

Narzędzia skrawające z materiałów supertwardych. Cz. I. Ostrza diamentowe

Cutting tools from superhard materials. Part I. Diamond blades

PIOTR CICHOSZ
MIKOŁAJ KUZINOVSKI
MITE TOMOV*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.99>

Przedstawiono właściwości materiałów supertwardych, takich jak diament i regularny azotek boru, oraz ich zastosowanie na ostrza skrawające. Omówiono przykłady narzędzi z ostrzami z tych materiałów oraz wskazano na efektywność technologiczną i ekonomiczną technologii wykorzystujących te narzędzia. Pierwsza część artykułu dotyczy materiałów i narzędzi z ostrzami diamentowymi, a druga – z ostrzami z regularnego azotku boru.

SŁOWA KLUCZOWE: diament, azotek boru, narzędzia, skrawanie

The properties of super-hard materials such as diamond and regular boron nitride, and their application on cutting blades. Discussed are examples of blade tools from these materials in the aspects of production process efficiency and economical advantages gained by using these tools. The first part of the article deals with materials and tools with diamond blades and the other – with the blades of a regular boron nitride.

KEYWORDS: diamond, boron nitride, tools, cutting

Do materiałów supertwardych zalicza się diament i regularny azotek boru. Zgodnie z obowiązującą normą PN-ISO 513:1999 diament polikrystaliczny oznacza się jako DP, a regularny azotek boru jako BN. Jednak w powszechnym użyciu, nie tylko w środowiskach przemysłowych, ale także akademickich, stosowane są oznaczenia odpowiednio: PKD i CBN (cBN). Zgodnie z przytoczoną normą monokryształ diamentu oznacza się DM.

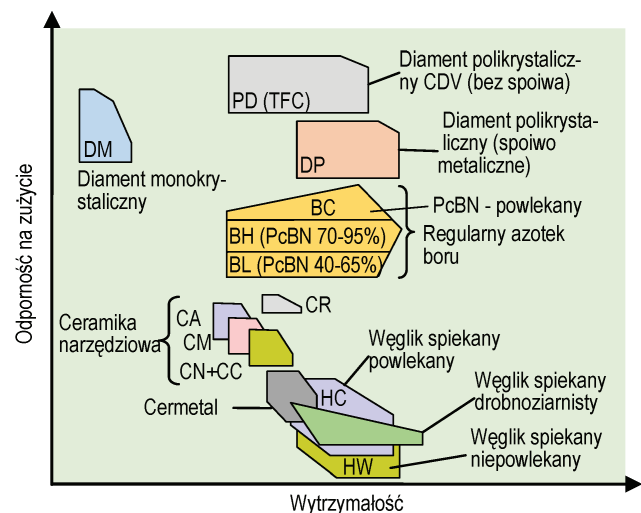
W artykule będą stosowane oznaczenia zgodne normą. Trzeba jednak nadmienić, że w publikacjach i materiałach informacyjnych wielu firm narzędziowych coraz częściej można spotkać oznaczenia z normy DIN ISO 513:2014-05, które odnoszą się do rodzajów węglików spiekanych oraz regularnych azotków boru (rys. 1). Przykładowo: oznaczenie BN zastąpiono trzema symbolami: BL (spieki z małą zawartością azotku boru), BH (spieki z dużą zawartością azotku boru) i BC (spieki z dużą zawartością azotku boru, ale powlekane). Wprowadzono też nowe oznaczenie PD na diament polikrystaliczny bez fazy wiążącej.

Omawiane materiały są znacznie twardsze od pozostałych materiałów narzędziowych stosowanych na ostrza skrawające. Do tego są bardzo odporne na ścieranie i w związku z tym narzędzia z tych materiałów mają długie okresy trwałości. Niestety ostrza z materiałów supertwardych są zazwyczaj kilkadziesiąt razy droższe od ostrzy z innych, popularniejszych materiałów, takich jak: węgliki spiekane, cermetale czy ceramika.

Mimo wysokiej ceny w pewnych warunkach obróbki mogą się one wykazywać dobrymi efektami technologicz-

nymi kształtowania, a ich zastosowanie jest uzasadnione ekonomicznie. Dlatego narzędzia z ostrzami z materiałów supertwardych są coraz chętniej stosowane, zwłaszcza produkcji o znacznej skali i dużym stopniu zautomatyzowania, gdzie trwałość jest bardzo pożądana.

Źródła podają, że materiały supertwarde stanowią zaledwie kilka procent ogółu materiałów narzędziowych. Jednakże gdyby wziąć pod uwagę procentowy udział w objętości zdejmowanego skrawaniem materiału, byłby on z pewnością znacznie większy.



Rys. 1. Oznaczenia materiałów narzędziowych według normy DIN ISO 513: 2014-05: CR – ceramika tlenkowa Al_2O_3 wzmocniana wiskerami, CA – ceramika tlenkowa Al_2O_3 , CM – ceramika mieszaną, CN – ceramika krzemowa Si_3N_4 , CC – ceramika powlekana

Materiał supertwardy – diament

Diament naturalny monokryształowy osiąga twardość rzędu 8000÷10000 HV i jest najtwardszym znanym materiałem. Bardzo ważną cechą diamentu jest też sztywność. Moduł sprężystości diamentu przewyższa moduł sprężystości innych znanych materiałów. Jest ok. trzy razy większy od modułu sprężystości węgla krzemowego i węgla boru, a także znacznie większy niż węgliki spiekanych [1].

Diament jest czystym węglem skryształizowanym w regularnej siatce przestrzennie centrowanej. Pierwotnie na ostrza skrawające i obciążacze do ściernic wykorzystywano monokryształy diamentu mające skazy dyskwalifikujące je w zastosowaniach jubilerskich. Najstarsze przypadki zastosowania diamentu datuje się na 300 rok p.n.e. Diament wykorzystywano wtedy do celów grawerskich. Dziś monokryształy diamentu naturalnego stosowane są sporadycznie na ostrza skrawające z uwagi na rzadkość ich występowania, wysoką cenę oraz dużą podaż diamentów syntetycznych, a głównie ze względu na pojawienie

* Prof. dr hab. inż. Piotr Cichosz (piotr.cichosz@pwr.edu.pl) – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej; prof. dr inż. Mikołaj Kuzinovski (mikołaj.kuzinovski@mf.edu.mk), doc. dr inż. Mite Tomov (mite.tomov@mf.edu.mk) – Faculty of Mechanical Engineering, Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, Macedonia

się spieków diamentowych, które mają wiele właściwości znacznie korzystniejszych niż monokryształy, zwłaszcza w obszarze ich kształtowości.

Diament jako materiał narzędziowy ma takie zalety, jak:

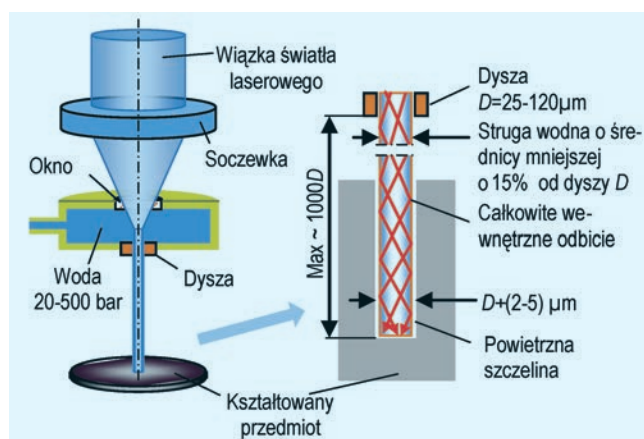
- bardzo duża twardość i odporność na ścieranie;
- mała rozszerzalność cieplna, mniej więcej o rząd mniejsza niż węglików spiekanych, co ma znaczenie przede wszystkim w obróbkach precyzyjnych i dokładnych, w których ma on główne zastosowanie;
- bardzo dobra przewodność cieplna, powodująca znaczne obniżenie maksymalnej temperatury, jaka może się pojawić na powierzchniach roboczych ostrza skrawającego (zmniejsza to tym samym intensywność niemal wszystkich mechanizmów zużywania się narzędzi, choćby takich jak: dyfuzja, adhezja, utlenianie, ścieranie czy grafityzacja); jednak dobra przewodność cieplna ma też złe strony, a mianowicie powoduje intensywniejsze nagrzewanie się narzędzia, a to może rzutować na jego wydłużenie cieplne i utrudniać kontrolowanie dokładności obróbki; temu niekorzystnemu zjawisku przeciwdziała w znacznym stopniu wspomniana bardzo mała rozszerzalność cieplna diamentu;
- możliwość uzyskiwania bardzo gładkich powierzchni roboczych ostrza i krawędzi skrawających o małej szczyratości, nawet dla dużych dodatnich kątów natarcia, co jest istotne w obróbkach precyzyjnych, a zwłaszcza w nanotechnologiach, a także obróbce kompozytów;
- łatwość kształtowania powierzchni przedmiotów bardzo gładkich, w tym o walorach estetycznych, i to zachowywana przez długi okres trwałości narzędzi; jest to spowodowane m.in. złą zwilżalnością większości metali nieżelaznych, małą skłonnością do szpepnięć adhezyjnych, co ogranicza tworzenie się narostów i zapobiega tzw. zaciąganiu powierzchni.

Diament ma także wiele wad, które znacznie ograniczają jego zastosowanie w skrawaniu, np.:

- silne powinowactwo z żelazem, niklem, kobaltem i ich stopami, co powoduje, że atomy węgla dość intensywnie się w nich rozpuszczają, nasilając zjawisko zużycia dyfuzyjnego (z tego powodu obróbka tych materiałów ostrzami diamentowymi jest niezalecana; jednak kobalt, który łatwo zwilża większość składników stosowanych na materiały narzędziowe, w tym diament, ze względu na wysoką temperaturę topnienia – 1495°C – doskonale się nadaje do spajania spieków); monokryształy i spieki diamentowe stosuje się do obróbki materiałów bardzo twardych, kompozytów z twardymi frakcjami cząstek lub włókien wzmacniających, a także do obróbki materiałów nieżelaznych lub ich stopów, zwłaszcza gdy jest silna potrzeba zachowania bardzo długich okresów trwałości narzędzi;
- grafityzacja, w zależności od czystości diamentu, może zachodzić już w temperaturze powyżej 700°C, co ogranicza zakres dopuszczalnych prędkości skrawania;
- niska odporność diamentu na utlenianie się, mimo że temperatura jego topnienia wynosi ~3750°C (w atmosferze czystego tlenu spala się on w temperaturze ok. 720÷800°C, a w atmosferze powietrza – w temperaturze ok. 850÷1000°C, tworząc dwutlenek węgla); niezależnie od warunków skrawania temperatura pracy narzędzia nie powinna przekraczać 700÷800°C [18];
- zależność właściwości mechanicznych od płaszczyzn największego upakowania atomów węgla, w których kryształ jest wyjątkowo twardy, a jednocześnie bardzo kruchy i łatwo łupliwy – stąd konieczność takiego orientowania kryształu w ostrzu, aby siły skrawania nie działały w tej płaszczyźnie;
- bardzo duża kruchość i związana z nią mała odporność na szoki mechaniczne;

- mała wytrzymałość na zginanie (~300 MPa) może uniemożliwiać stosowanie dużych przekrojów warstw skrawanych, wywołujących powstawanie dużych, dynamicznie oddziałujących sił skrawania; może to ograniczać uzyskiwanie dużej wydajności objętościowej obróbki;
- trudna kształtowość spowodowana głównie twardością i kruchością diamentu, niemal wykluczającą oddziaływanie mechaniczne w fazie obróbki zgrubnych i kształtujących; brak przewodnictwa elektrycznego diamentu eliminuje obróbki elektroerozyjne i elektrochemiczne; dobra przewodność cieplna i przezroczystość jego kryształów utrudniają zastosowanie do jego kształtowania laserów.

W ostatnich latach pojawiły się obrabiarki hybrydowe, łączące obróbkę laserową i strumieniem wody, przeznaczone do wydajnego kształtowania diamentów. Schemat działania takiej obrabiarki przedstawiono na rys. 2. Główna idea polega na tym, że spójna, równoległa struga wody wykorzystywana jest – jak swego rodzaju światłowód – do przekazywania wiązki fotonów w strefę ich oddziaływania na kształtowany przedmiot.



Rys. 2. Schemat działania obróbki hybrydowej diamentów (według SYNOVA)

Obróbka hybrydowa diamentów ma szereg zalet, do których należą:

- znacznie większa wydajność kształtowania niż samym laserem,
- stała szerokość cięcia nawet stosunkowo głębokiego, co wynika z „równoległości” wiązki światła spowodowanej całkowitym wewnętrznym odbiciem od ścianek strugi wody,
- brak wymagań co do precyzyjnego ogniskowania wiązki,
- głębokość cięcia do kilku centymetrów,
- możliwość wycinania 3D,
- chłodzenie wodą pozwala uniknąć uszkodzeń termicznych i zmian w materiale oraz uzyskiwać dobrą jakość kształtowanych powierzchni,
- rezonator lasera generuje odpowiednią długość fali, która jest korzystnie absorbowalna przez diament,
- dzięki wysokiej energii kinetycznej strumienia wody stopiony materiał jest łatwo usuwany ze szczelin, nawet głębokich i o równoległych ściankach.

Wadą tej metody jest stosunkowo wysoka cena obrabiarek.

Diament syntetyczny jest silnym konkurentem diamentów naturalnych, nie tylko w obszarze proszków i uzyskiwanych z nich spieków, ale także monokryształów o znacznych rozmiarach. Diamenty syntetyczne mają porównywalne właściwości użytkowe do diamentów naturalnych, ale są znacznie tańsze. Współczesne techniki

wytwarzania diamentów pozwalają na syntetyzowanie kryształów o wymiarach nawet rzędu 10×10 mm. Podejmowane są próby powrotu do stosowania monokryształów diamentu, tym razem syntetycznego, w ostrzach skrawających. Dość szeroką gamę ostrzy z DM oferuje firma TIZ TOOLS [16]. Monokryształy lutowane są próżniowo do podłoży z węglików spiekanych.

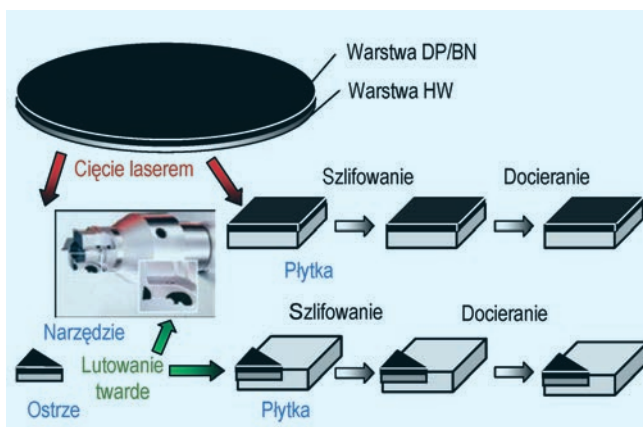
Pierwszej syntezy diamentu dokonano na początku lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Dzisiaj znanych jest kilkanaście metod jego wytwarzania i spiekania. Dość szczegółowo omówiono te zagadnienia w [8]. W zależności od zastosowanej metody, a zwłaszcza spoiwa, można uzyskać istotnie różniące się od siebie właściwościami materiały narzędziowe.

Spieki diamentowe mają wiele odmian różniących się zawartością ziaren diamentowych, wielkością i zróżnicowaniem frakcji tych ziaren, fazą wiążącą, a nawet jej brakiem. Wiele firm oferujących półfabrykaty na ostrza, płytki wieloostrowe, a także gotowe narzędzia ma bogaty asortyment tych wyrobów.

Najczęściej stosowaną fazą wiążącą do spiekania diamentu jest kobalt. Odnacza się on dobrą zwilżalnością, poprawia właściwości wytrzymałościowe i – nawet dodany do spieku zaledwie w kilkuprocentowej objętości – jako metal powoduje, że spiek zaczyna przewodzić prąd. Ma to dość istotne znaczenie z uwagi na możliwość zastosowania do wycinania i kształtowania tych niezwykle twardych i trudnoobrabialnych materiałów nie tylko laserów, ale także obróbkę elektroerozyjnych i elektrochemicznych albo obu jednocześnie.

Spieki diamentowe są zazwyczaj w procesie kształtowania spajane na stałe z płytką podkładową z węglika spiekanego. Oferowane są krążki z węglika spiekanego o średnicach nawet powyżej 100 mm z nałożoną warstwą diamentową o grubości w przedziale od 0,3 do 1,5 mm. Przy czym łączna grubość krążka może mieć wartość $1,6 \div 8$ mm. Powierzchnia zewnętrzna warstwy diamentowej jest najczęściej polerowana, aby zapewnić lepszy spływ wiórów i dobrą jakość kształtowanych powierzchni. Spiek diamentowy nie pozwala na uzyskiwanie tak dobrych jakościowo pod względem szczyratości krawędzi skrawających jak monokryształ. Dlatego tam, gdzie potrzebne są bardzo gładkie powierzchnie i duża dokładność obróbki, np. w nanotechnologiach, stosuje się ostrza z monokryształów diamentu lub bardzo drobnziarnistych jego spieków [17].

Zastosowanie na podłożu warstwy diamentowej węglika spiekanego daje wiele korzyści (rys. 3). Po pierwsze jest on ok. trzykrotnie bardziej wytrzymały na zginanie niż sam spiek diamentowy, przez co także ostrze jest bardziej wy-

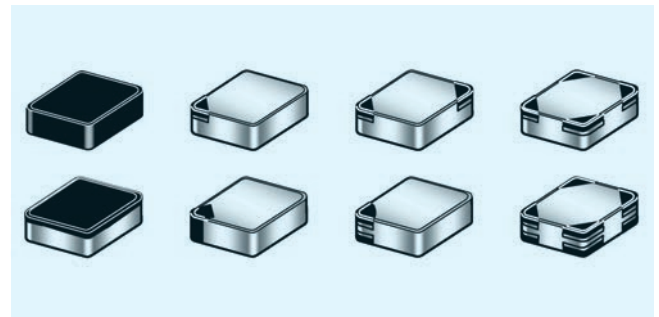


Rys. 3. Wytwarzanie narzędzi z ostrzami z materiałów supertwardych

trzymałe. Po drugie węgiel ma o połowę mniejszy od stali współczynnik rozszerzalności cieplnej, co zmniejsza naprężenia styczne po lutowaniu ostrza. Trzeba pamiętać, że spiek diamentowy w stosunku do węglika spiekanego ma również kilka razy mniejszy współczynnik rozszerzalności liniowej. Po trzecie lutowanie węglika ze stalą jest znacznie prostsze i pewniejsze niż diamentu ze stalą.

Lutowanie do korpusu narzędzia samego ostrza z diamentu lub jego spieku, także z powodu znacznych różnic w rozszerzalności cieplnej, jest dość trudne i może powodować dużą liczbę braków [8]. Dlatego do lutowania tych materiałów stosuje się bardzo kosztowne urządzenia próżniowe z laserem i specjalne luty na bazie srebra, zawierające ind i tytan, które poprawiają lutowalność, pozwalając uzyskać trwalsze i wytrzymalsze połączenie diamentu z korpusem narzędzia [8].

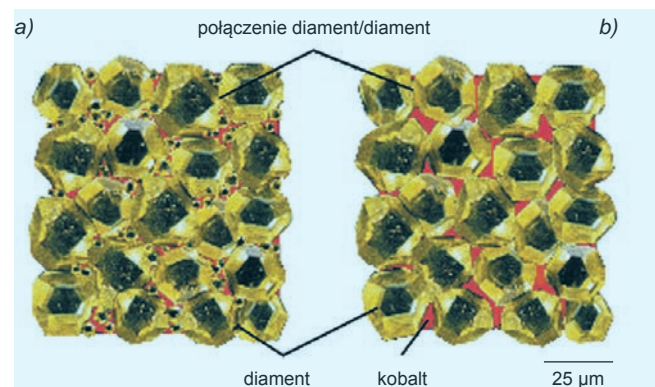
Ostrza z materiałów supertwardych są w rozmaity sposób umieszczane w wymiennych płytkach skrawających wykonanych w standardach ISO (np. rys. 4).



Rys. 4. Przykłady rozmieszczenia ostrzy z materiałów supertwardych w płytkach wymiennych [6]

Dzięki temu, że spieki diamentowe są kształtowane z losowo zorientowanych kryształów, to ostrza nie wykazują silnej anizotropowości właściwości mechanicznych.

Na spieki stosowane są różnego rodzaju frakcje diamentów o wielkości ziarna 2, 10 i 25 μm , miesza się także ziarna większe z najmniejszymi, aby uzyskać lepszą koncentrację diamentu (rys. 5).



Rys. 5. Możliwości upakowania diamentów w spieku: a) frakcje dwuziarniste $\sim 2/25$ μm , b) frakcja jednoziarnista ~ 25 μm

Spieki o mniejszej wielkości ziarna (2 μm) i koncentracji diamentu diamentu $\sim 90\%$ odznaczają się większą twardością oraz nieco mniejszą wytrzymałością krawędzi skrawających. Są przeznaczane do obróbek wykończeniowych. Znajdują zastosowanie w wiertłach, a w mniejszym stopniu – we frezach [11, 13].

Spieki o średniej ziarnistości (10 μm) i koncentracji diamentu $\sim 92\%$ są uniwersalne i stosuje się je w obróbkach średnio dokładnych.



Spieki o dużej ziarnistości (~25 µm) i koncentracji ~94% są bardzo odporne na ścieranie, mogą pracować w ciężkich warunkach obróbki zgrubnej, z dużymi prędkościami, bez stosowania płynów obróbkowych. Nadają się do frezowania.

Spieki o ziarnistości mieszanej (2 i 25 µm) mogą mieć koncentrację diamentu ≥95%. Łączą one dużą odporność na ścieranie oraz bardzo dobrą jakość krawędzi skrawającej. Dobrze znoszą ciężkie warunki pracy. Mogą być stosowane na frezy. Dobrze zdają egzamin podczas frezowania stopów aluminium z zawartością krzemu > 14%.

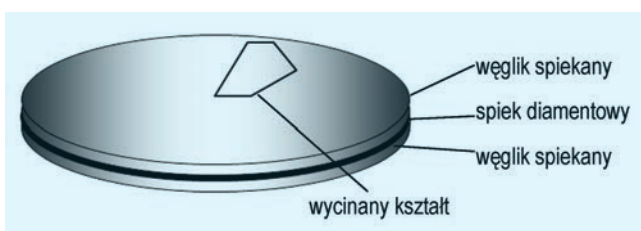
W zależności od potrzeb z krążka z nałożoną warstwą spieku diamentowego wycina się półfabrykaty ostrza, które wlotowuje się w korpus narzędzia, w wymienną kasetkę lub płytkę wieloostrzową (rys. 3 i 4). Wycinanie z pełnego krążka kilkudziesięciu ostrzy przez elektroerozyjne drążenie drutowe trwa nawet kilkanaście godzin. Proces cięcia można kilkunastokrotnie przyspieszyć, jeśli zastosuje się do tego celu wiązkę lasera. Jednakże zbyt intensywne parametry kształtowania mogą doprowadzić do znacznego zdefektowania temperaturowego stref cięcia spieku, co trzeba później usuwać z zastosowaniem niższych parametrów obróbkowych czy innych technologii. Odnosi się to do obu odmian cięcia. Elementy narzędzia z przytwierdzonymi półfabrykatami ze spieków poddawane są obróbce wykończeniowej nadającej im zadany kształt, wymiar, a także właściwą gładkość powierzchni roboczych i szczyrbałość krawędzi skrawających.

Ze względu na złą lutowność stopów tytanowych stosowanych czasami na korpusy narzędzi, aby zmniejszyć ich masę, do przytwierdzania segmentów ostrzy stosuje się klejenie i dodatkowo mocowanie mechaniczne [13].

Przykłady narzędzi z ostrzami ze spieków diamentowych

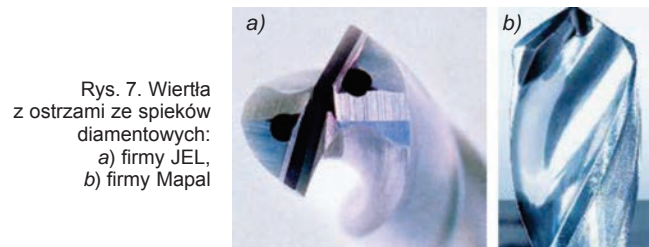
Wiertła z ostrzami ze spieków diamentowych wykonuje się w ten sposób, że półfabrykat na ostrze wycina się z warstwowego krążka, w którym spiek diamentowy znajduje się między dwiema płytkami z węglika spiekanego (rys. 6). Wycięty kształt ostrza wlotowuje się w korpus stalowy, a następnie zeszlifowuje się warstwę węglkową z miejsc stanowiących przyszlą powierzchnię natarcia, odsłaniając materiał spieku DP (rys. 7a). Obustronne podparcie warstwy spieku płytką z węglika spiekanego wzmacnia ją i ułatwia lutowanie.

Inną technologią umieszczania spieku diamentowego, stosowaną np. w firmie Mapal, jest spiekanie bezpośrednio warstwy diamentu do korpusu z węglika spiekanego (rys. 7b) lub też wyposażanie wiertła w segmenty ze spiekem tylko w narożach. Sam ścin i jego okolice są wykonane z takiego materiału jak korpus wiertła, czyli z węglika spiekanego, który w mniejszych prędkościach skrawania, jakie występują w pobliżu osi wiertła, spełnia swoją rolę nie gorzej niż znacznie bardziej kruchy spiek diamentowy.



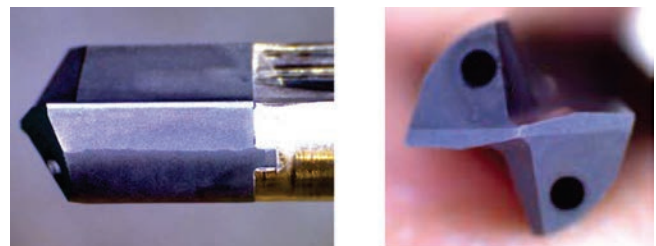
Rys. 6. Przykład wycinania segmentu ostrza wiertła z przekładkowego krążka ze spiekem diamentowym

Podczas lutowania spieków diamentowych do podłoża z węglików spiekanych należy zwrócić uwagę nie tylko na znaczne różnice wartości ich współczynników rozszerzalności cieplnej α , ale także na to, że wzajemne proporcje tych współczynników zmieniają się w różnej temperaturze [17]. Dla DP w temperaturze 20°C współczynnik $\alpha = 1,3 \times 10^{-6}/K$, a w 700°C $\alpha = 3,9 \times 10^{-6}/K$; dla węglika spiekanego w 20°C $\alpha = 4,5 \times 10^{-6}/K$, w 700°C $\alpha = 5,2 \times 10^{-6}/K$. Może to być przyczyną powstawania naprężeń cieplnych na etapie lutowania. Naprężenia te mogą się niekorzystnie sumować z naprężeniami powstającymi podczas kształtowania ostrza i/lub procesu skrawania, powodując rozwarstwianie się materiału oraz pęknięcia. Dlatego też do lutowania stosuje się urządzenia próżniowe z laserem i specjalne spoiwa lutujące na bazie srebra, zawierające indy i tytan, które gwarantują prawidłowe i wytrzymałe połączenie diamentu z korpusem narzędzia [17]. Problem ten staje się marginalny, gdy lutuje się do korpusu narzędzia elementy ostrzy wycięte z DP spieczone z podłożem z węglików spiekanych (rys. 7a).



Rys. 7. Wiertła z ostrzami ze spieków diamentowych:
a) firmy JEL,
b) firmy Mapal

W narzędziach trzpieniowych o niewielkich średnicach bardzo trudno jest wlotować ostrza wykonane z wyciętych segmentów z warstwą diamentową, głównie z powodu znacznego osłabienia rdzenia korpusu narzędzia. Dlatego niektóre firmy zamiast lutowania ostrzy bezpośrednio spiekają część diamentową z korpusem z węglika spiekanego (rys. 8). Można wówczas wykonywać narzędzia o bardzo małych średnicach. Podobnie postępuje się z ostrzami z regularnego azotku boru, o czym będzie mowa w drugiej części artykułu.



Rys. 8. Wiertło wyposażone w końcówkę ze spieku diamentowego bezpośrednio przypiekaną do korpusu narzędzia, $D = 2,5-6$ mm (Mapal)

Wytwarzane są też ostrza z polikrystalicznego diamentu uzyskanego technologiami chemicznego osadzenia z fazy gazowej CVD z zastosowaniem palników plazmowych. Otrzymuje się warstwę czystego diamentu, bez użycia spoiwa, w postaci cienkich płytek (*thick film diamond* – TFD) o grubościach rzędu nawet 0,5 mm [4]. Lutuje się je potem próżniowo w wymienne płytki o standardach ISO/ANSI. Uzyskane tym sposobem ostrza odznaczają się lepszą jakością i ostrością krawędzi skrawających od ostrzy z DP, możliwością kształtowania powierzchni o mniejszej chropowatości oraz z mniejszymi oporami skrawania korzystnymi podczas obróbki wiotkich, cienkościennych przedmiotów. Nie bez znaczenia jest też deklarowana przez producentów znacznie większa trwałość narzędzi w stosunku do tych z ostrzami ze spieków DP.

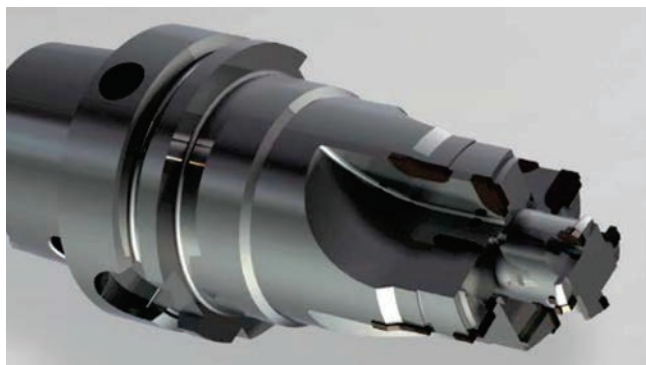
Aby zmniejszyć masę narzędzi, zwłaszcza tych do obróbki zespołowej otworów o dużych rozmiarach (rzędu 200÷350 mm), firma Mapal zastosowała spawaną konstrukcję korpusu **rozwiertaka wielostopniowego**, w którego gniazdach osadzone zostały mocowane mechanicznie ostrza ze spieków diamentowych (rys. 9), a także listwy prowadzące, również ze spieków diamentowych. Lekka konstrukcja narzędzia w wielu przypadkach ułatwia lub umożliwia automatyczną wymianę narzędzia między magazynem a wrzecionem obrabiarki.

Mimo dużych gabarytów narzędzie gwarantuje bardzo wysoką dokładność wykonania otworów (walcowość, okrągłość < 0,005 mm, klasa dokładności IT6÷7).



Rys. 9. Rozwiertak zespołowy o lekkiej konstrukcji do obróbki dużych, wielostopniowych otworów (Mapal)

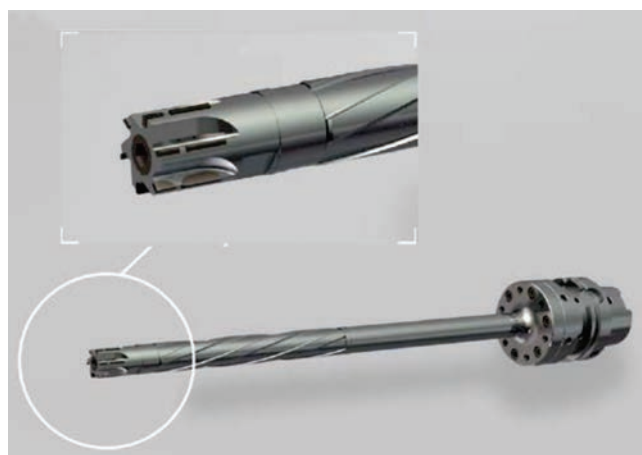
Na rys. 10 pokazano narzędzie z ostrzami z DP do obróbki złożonego otworu pokrywy głowicy silnika spalinyowego.



Rys. 10. Narzędzie zespołowe do obróbki pokrywy głowicy silnika (Gühring)

Na rys. 11 przedstawiono narzędzie z ostrzami z DP do precyzyjnej obróbki wielostopniowego otworu do mocowania łożysk wałka rozrządu. Głowiczka kształtująca otwór umiejscowiona jest na przedłużaczu z węgla spiekowego, wyposażonym w śrubowe przewodnice zapewniające nie tylko dużą sztywność, ale także bardzo dobre przewodzenie. Narzędzie to ma centralnie położoną specjalną śrubę do sprężystego ustawiania średnicy położenia ostrzy, a także listew prowadzących. Można też precyzyjnie korygować drugi stopień średnicy narzędzia za pomocą zmiany położenia kąтового sprężysto zamocowanych segmentów z ostrzami skrawającymi.

Na rys. 12 pokazano narzędzie zespołowe do obróbki wielostopniowego otworu o średnicach rzędu 280 mm. Jest ono wyposażone w ostrza ze spieków diamentowych, znajduje się w kasetkach zapewniających bardzo



Rys. 11. Narzędzie z ostrzami DP (Gühring)

precyzyjne ustawianie ostrzy. Łącznie z listwami prowadzącymi pozwala to na wykonywanie wymiarów w klasie IT6. Należy zwrócić uwagę na to, że umieszczanie ostrzy nie bezpośrednio w korpusie narzędzia, a poprzez nastawialne kasetki nie wymusza niezwykle precyzyjnego kształtowania krawędzi skrawających względem części chwytowej narzędzia, bo można to zrealizować za pomocą ustawiania. Kasetki takie mogą też być ułatwieniem podczas regeneracji narzędzia.

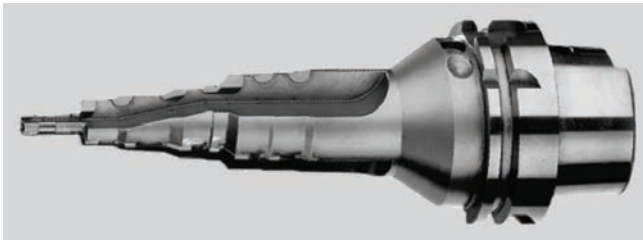


Rys. 12. Narzędzie z ostrzami DP (Gühring)

Na rys. 13 przedstawiono narzędzie zespołowe z ostrzami z DP do obróbki wielostopniowego otworu. Otwory wykonywane są w klasie H7, z prędkością obrotową 11 600 obr/min. Liczba obrobionych przedmiotów między regeneracjami narzędzia to 250 000 szt.

W wielu przypadkach stosowane są narzędzia o budowie dzwonowej z ostrzami umiejscowionymi we wnętrzu. Narzędzia takie mogą frezować obiegowo powierzchnie zewnętrzne osiowo-symetryczne lub np. kształtować powierzchnie czopów, pracując jako pogłębiacze/rozwiertaki zewnętrzne. Przykład tego drugiego rodzaju narzędzia pokazano na rys. 14.

Ostrza z DP takich narzędzi pozwalają obrabiać stopy aluminiowe z bardzo dużymi prędkościami skrawania.

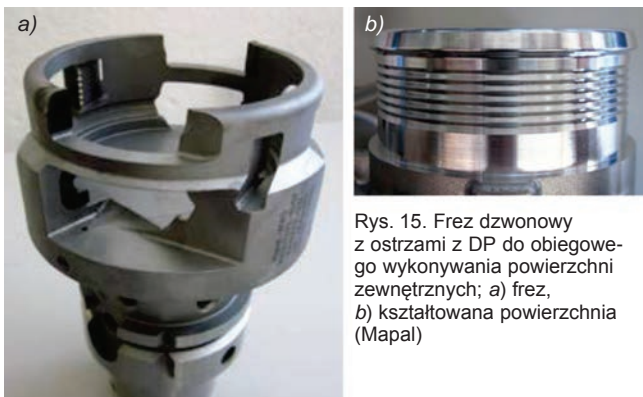


Rys. 13. Narzędzie zespolone z ostrzami DP (Mapal)



Rys. 14. Poglębiacz zewnętrzny z ostrzami DP (Gühring)

Duże obroty wywołują znaczne siły odśrodkowe narażające korpusy tych narzędzi na odkształcenia, które mogą utrudniać zachowanie zazwyczaj dość ciasnych pól tolerancji obróbkowych. Można temu przeciwdziałać za pomocą wzmocnień pierścieniowych (rys. 15).



Rys. 15. Frez dzwonowy z ostrzami z DP do obiegowego wykonywania powierzchni zewnętrznych; a) frez, b) kształtowana powierzchnia (Mapal)

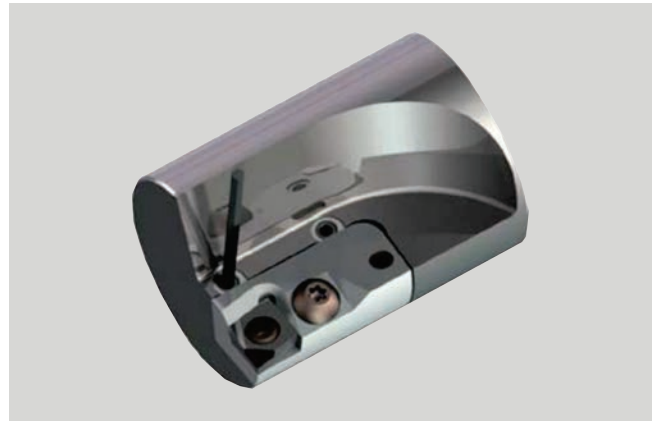
Na rys. 15 zaprezentowano frez dzwonowy z umieszczonymi wewnątrz ostrzami z DP w „zamkniętej konstrukcji”. Narzędzia takie odznaczają się dużą sztywnością, pozwalającą na zwiększenie parametrów obróbki, pracę bez drgań i zachowanie bardzo dobrej jakości powierzchni (rys. 15 a).

Narzędzia dzwonowe z wewnętrznymi ostrzami, czasami o zwiokrotnionej ich liczbie, mogą znacznie skomplikować technologię precyzyjnego kształtowania krawędzi i powierzchni roboczych. Zazwyczaj eliminowana jest z niej obróbka elektroerozyjna drążeniem drutowym i szlifowanie z uwagi na trudną dostępność miejsca.

Niektóre firmy, np. Mapal, opanowały technikę precyzyjnego kształtowania wykończeniowego powierzchni z materiału supertwardego za pomocą wiązki lasera padającej na nią nie stycznie, a prostopadle. Taką technologią wykonano przedstawione narzędzie.

Na rys. 16 pokazano przykład mocowania i regulacji kasetki w korpusie narzędzia. Sama regulacja może być wykonywana na różne sposoby [6, 12], np.: tak jak na rysunku, za pomocą klinów wsuwanych między korpus narzędzia a kasetkę, za pomocą czopów z powierzchniami mimośrodowymi oraz – bardzo często – odchylanym sprężycie kasetek z ostrzami. Takie rozwiązanie jest

szczególnie korzystne w przypadku niezwykle ciężkich warunków pracy narzędzi i koniecznych częstych wymian ostrzy.



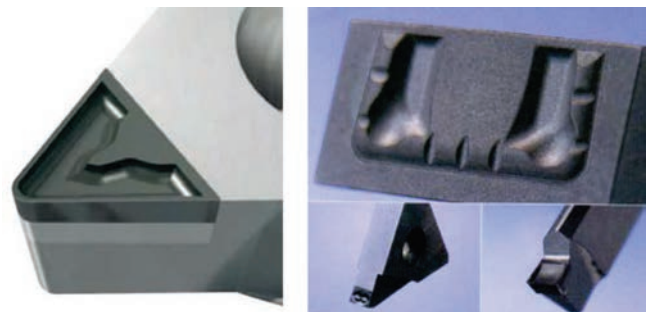
Rys. 16. Narzędzie z kasetką do mocowania płytek wymiennych z ostrzami z materiałów supertwardych (Gühring)

Łamacze wiórów

Ostrza ze spieków diamentowych mają zazwyczaj bardzo gładką, płaską powierzchnię natarcia usytuowaną pod dodatnim bądź zerowym kątem natarcia. Większość materiałów obrabianych takimi ostrzami to metale nieżelazne, o małym oporze właściwym skrawania, które można kształtować z bardzo dużymi prędkościami. Te oba czynniki powodują, że z jednej strony następuje bardzo dobre oddzielenie wiórów, a z drugiej strony mogą one mieć niekorzystną postać.

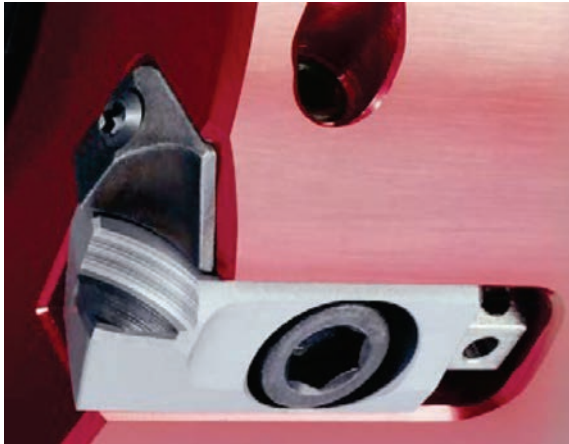
Wiór wstęgowy, uderzający z bardzo dużą prędkością w obrabianą powierzchnię, może ją uszkodzić, a nawet wbić się w nią i ulec przypawaniu. Ponadto wiór ciągły skłębiony może znacznie utrudniać, a nawet uniemożliwić obróbkę, zwłaszcza gdy jest ona realizowana bez nadzoru lub z ograniczonym nadzorem pracownika. Wyjściem z tej sytuacji mogłoby być ukształtowanie łamacza na powierzchni natarcia w postaci rowka. Jednak spiek diamentowy jest jednym z najgorzej obrabialnych materiałów. Zatem takie łamacze wiórów formuje się jedynie w razie konieczności, a dokonuje się tego najczęściej za pomocą drążenia laserowego.

Przykłady ostrzy płytek wymiennych z takimi łamaczami przeznaczonych do przecinania i wykonywania kanałków przedstawiono na rys. 17.



Rys. 17. Ostrza ze spieków diamentowych z ukształtowanymi laserem zwijaczami wiórów [10, 16]

Czasami łamacze wiórów wykonuje się w wersji nakładanej, mogą one wówczas jednocześnie pełnić funkcję ochrony korpusu narzędzia przed ściernym oddziaływaniem wiórów (rys. 18).



Rys. 18. Kasetka/wkładka z ostrzem ze spieków diamentowych do głowicy frezowych z nakładanym łamaczem wiórów (Mapal WSS)

Interesujące rozwiązanie problemów z usuwaniem wiórów ze strefy skrawania, a zwłaszcza z wąskiej szczeliny między głowicą frezu a obrabianą powierzchnią, zaproponowały firmy Mapal (rys. 19a) oraz Gühring (rys. 19b). Wióry, które pierwotnie dostawały się w strefę pod czoło głowicy, powodowały rysowanie i zacieranie obrabianej powierzchni. W obecnym rozwiązaniu są one kierowane do specjalnie ukształtowanych kieszeni znajdujących się w kasetkach mocujących ostrza diamentowe. Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest ochrona korpusu narzędzia przed wycieraniem przez trące o nią z dużą prędkością wióry. W komorach na wióry w pobliżu krawędzi skrawających znajdują się kanały doprowadzające płyn obróbkowy bezpośrednio w strefę oddzielania materiału. Wirująca głowica wywołująca siłę odśrodkową zwiększa skuteczność podawania płynu obróbkowego, a także wyrzuca wióry z komór na zewnątrz powierzchni bocznych narzędzia.



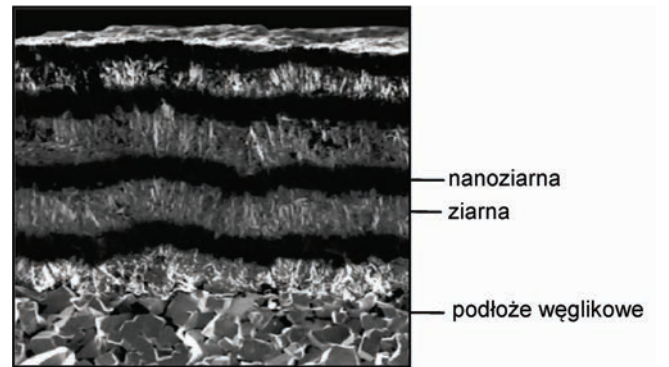
Rys. 19. Głowica frezu z kasetkami z komorami do odprowadzania wiórów: a) rozwiązanie firmy Mapal, b) rozwiązanie firmy Gühring-Hollfelder

Powłoki diamentowe

Powłoki diamentowe są wytwarzane z wykorzystaniem technologii CVD (*chemical vapour deposition*), zazwyczaj w wysokiej temperaturze, dlatego nie nanosi się ich na stale szybkołnące, które mogłyby ulec odpuszczeniu. Powłoki diamentowe powstają w wyniku rozpadu $C_2H_4 \rightarrow C_2 + H_4$ w warunkach bardzo niskiego ciśnienia,

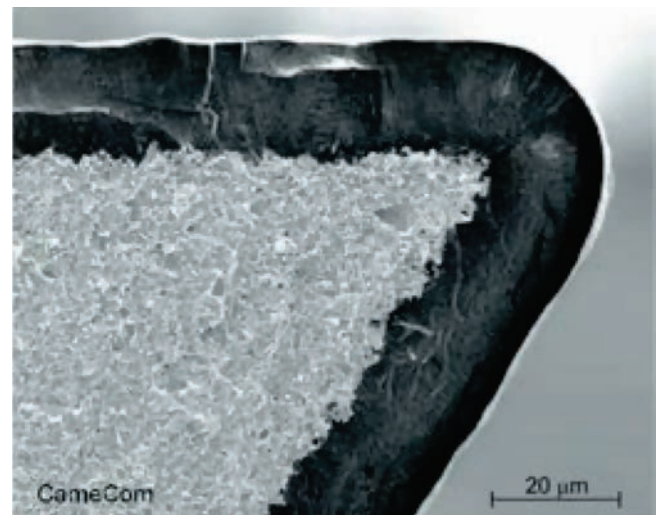
strumienia plazmy i pulsującego pola elektrycznego. Wodór jest odpompowywany z komory, natomiast węgiel krystalizuje się na powierzchniach roboczych ostrzy w sieci regularnej przestrzennie centrowanej.

Obecnie wytwarza się też powłoki wielowarstwowe, charakteryzujące się naprzemiennymi strukturami nano- i średnioziarnistymi (rys. 20). Przyczynia się to do większej relaksacji naprężeń między warstwami nakładanego diamentu, mniejszej ich wrażliwości na pękanie, a także pozwala na otrzymanie bardzo drobnoziarnistej struktury na powierzchni zewnętrznej. Taka struktura poprawia spływ wiórów i umożliwia uzyskanie mniejszej szczyrbałości krawędzi. Ponieważ powłoka jest z czystego diamentu, to konsekwencją tego jest brak przewodnictwa elektrycznego, co wyklucza obróbki wspomagane prądem.



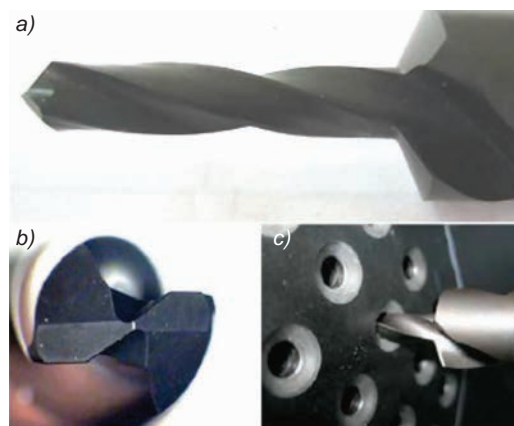
Rys. 20. Widok przekłomu wielowarstwowej powłoki diamentowej CC Dia®Tiger (CameCon)

Pewną niedogodnością ostrzy z powłoką diamentową jest – podobnie jak przy innych powłokach przeciwzuzyciowych – zwiększenie promienia zaokrąglenia krawędzi skrawających (rys. 21). Tymczasem od ostrzy diamentowych wymaga się zazwyczaj ostrych krawędzi, co można dość łatwo osiągnąć na spiekach diamentowych, a znacznie trudniej na ostrzach węglkowych z powłoką o określonej grubości. Tam, gdzie stosuje się narzędzia o złożonych kształtach, np. w wiertłach i frezach trzpieniowych, zalecane jest więc wykonanie ich jako pełnowęglkowych i naniesienie na ostrza powłok diamentowych o bardzo małej grubości, nawet rzędu 1 μm . Jest to kompromis między łatwiejszym wytwarzaniem narzędzi a zapewnieniem im dobrych możliwości oddzielania materiału i odporności na zużycie.



Rys. 21. Zwiększone zaokrąglenie krawędzi skrawającej po nałożeniu powłoki diamentowej (CameCon)





Rys. 22. Wiertłopogłębiacz pełnowęglkowy z powłoką diamentową: a) widok z boku, b) widok od czoła, c) proces wiercenia kompozytu (Mapal)

Wiertłopogłębiacz pełnowęglkowy o zoptymalizowanej geometrii, z powłoką diamentową (rys. 22), do obróbki otworów pod nity w materiałach kompozytowych zapewnia:

- bardzo dobrą jakość obrabianych powierzchni,
- dokładność wykonania średnicy otworu w klasie IT8,
- stosowanie dwukrotnie większych posuwów w porównaniu z klasycznymi wiertłami,
- dziesięciokrotnie większą trwałość,
- możliwość obróbki na sucho.

Narzędzia z ostrzami ze spieków diamentowych mimo wysokiej ceny jednostkowej są coraz częściej stosowane w wysoko wydajnych procesach obróbki skrawaniem w różnych gałęziach przemysłu. Wynika to nie tylko z ich bardzo dobrych właściwości skrawnych, wyrażających się wysoką jakością kształtowanych powierzchni, dokładnością obróbki i niezwykle długimi okresami trwałości, ale także z efektywności technicznej i ekonomicznej ich zastosowania.

LITERATURA

1. Bakul W.N., Zacharienko I.P., Kunikin J.A., Milsztajn M.Z. „Ostrzenie narzędzi ściernicami diamentowymi”. Warszawa: WNT, 1975.
2. Dobrzański L.A. „Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe”. Warszawa: WNT, 2006.
3. Dobrzański L.A. „Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo – Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego”. Warszawa: WNT, 2002.
4. Dopierała A. „KD1405 – czysty diament polikrystaliczny”. *Mechanik*. 12 (2004): s. 804–805.
5. Cichosz P. „Efektywność kształtowania skrawaniem przedmiotów osiowoosymetrycznych w zintegrowanym wytwarzaniu”. Wrocław: Oficyna Wydawnicza PWr, 1998.
6. Cichosz P. „Narzędzia skrawające”. Warszawa: WNT, 2006.
7. Cichosz P., Kuzinovski M. „Ekonomiczne aspekty doboru narzędzi skrawających do zadania produkcyjnego. Obróbka skrawaniem – wysoka produktywność”. Wrocław: Oficyna Wydawnicza PWr, 2007.
8. Jaworska L. „Diament – Otrzymywanie i zastosowanie w obróbce skrawaniem”. Warszawa: WNT, 2009.
9. Legutko S. „Materiały narzędziowe w obróbce skrawaniem”. *Mechanik*. 12 (2004): s. 835–841.
10. Materiały informacyjne firmy DMG MORI.
11. Materiały informacyjne firmy Element Six.
12. Materiały informacyjne firmy Gühring.
13. Materiały informacyjne firmy Mapal.
14. Materiały informacyjne firmy Sandvik Coromant.
15. Materiały informacyjne firmy SECO.
16. Materiały informacyjne firmy TIZ TOOLS.
17. Stobierski L. (red). „Spiekane materiały narzędziowe przeznaczone na ostrza narzędzi do obróbki z wysokimi prędkościami skrawania”. Kraków: Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, 2014.
18. Wysiecki W. „Nowoczesne materiały narzędziowe”. Warszawa: WNT, 1997.