

Narzędzia skrawające z materiałów supertwardych

Cz. II. Ostrza z regularnego azotku boru

Cutting tools from super-hard materials Part II. Blades of regular boron nitride

PIOTR CICHOSZ
MIKOŁAJ KUZINOVSKI
MITE TOMOV*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.120>

English version available on: www.mechanik.media.pl

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 wykorzystania tych narzędzi. 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

Materiał supertwardy – regularny azotek boru (BN)

Regularny azotek boru jest drugim obok diamentu materiałem supertwardym. Nie występuje w przyrodzie. Jest otrzymywany sztucznie w procesach syntezy zbliżonych do tych, w jakich wytwarza się diamenty – w wysokiej temperaturze i pod wysokim ciśnieniem, w obecności katalizatorów. Może on krystalizować w odmianie wurcytowej oraz w sieci heksagonalnej BN₄. W temperaturze 1200°C i pod ciśnieniem >4 GPa w azotku boru zachodzi przemiana fazowa w sieć regularną, przestrzenną, płaskocentryczną BN₂, a więc podobną do diamentu. Azotek boru ma zbliżoną gęstość i tylko nieco mniejszą przewodność cieplną niż diament. Ze względu na złożony proces syntezy i spiekania ostrza z regularnego azotku są równie drogie jak diament, a nawet do 30% droższe.

Regularny azotek boru ma wiele pozytywnych właściwości, zwłaszcza w porównaniu z diamentem. Do jego zalet można zaliczyć:

- bardzo dużą twardość ≤ 6000 HV,
- bardzo małą reaktywność z większością materiałów obrabianych, w tym z żelazem,
- dużą odporność temperaturową dochodzącą do 1400°C,
- bardzo dużą przewodność cieplną $\lambda = 60 \div 120$ W/(m·K),

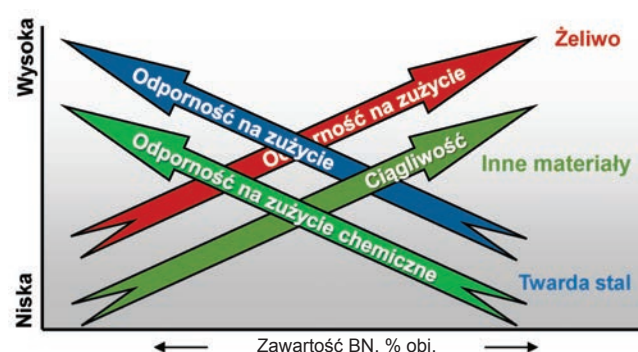
- mały współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej $\alpha = 2,8 \div 3,2 \cdot 10^{-6}/K$,
- w dużym stopniu izotropowe właściwości mechaniczne spieku,
- możliwość stosowania chłodziwa,
- możliwość kształtowania z niego wieloostrowych, monolitycznych płytek wymiennych,
- możliwość przeostrzania narzędzi [4].

Materiał ten ma też wady, np.:

- dużą kruchość,
- niezbyt wysoką wytrzymałość na zginanie $R_g < 1000$ MPa, choć o ok. 10÷30% większą niż ceramika i 350% większą niż diament,
- konieczność stosowania ścinów powierzchni natarcia (fazek ochronnych) lub niewielkich zaokrągłeń krawędzi wzdłuż ostrzy skrawających, ochraniających je przed wykruszaniem (rys. 4),
- bardzo trudną obrabialność,
- wysoką cenę.

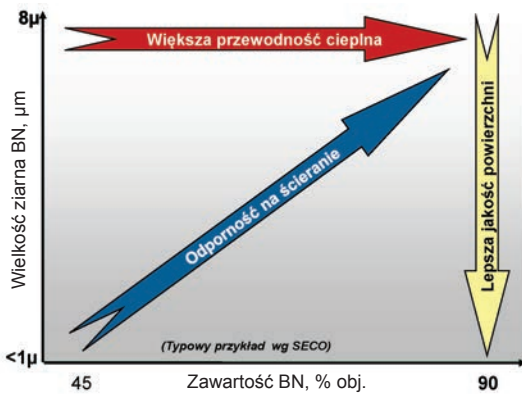
Wymienione właściwości BN należy traktować jedynie orientacyjnie. W dużej mierze zależą one bowiem od składu spieku, przede wszystkim od rodzaju fazy wiążącej, zwłaszcza gdy jest nią ceramika zwiększająca odporność na zużycie chemiczne. Fazą wiążącą może być też kobalt poprawiający wytrzymałość na zginanie i odporność na kruche pękanie [14]. Zawartość regularnego azotku boru w niektórych gatunkach spieków może się wahać w granicach 25÷95% [11]. Ponadto niektóre właściwości – takie jak rozszerzalność liniowa i przewodność cieplna – zmieniają się wraz ze zmianami temperatury, i to czasami dość istotnie. Zatem właściwości fizykochemiczne spieków supertwardych podawane w różnych źródłach odbiegają od siebie.

Orientacyjny wpływ zawartości BN w spieku na jego właściwości skrawne i inne właściwości fizyczne przedstawiono na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Wpływ zawartości BN na jego właściwości skrawne [15]

* Prof. dr hab. inż. Piotr Cichosz (piotr.cichosz@pwr.edu.pl) – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej; prof. dr inż. Mikołaj Kuzinowski (mikolaj.kuzinowski@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

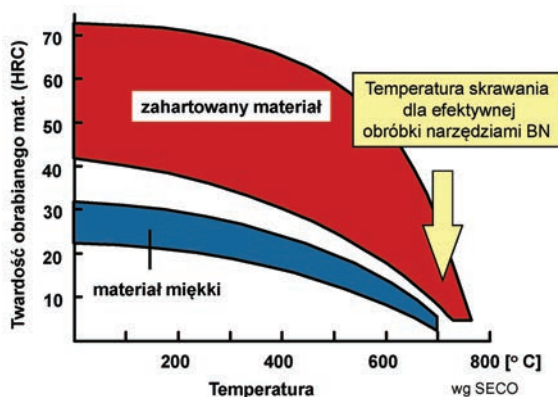


Rys. 2. Zależność wybranych właściwości spieków z regularnego azotku boru od wielkości ziarna i jego zawartości objętościowej

Najkorzystniejszą właściwością BN, oprócz dużej twardości, wydaje się brak powinowactwa z żelazem, co sprawia, że można go stosować do obróbki stali i żeliw, a więc podstawowych materiałów konstrukcyjnych elementów maszyn. Z racji bardzo dużej twardości i związanej z tym odporności na ścieranie (kilkanaście razy większej niż węglików spiekanych) oraz wysokiej odporności temperaturowej jest on niemal idealnym materiałem do kształtowania materiałów w stanie zahartowanym (55÷68 HRC), twardych napawanych materiałów, metali proszkowych lub wszędzie tam, gdzie wymagane są bardzo długie okresy trwałości, np. w obróbkach wykończeniowych dużych powierzchni, w których wymiana narzędzia podczas skrawania może niedopuszczalnie zakłócać ich strukturę geometryczną.

Jeśli efektywność ekonomiczna obróbki jest ważniejsza niż bardzo długie okresy trwałości, można racjonalnie zwiększyć prędkość skrawania narzędziami o ostrzach z BN – nawet 5-krotnie w porównaniu z ostrzami węglowymi.

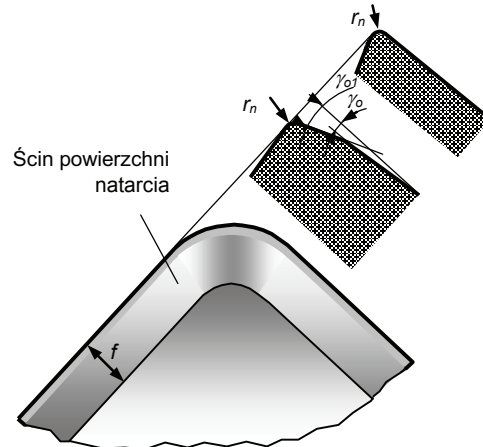
Ze względu na bardzo dużą odporność temperaturową spieków BN oraz zachowanie dobrych właściwości mechanicznych w wysokiej temperaturze zaleca się stosować obróbkę tymi materiałami w temperaturze 700÷800°C, gdy twardość materiałów obrabianych ulega znacznie większemu obniżeniu niż twardość spieku (rys. 3).



Rys. 3. Zależność twardości materiału obrabianego od temperatury

Regularny azotek boru stosowany jest najczęściej w bardzo trudnych warunkach obróbki, gdy materiał skrawany jest bardzo twardy, skrawanie jest prowadzone ze znacznymi prędkościami, a nawet gdy praca ma charakter udarowy. Bardzo duża twardość spieku BN skutkuje jego małą udarnością, stąd konieczność ochrony ostrza przed wykruszeniami. Służy temu zaokrąglanie krawę-

dzi skrawających małym promieniem r_n oraz/lub ścin powierzchni natarcia, zwany popularnie fazką ochronną (rys. 4). Szerokość ścinu oraz kąty natarcia γ_o i γ_{o1} zależą od warunków pracy ostrza. Im są cięższe, tym szersze fazki i pod bardziej ujemnymi kątami natarcia. Najczęściej mają one: szerokość $f = 0,2$ mm i kąt $\gamma_{o1} = -20^\circ$. W lżejszych warunkach pracy oraz tam, gdzie potrzebne są małe siły skrawania, bywają stosowane ostrza z dodatnimi kątami natarcia γ_o oraz bez ścinów ochronnych.



Rys. 4. Przykłady ochrony ostrzy z BN przed wykruszeniem krawędzi skrawających

Dopuszczalność stosowania płynów obróbkowych podczas skrawania ostrzami z BN ma mniejsze znaczenie ze względu na trwałość ostrza, ale może być istotna ze względu na możliwość uzyskania lepszej jakości powierzchni obrabianej.

Głównym obszarem zastosowań BN, jak wspomniano, jest obróbka na twardo, czyli obróbka skrawaniem materiałów w stanie utwardzonym. Ten rodzaj obróbki ma wiele zalet, a głównymi powodami jej rosnącej popularności są:

- uproszczenie technologii (wyeliminowanie ze środka łańcucha technologicznego operacji obróbki cieplnej i związanego z nią transportu międzywydziałowego),
- możliwość stosowania obróbki kompletnej (cały proces technologiczny odbywa się na jednej obrabiarce),
- większa wydajność objętościowa i ekonomiczność skrawania w porównaniu ze szlifowaniem,
- mniejsza uciążliwość dla środowiska ze względu na brak płynów obróbkowych,
- obrabiarki do obróbki skrawaniem są znacznie tańsze od szlifierek,
- mniejszy park maszynowy (mniej lub brak szlifierek),
- technologie skrawania trochoidalnego zmniejszają temperaturę skrawania,
- większa dokładność obróbki powierzchni sprzężonych wymiarowo (dzięki możliwości zmniejszenia liczby operacji – przemocowań przedmiotu),
- większa elastyczność procesu w porównaniu ze szlifowaniem,
- krótsze czasy t_{pz} (przygotowawczo-zakończeniowe) i t_{wn} (wymiany narzędzia) ze względu na łatwiejsze przezbieranie obrabiarki, jeśli stosuje się narzędzia skrawające, a nie narzędzia ściernie i szlifierki,
- większe możliwości kształtowania narzędziami skrawającymi w porównaniu z narzędziami ściernymi z uwagi na: możliwość zastosowania wielokrotnie większej liczby narzędzi na jednej obrabiarce oraz prostszą ich regenerację poprzez zmianę/zamianę naroża płytki skrawającej,

- podczas toczenia kształty zewnętrzne i wewnętrzne mogą być wykonywane na tej samej obrabiarce, a w przypadku szlifowania nie zawsze jest to możliwe; może to prowadzić do zmniejszenia liczby operacji oraz zwiększenia dokładności obróbki powierzchni sprzężonych.

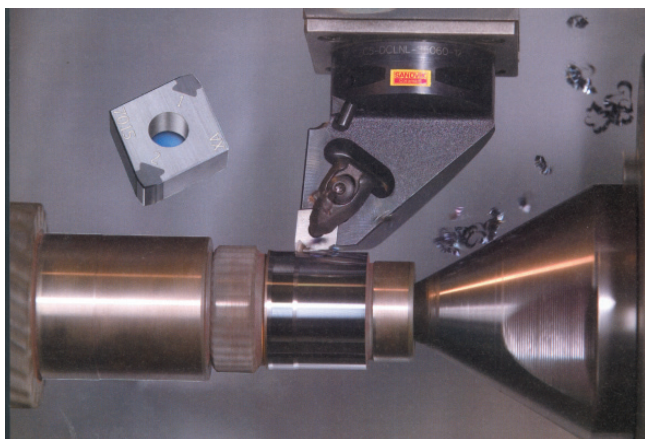
Przykłady narzędzi z ostrzami ze spieków z regularnego azotku boru

Ostrza z regularnego azotku boru i z tzw. geometrią Xcel pozwalają przy posuwach $\leq 0,4$ mm uzyskiwać chropowatość powierzchni $Rz < 6,3 \mu\text{m}$, a tym samym redukować czas obróbki nawet o 50% (rys. 5).

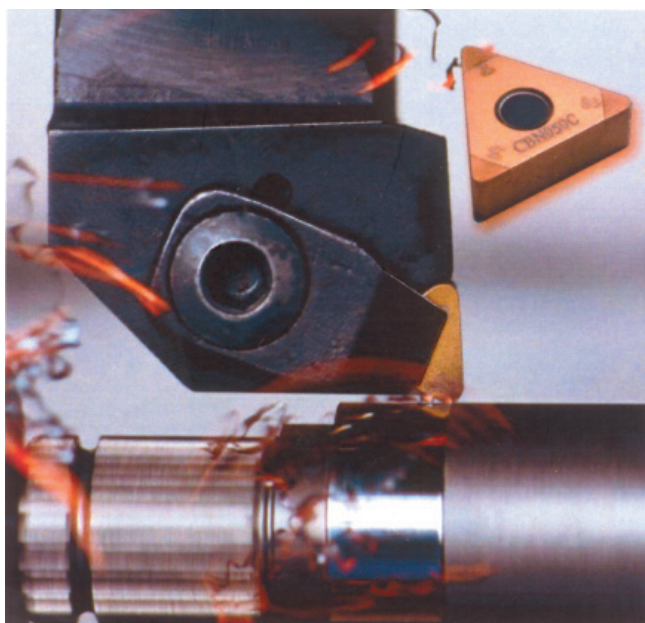
Nawet materiały o bardzo dobrych właściwościach skrawnych, takie jak BN, bywają zabezpieczone powłokami ochronnymi. Przykład obróbki toczeniem takimi ostrzami pokazano na rys. 6.

Na rys. 7 znajdują się przykłady narzędzi – płytek skrawających z ostrzami z BN – oraz wyrobów, których złożone powierzchnie są kształtowane tymi narzędziami.

Na rys. 8 przedstawiono frez dzwonowy do frezowania obiegowego powierzchni zewnętrznych. Widać charakterystyczne pierścienie wzmacniające i usztywniające konstrukcję. Pozwalają one na zwiększanie prędkości obroto-



Rys. 5. Przykład obróbki zahartowanego wałka ostrzami z BN [14]



Rys. 6. Przykład wysoko wydajnego toczenia narzędziem z wkładką ostrzową z BN w gatunku Secomax CBN050C z naniesioną powłoką PVD-Ti, Si-N i kondycjonowanymi krawędziami [15]



Rys. 7. Przykłady wyrobów dla przemysłu motoryzacyjnego i narzędzi z ostrzami z BN do kształtowania w stanie utwardzonym (Gühring)

wych oraz uzyskanie lepszej dokładności obróbki. System dzwonowy konstrukcji podnosi wydajność skrawania także dlatego, że ostrza w tego typu narzędziach mają większą drogę kontaktu obwodowego z przedmiotem obrabianym niż klasyczny frez zewnętrzny. Jednak taka konstrukcja frezu komplikuje, a czasami nawet uniemożliwia finalne kształtowanie krawędzi skrawających ze względu na utrudniony dostęp do nich. Pewnym obejściem tego problemu może być zastosowanie konstrukcji składanej, w której pierścienie usztywniające są mocowane mechanicznie (rys. 8).



Rys. 8. Przykład frezu dzwonowego z BN do kształtowania w stanie utwardzonym (Gühring)

Na rys. 9 pokazano rozwiertaki z BN firmy Mapal do obróbki małych otworów w stalach o twardości 60 HRC. Narzędzia te oferowane są ze średnicami w zakresie $1 \div 10$ mm. Na uwagę zasługuje to, że w przypadku bardzo małych średnic narzędzi, gdy występują trudności z lutowaniem segmentów ostrzy, całe końcówki tych narzędzi ze spieków supertwardych są spiekane nie do płytki podporowej (rys. 3 w [19]), lecz bezpośrednio do korpusu narzędzia wykonanego z węgla spiekane (rys. 9).



Rys. 9. Rozwiertaki z BN do obróbki małych otworów (Mapal)

Narzędzia z materiałów supertwardych bardzo często kształtują powierzchnie, w przypadku których wymagana jest duża dokładność. Bywa, że po wykonaniu nawet kilkudziesięciu tysięcy przedmiotów zachowana jest wystarczająca jakość powierzchni, ale wymiary zaczynają się zbliżać do granic pola tolerancji. Wówczas można dokonać korekcy wymiarowej narzędzi poprzez przemieszczenie samej kasetki z ostrzem (rys. 16, 18, 19 w [19]) lub odkształcenie sprężyste korpusu – jak pokazano na rys. 10. Wkręcając śubę z łbem stożkowym w korpus narzędzia, można w prosty sposób kilkakrotnie dokonywać niewielkich korekcy średnicy rozwiertaka, znacznie przedłużając okres jego eksploatacji. Taka regeneracja nie wymaga specjalistycznego ostrzenia, często połączonego z wymianą ostrzy.

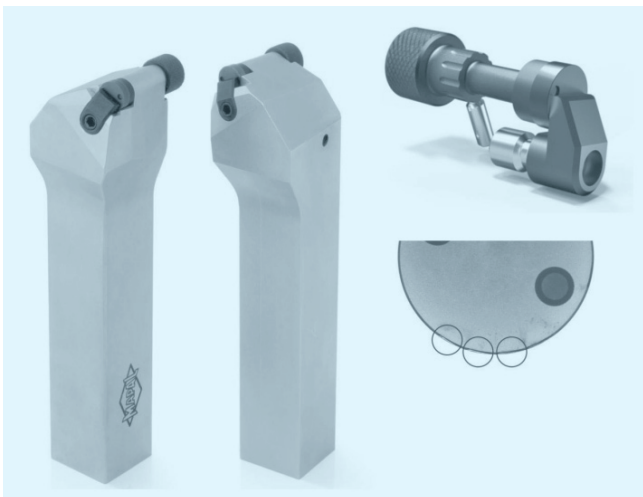


Rys. 10. Rozwiertak nastawny z możliwością korekcy średnicy (Gühring)

Regeneracja narzędzi

Płytki okrągłe, w tym z materiałów supertwardych, można mocować w gniazdach korpusów narzędzi składanych w wielu położeniach kątowych, uzyskując możliwość dużej liczby regeneracji krawędzi. Ułatwia to pokazany na rys. 11 mechanizm do indeksowania kąтового położenia ostrza. Pokrętło w dolnej części narzędzia ułatwia manipulację gorącą płytką, która intensywnie się nagrzewa, zwłaszcza gdy jest to płytka wykonana ze spieku BN, który ma niezwykle dużą przewodność cieplną.

Narzędzia z ostrzami z materiałów supertwardych można regenerować. Jeśli ostrza są umieszczone w standardowych płytkach wymiennych – np. stosowanych w nożach tokarskich, wiertłach czy głowicach frezowych – to



Rys. 11. Noże tokarskie z mechanizmem do mocowania i indeksowania kąтового okrągłych płytek (Mapal)

przywrócenie im właściwości skrawnych poprzez obrót lub wymianę płytki jest proste, a kosztuje niewiele więcej niż jedno naroże. Proces regeneracji narzędzia, w którym segmenty z ostrzami są lutowane, polega zazwyczaj na tym, że zużyte ostrza wymieniane są na nowe, a odzyskiwany jest jedynie korpus narzędzia. Jest to kosztowne i może stanowić nawet 60% ceny nowego narzędzia, ale uzyskuje się produkt o niemal takiej samej funkcjonalności jak przed regeneracją. Z uwagi na wycieranie się korpusu, a także pewien stopień zużycia części chwytowej, takie regeneracje stosuje się zazwyczaj nie więcej niż 2÷3 razy. Należy też zwrócić uwagę, że postępujący proces wycierania się ostrzy oraz korpusu narzędzia może prowadzić do pogorszenia wyważenia dynamicznego, co jest istotne, ponieważ tego typu narzędzia pracują zazwyczaj z bardzo dużymi prędkościami obrotowymi.

Obraz wielostopniowego pogłębiacza z ostrzami ze spieku supertwardego i wyraźnie widocznymi śladami wytarcia korpusu narzędzia – po obróbce kilkuset tysięcy przedmiotów i kilkakrotnej regeneracji – zamieszczono na rys. 12. Zatem nie tylko po wykonaniu nowego narzędzia, ale także po każdym przywróceniu mu właściwości skrawnych powinno zostać przeprowadzone wyważenie dynamiczne.



Rys. 12. Ślady wytarcia korpusu narzędzia z ostrzami ze spieków diamentowych po obróbce kilkuset tysięcy przedmiotów (według Mapal)

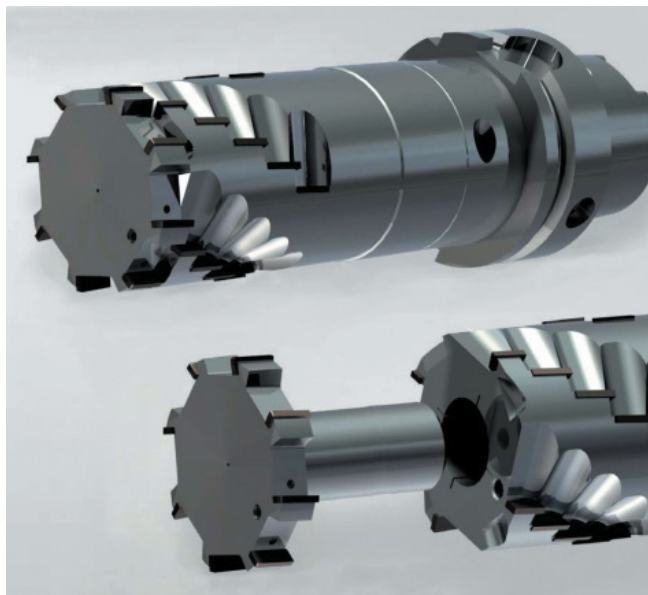
Istotną rolę – nie tylko w przypadku jakości powierzchni kształtowanych narzędziami wieloostrzowymi, ale także ze względu na trwałość tych narzędzi – odgrywa bardzo małe bicie promieniowe i osiowe krawędzi skrawających. W narzędziach z ostrzami lutowanymi jest to zapewnione przez dokładne ostrzenie. Natomiast tam, gdzie ostrza mają postać wymiennych płytek, bardzo korzystne jest mocowanie ich w kasetkach, które można precyzyjnie ustawiać na wymiar, np. tak jak pokazano na rys. 18 i 19 w [19].

W rozwiertakach, w tym wielostopniowych (np. rys. 9 w [19]), stosowane są najczęściej listwy prowadzące ze spieków diamentowych. Regeneracja takich narzędzi obejmuje, oprócz wymian i ponownego ostrzenia segmentów ostrzy, także analogiczną regenerację listew prowadzących.

Narzędzia wieloostrzowe, jeśli są tzw. narzędziami składanymi, czyli z ostrzami mocowanymi mechanicznie, regeneruje się – jak wspomniano – poprzez zmianę naroża wymiennej płytki, zazwyczaj wielokrawędziowej. Możliwe są nawet takie warianty regeneracji, że wymienia się tylko ostrza, które się zużyły, pozostawiając te z niezłym zużyciem [5]. Podobny sposób regeneracji narzędzi wieloostrzowych, ale w odniesieniu do narzędzi z ostrzami lutowanymi, można przenieść i do tej grupy narzędzi. W tym przypadku można podzielić narzędzie na sekcje, w których ostrza zużywają się ze zdecydowanie różną

intensywnością. Wówczas, regenerując narzędzie, wymienia się tylko tę część, a nie całe narzędzie. Taka regeneracja jest zdecydowanie tańsza, szybsza i może być dokonywana przez użytkownika za pomocą dostarczonej przez producenta narzędzi części.

Przykład takiego narzędzia, regenerowanego według opisanej strategii, pokazano na rys. 13. Składa się ono z 2 odrębnych segmentów.



Rys. 13. Przykład frezu 2-sekcyjnego (Gühring)

Jeśli narzędzie z ostrzami lutowanymi nie jest podzielone na odrębne sekcje, to zazwyczaj nie można go regenerować przez wymianę zużytego ostrza. Wynika to z niebezpieczeństwa naruszenia położenia pozostałych ostrzy podczas nagrzewania korpusu narzędzia, które jest konieczne, aby wylutować wymieniane ostrza.

Warunkiem skuteczności częściowej regeneracji narzędzia jest zapewnienie wystarczająco dokładnego lub ustawialnego połączenia jego segmentów.

Efektywność ekonomiczna skrawania ostrzami z materiałów supertwardych

Ostrza ze spieków diamentowych lub z regularnego azotku boru są kilkadziesiąt razy droższe od ostrzy z innych materiałów narzędziowych, takich jak węgiel spiekany, cermet czy ceramika. Wynika to ze znacznie bardziej złożonego, trudniejszego technicznie procesu wytwarzania samego materiału, a także niezmiernie kosztownych procesów kształtowania ostrzy, obróbki wykończeniowej powierzchni oraz krawędzi skrawających. Stosuje się do tego celu obróbki laserowe, elektroerozyjne, elektrochemiczne, a także konwencjonalne i niekonwencjonalne obróbki ściernie, w tym wspomagane elektrochemicznie i elektroerozyjnie.

Mimo wysokiej ceny materiałów supertwardych efektywność ekonomiczna stosowania narzędzi z ostrzami z tych materiałów może być znacznie większa w porównaniu ze skrawaniem narzędziami z ostrzami z innych, znacznie tańszych materiałów narzędziowych. Wynika to m.in. z:

- możliwości znacznego zwiększenia wydajności obróbki, zwłaszcza prędkości skrawania,
- zdecydowanie większej trwałości narzędzi,
- rzadszych przestoju obrabiarek koniecznych do wymiany i ustawiania narzędzi,

- możliwości ograniczenia nadzoru mającego na celu wykrycie momentu stępienia narzędzia, ocenę jakości i dokładności kształtowania powierzchni itp.

Mówiąc o możliwości zwiększania efektywności skrawania, należałoby wspomnieć i o innych działaniach mających na nią wpływ, także tych odnoszących się do narzędzi niekoniecznie z ostrzami z materiałów supertwardych [5–7]. Można wymienić choćby zastępowanie w procesach technologicznych produkcji wielkoseryjnej i masowej kilku narzędzi handlowych jednym, specjalnym, wielostrzowym narzędziem zespołowym (np. rys. 8, 10, 12). Sprzyja temu zazwyczaj stosowanie ostrzy z materiałów supertwardych. Pozwala to skrócić czas obróbki, skomasaować zabiegi wykonywane na kilku obrabiarkach w jedną operację i uzyskać m.in. zwolnienie personelu i mocy produkcyjnych do innych zadań lub też zmniejszenie kosztów inwestycyjnych uruchomienia nowej produkcji.

W zależności od wielu czynników – takich jak: wartość naddatku, długość drogi skrawania, rodzaj i struktura materiału obrabianego albo rodzaj materiału ostrza – czas obróbki jednego przedmiotu narzędziem z ostrzami supertwardymi może być różny, ale jest zazwyczaj bardzo krótki. Przyjmując, że przeciętnie czas obróbki narzędziem z ostrzami z DP przedmiotu ze stopu aluminium-krzemowego wynosi kilkanaście sekund, oraz zakładając, że liczba obrobionych przedmiotów w okresie jego trwałości może wynieść od kilkudziesięciu do kilkuset tysięcy, to koszt obróbki jednego przedmiotu może wynieść, przy cenie narzędzia na poziomie 8 tys. zł, zaledwie kilka groszy. W przeciętnych warunkach produkcyjnych jest on znacznie niższy niż w przypadku zastosowania narzędzi z ostrzami z innych materiałów, np. węglików spiekanych.

Wobec wysokiej ceny jednostkowej narzędzi z ostrzami z materiałów supertwardych warunkiem dużej efektywności ich zastosowania jest stabilny proces skrawania i małe prawdopodobieństwo wystąpienia katastroficznych uszkodzeń ostrza.

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., Kuzinowski 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.
19. Cichosz P., Kuzinowski M., Tomov M., „Narzędzia skrawające z materiałów supertwardych. Cz. I. Ostrza diamentowe”. *Mechanik*. 8–9 (2017): s. 660–668.