe, produkcja ekologiczna (bez cieczy chłodzących),

duża dokładność obróbki, odbiły się również na konstrukcji narzędzi i parametrach ich stosowania.

W ostatnich latach obserwuje się tendencje do stosowania narzędzi składanych do kół zębatach (rys. 2). Wynika to m.in. z faktu osiągania dużych dokładności geometrycznych takich narzędzi, co dawniej było trudne do uzyskania. Bezspornymi zaletami narzędzi składanych są:

- przywracanie własności skrawnych poprzez szybką wymianę zużytych płytek,
- brak konieczności ponownego ustawiania narzędzia „na wymiar”,
- duża dokładność wykonania płytek i elementów korpusu oraz powtarzalność ich mocowania gwarantująca wymaganą ostateczną dokładność narzędzia po złożeniu,
- brak konieczności ostrzenia,
- możliwość obróbki kół o bardzo dużych modułach.



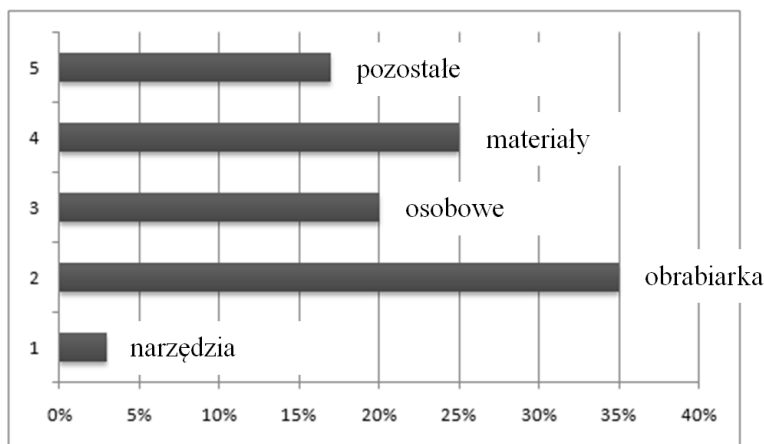
Rys. 2. Narzędzia składane do walcowych kół zębatach: a) frez modułowy krążkowy z widocznymi w przekroju kanałkami chłodzącymi, b) frez modułowy obwodniowy z płytkami pokrytymi TiN, c) korpus frezu składanego, d) segment frezu składanego z płytkami [6, 7]

Fig. 2. Carbide insert tools for cylindrical gears: a) module milling cutter with cooling channels visible in the sectional drawing, b) module hob with inserts coated with TiN, c) carbide insert cutter body, d) carbide insert cutter tooth segment [6, 7]

Nie należy sądzić, że narzędzia jednolite zostaną wyparte z rynku. W sytuacjach, w których wymagana jest wysoka wytrzymałość i sztywność narzędzia, szczególnie przy obróbce kół z wyższych klas dokładności – użycie narzędzia składanego może nie wystarczyć. Powszechną praktyką jest stosowanie narzędzi jednolitych ze spiekanych

proszków stali szybko tnącej o drobnoziarnistej jednolitej strukturze (ziarna od 0,5 do kilkudziesięciu μm), wolnej od segregacji węglików o jednakowych właściwościach mechanicznych we wszystkich kierunkach. Stale spiekane (szczególnie te powlekane) są bardziej odporne na zużycie w porównaniu do stali konwencjonalnych oraz charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną, co ma duże znaczenie w przypadku obróbki materiałów o podwyższonej twardości.

Niektórzy badacze zwracają uwagę na duży koszt narzędzia składanego. Oczywistym jest fakt ich wyższej ceny w porównaniu z narzędziami jednolitymi. Jednak wzięwszy pod uwagę, że udział narzędzia w sumarycznych kosztach przypadających na jeden wyprodukowany wyrób wynosi zaledwie 3% (rys. 3), argument ceny staje się bezprzedmiotowy.



Rys. 3. Składniki kosztów produkcji w technologii części maszyn [6, 8]

Fig. 3. Manufacturing cost components in the machine parts technology [6, 8]

Firmy produkujące narzędzia do kół zębatych coraz częściej oferują frezy ze zwiększoną liczbą ostrzy na obwodzie narzędzia. Takie rozwiązanie jest skuteczne dla obróbek wykończeniowych. Większa liczba ostrzy wymaga mniejszych grubości warstwy skrawanej – występują mniejsze siły skrawania, trwałość narzędzia jest wyższa. Wadą takiego rozwiązania jest mniejsza liczba przeostrzeń oraz niższa wytrzymałość narzędzia w przypadku większych sił skrawania (obróbka zgrubna).

Tendencją ostatnich lat jest obróbka „na sucho”, w której wyeliminowana jest ciecz chłodząco-smarująca. Wszelkiego rodzaju oleje, smary, emulsje stają się niepożądane z uwagi na ich koszt, wymagania ekologiczne oraz bezpieczeństwo zdrowotne operatorów maszyn. Współczesne narzędzia skrawające, jak również bardzo sztywne i wytrzymałe obrabiarki, pozwalają na skrawanie z wysokimi parametrami w stanie utwardzonym, co pozwala na obróbkę bez używania chłodziw. Jednak zdarzają się sytuacje, w których zastosowanie choćby minimalnego chłodzenia jest niezbędne. Takim przypadkiem jest przekroczenie maksymalnej temperatury w strefie skrawania, co wymagałoby złagodzenia parametrów obróbki, a więc wydłużenia czasu zabiegów i operacji, co skutkuje spadkiem wydajności.

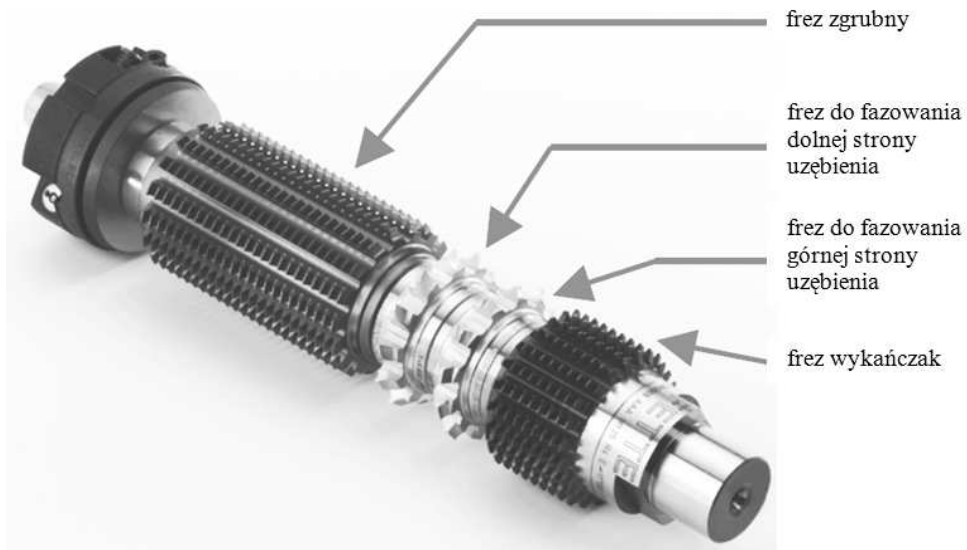
Alternatywą jest obróbka z minimalnym wydatkiem cieczy obróbkowej (MQL – *Minimum Quantity Lubrication*). Wówczas środek smarujący, w postaci mgły olejowej, jest podawany jak najbliższej strefy skrawania, zapewniając skuteczne smarowanie w procesie obróbki. Wadą metody jest brak możliwości kierowania spływem wióra oraz tylko minimalne chłodzenie [4].

Metodą obniżenia temperatury bez stosowania cieczy jest chłodzenie sprężonym powietrzem podawanym wąskimi kanalikami od strony otworu osadczego narzędzia bądź chwytu (rys. 2). Strumień sprężonego powietrza nie tylko chłodzi, ale również skutecznie usuwa wióry ze strefy skrawania, które nie przytwierdzają się do krawędzi skrawającej, jak również do powierzchni obrobionej. Skutkuje to zwiększeniem trwałości narzędzia oraz gładkości powierzchni obrobionej. Wadą metody jest konieczność zainstalowania aparatury doprowadzającej powietrze do narzędzia.

Kluczowym zagadnieniem związanym z narzędziami, wpływającym na efektywność wytwarzania w produkcji wielkoseryjnej, jest możliwość skrócenia czasu operacji. Alternatywne wydłużanie okresów trwałości narzędzi, możliwe dzięki np. zwiększeniu własności skrawnych ostrzy, wpływa w bardzo nieznacznym stopniu na koszty i wydajność obróbki. Dlatego też dobierając narzędzia, zwłaszcza w produkcji wielkoseryjnej, należy kierować się przede wszystkim [2]:

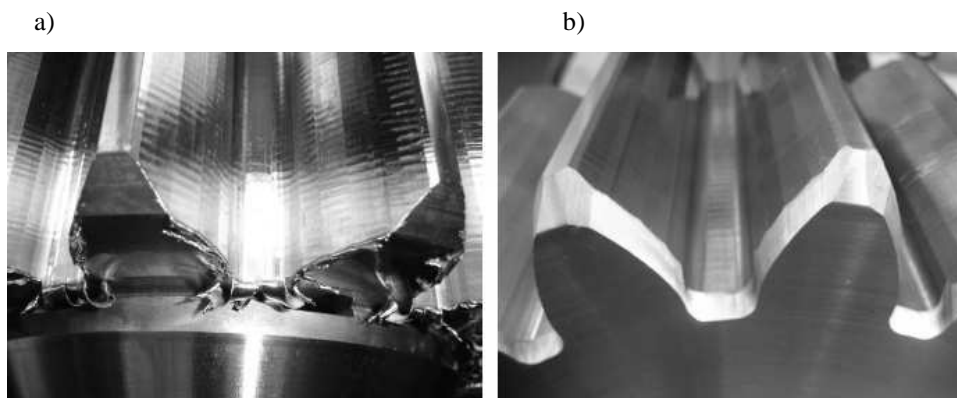
- możliwością zwiększenia parametrów skrawania tak, aby skrócić czas operacji, co w przypadku dużych serii może powodować znaczne oszczędności nie tylko czasu i bezpośrednich kosztów wytwarzania, ale także eliminowanie wąskich gardeł, zmniejszanie parku maszynowego niezbędnego do wykonania zadania itp.,
- możliwością połączenia wielu zabiegów i operacji tak, aby wykonać zadanie obróbkowe mniejszą liczbą narzędzi, a nawet jednym narzędziem, tzw. zespołowym, w jednym jego przejściu, co może nie tylko zwiększyć wydajność, ale także zwiększyć dokładność wzajemnego położenia powierzchni wymiarowo ze sobą sprzężonych.

Na rysunku 4 pokazano narzędzie zespołowe do obróbki kompletnej koła zębatego. Narzędzie to zestawione jest z czterech frezów: do obróbki zgrubnej, wykończeniowej oraz do fazowania czół (tzw. Chamfer-Cut). Ogromną zaletą obróbki takim narzędziem jest wykonanie wszystkich operacji w jednym zamocowaniu, co znacznie wpływa na dokładność wykonanego koła i krótki czas operacji, jak również samo wykonanie faz, przez co krawędzie czół kół pozbawione są niekorzystnych ostrych krawędzi, na których znajdują się zadziory i przyklepione fragmenty wiórów (rys. 5). Ponadto w obróbce takim narzędziem zespołowym można stosować różne strategie przesunięć pozaroboczych frezu zdzieraka względem koła obrabianego. Jedną z nich pokazano na rys. 6. Polega ona na tym, że po obróbce każdego koła frez jest przesuwany o pewną wartość A celem pokrycia obrabianego zarysu innym fragmentem zębátky. Po całkowitym przesunięciu frezu C wraca się do punktu wyjściowego, który przesunięty jest o pewną wartość B względem punktu startowego i dokonuje obróbki kolejnych kół z ponownym przemieszczeniem frezu o wartość A itd. Taka strategia pracy narzędzia z następującymi po sobie przemieszczeniami ma na celu optymalne jego wykorzystanie na całej długości zębátky, zwiększenie trwałości, wolniejsze zużywanie się ostrzy, co ma wpływ na dokładność obróbki oraz lepsze odprowadzanie ciepła.



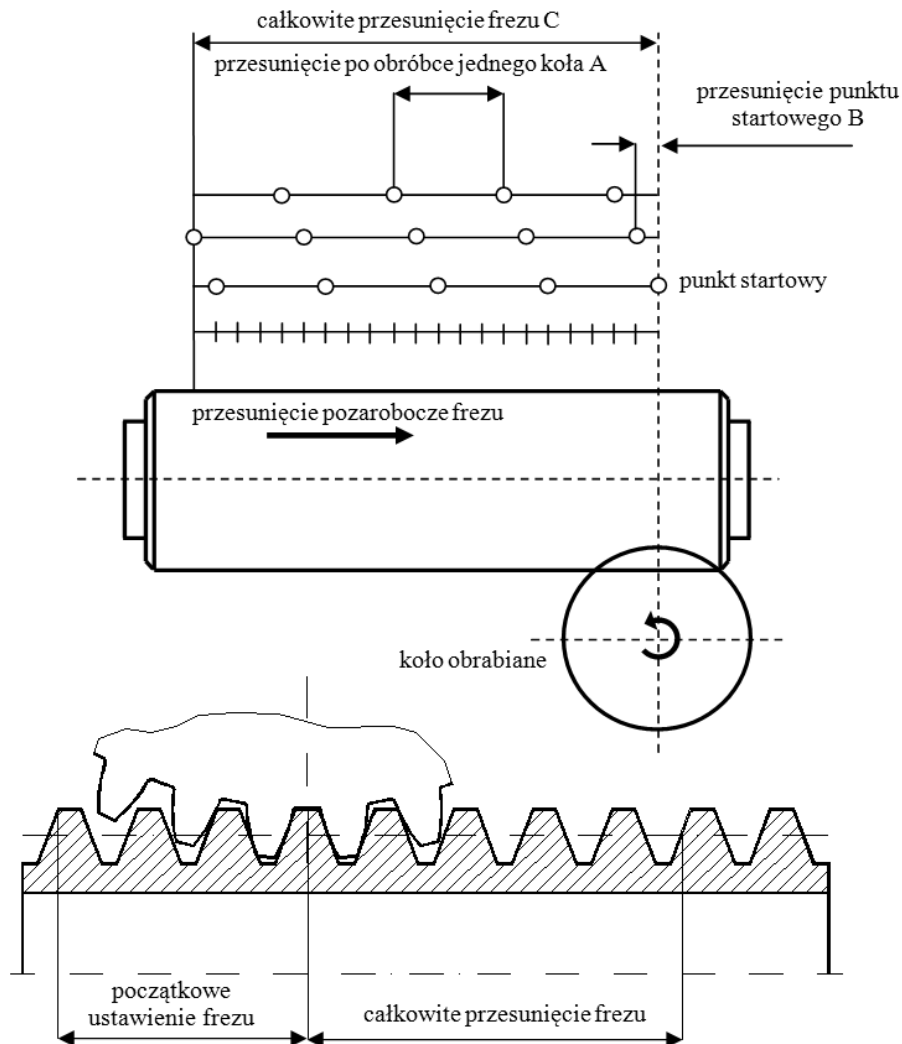
Rys. 4. Zespół frezów do obróbki kompletnej koła zębatego (frezowanie zgrubne, fazowanie, frezowanie wykończeniowe) [6]

Fig. 4. Set of hobs used for the complete manufacture of a gear (rough hobbing, chamfering, finish hobbing) [6]



Rys. 5. Widok koła zębatego: a) po frezowaniu konwencjonalnym, b) po frezowaniu z jednoczesnym fazowaniem (narzędziem zespołowym) [6]

Fig. 5. View of a gear: a) after conventional hobbing, b) after hobbing with successive chamfering (using a tandem tool) [6]



Rys. 6. Strategia przesunięć frezu przy obróbce z przesunięciem pozaroboczym narzędzia (opracowanie własne na podstawie [6])

Fig. 6. Hob shifting strategy, shifting after the cutting cycle (developed by author, based on [6])

Analizując współczesną literaturę oraz praktykę produkcyjną, można stwierdzić, że rozwój współczesnych narzędzi skrawających determinują następujące czynniki [1, 2]:

- nowe materiały narzędziowe,
- wzbogacona geometria ostrza (np. typu WIPER – do pracy z dużymi posuwami),
- narzędzia składane z możliwością regulacji położenia naroży,
- narzędzia pełnowęglkowe,
- narzędzia ze spiekanych proszków stali szybko tnącej,

- narzędzia modułowe,
- wyważanie dynamiczne narzędzi,
- zwiększenie liczby ostrzy,
- zwiększenie liczby łysinek prowadzących (wiertła, rozwiertaki),
- narzędzia wielozadaniowe,
- narzędzia zespołowe z ostrzami z materiałów supertwardych o bardzo dużych trwałościach,
- narzędzia mechatroniczne.

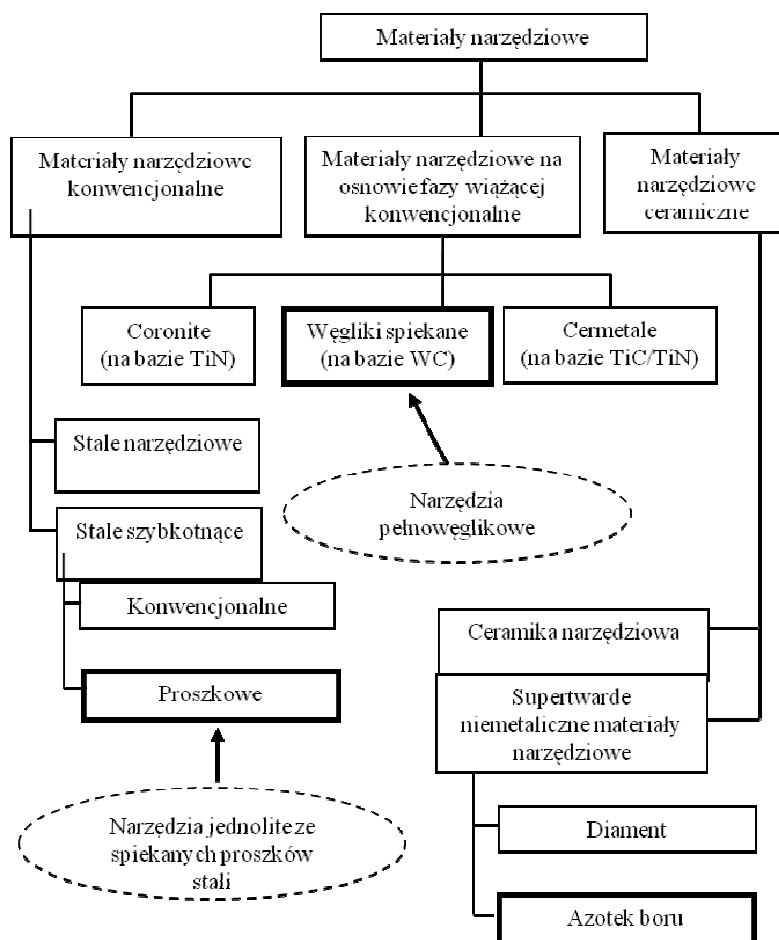
Jak widać z powyższego podziału, w odniesieniu do narzędzi do kół zębatych jednym z kluczowych czynników, obok scharakteryzowanych wcześniej, są materiały narzędziowe wliczając w to powłoki ochronne.

Obserwując rynek materiałów narzędziowych, można sformułować następujące tendencje w ich rozwoju (na podstawie [1]):

- mimo usilnych dążeń inżynierii materiałowej do opracowania idealnego materiału narzędziowego, który wykazywałby jednocześnie wysoką twardość i wytrzymałość, nie udało się, jak na razie, tego dokonać,
- ogranicza się liczbę odmian materiałów w poszczególnych gatunkach narzędziowych, zwłaszcza w grupie takich materiałów, jak węgliki spiekane i stale szybko tnące,
- badania koncentrują się na uzyskaniu bardzo twardych, grubych, odpornych na ścieranie powłok na wytrzymałym, wiązkim podłożu,
- rozszerzanie się zakresu zastosowań ceramiki narzędziowej,
- stale szybko tnące spiekane (drobnoziarnista jednolita struktura od 0,5 do kilkudziesięciu μm , wolna od segregacji węglików, jednakowe własności mechaniczne we wszystkich kierunkach – ważne dla dużych narzędzi, mniejsze prawdopodobieństwo wykruszeń),
- narzędzia pełnowęglkowe.

W ostatnich latach obserwuje się znaczący postęp w stosowaniu powłok ochronnych, które obok samego materiału narzędzia stanowią kluczowy element decydujący o jego trwałości. Pokrycie narzędzia wpływa korzystnie na tarcie w strefie skrawania, zwiększa twardość ostrza, zmniejsza dyfuzję, utlenianie, zmiany chemiczne oraz wnikanie ciepła w powierzchnie robocze narzędzia. Obserwując współczesny rynek przemysłu narzędziowego, można wymienić następujące tendencje w zakresie rozwoju powłok (na podstawie [5]):

- powłoki modulowane (powtarzalne), składające się z dużej liczby (od kilkudziesięciu do 2000) ultracienkich warstw osadzanych przemiennie w sekwencji powtarzających się par,
- powłoki stopowe złożone z węglików i azotków,
- powłoki samosmarujące,
- powłoki supertwarde na bazie regularnego azotku boru,
- powłoki diamentowe (warstwy już od grubości rzędu nanometra) i z regularnego azotku boru (faza badań laboratoryjnych),
- powłoki metaloorganiczne wytwarzane techniką zol-żel, których zaletą jest niska temperatura ich osadzania (poniżej temperatury odpuszczania stali szybko tnącej),
- zastosowanie metod hybrydowych do wytwarzania powłok (PVD, CVD, osadzanie laserem impulsowym).



Rys. 7. Podział materiałów narzędziowych z uwzględnieniem narzędzi do kół zębatach (opracowanie własne na podstawie [1])

Fig. 7. Classification of tooling materials, considering gear cutting tools (developed by author, based on [1])

Do najczęściej stosowanych rodzajów powłok ochronnych w narzędziach skrawających do kół zębatach należy zaliczyć: TiN, TiCN, TiAlN, AlCrN. Obecnie dominującą powłoką jest TiAlN, dzięki możliwości stosowania dużych prędkości skrawania i pracy na sucho.

Najnowsze badania dotyczące powłok nowej generacji przyjmują za podstawę pierwiastki Al–Cr–N. Istotną zaletą tej kombinacji pierwiastków jest większa odporność powłoki na ścieranie oraz, co bardzo istotne, utrzymanie znacznie większej twardości i odporności na utlenianie w wysokich temperaturach (do 1100°C) w porównaniu do generacji dotychczasowych powłok TiAlN [3].

2. Wnioski

Konstruowanie narzędzi skrawających do uzębień walcowych jest przedmiotem ciągłych badań. Jest to dziedzina bardzo dynamicznie rozwijająca się, przede wszystkim z uwagi na powstawanie nowych materiałów, a w szczególności nowych powłok ochronnych. Wydaje się, że przed inżynierią materiałową otwierają się nowe obszary badań, które dostarczą przemysłowi nowych materiałów narzędziowych spełniających warunki jednocześnie wysokiej twardości i wytrzymałości. Duże dokładności wykonania elementów składowych narzędzi składanych, a co za tym idzie duża końcowa dokładność takich narzędzi, powoduje, że ich stosowanie staje się coraz bardziej powszechne i ekonomiczne. Wysoka produktywność współczesnych procesów technologicznych wymaga bardzo dokładnych, trwałych i wytrzymałych narzędzi, które podołają warunkom obróbki na sucho w stanie utwardzonym, dużym prędkościom skrawania i posuwów. Odpowiedzią na te wymagania mogą być w technologii kół zębatach m.in. narzędzia zespołowe.

Literatura

- [1] Cichosz P., *Narzędzia skrawające*, WNT, Warszawa 2006.
- [2] Cichosz P., Kuzinowski M., *Narzędzia skrawające do wysokowydajnej obróbki*, Inżynieria Maszyn Rok 14, Zeszyt 4, Wysokowydajne Skrawanie, pod red. W. Grzesika, Wyd. Wrocławskiej Rady FSNT NOT, Wrocław 2009.
- [3] Gey Ch., *Powłoki na ostrza skrawające. Obróbka Skrawaniem. Wysoka Produktywność. Szkoła Obróbki Skrawaniem*, pod red. P. Cichosza, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
- [4] Kruszyński B., Stachurski W., *Frezowanie obwiedniowe kół zębatach z podawaniem cieczy obróbkowej z minimalnym wydatkiem (MQL)*, Obróbka Skrawaniem, Wysoka Produktywność, Szkoła Obróbki Skrawaniem pod red. Piotra Cichosza, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
- [5] Kupczyk M., Siwak P., *Klasyfikacja i kierunki rozwoju materiałów powłokowych na ostrza skrawające. Obróbka Skrawaniem. Zaawansowana Technika. Szkoła Obróbki Skrawaniem*, pod red. H. Latosia, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2009.
- [6] Materiały katalogowe firmy Fette.
- [7] Materiały katalogowe firmy Ingersoll.
- [8] Materiały katalogowe firmy Sandvik.