

Innowacyjne narzędzia i technologie obróbki skrawaniem

Innovative machining tools and technologies

PIOTR CICHOSZ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.133>

Prezentowano nowoczesne narzędzia i technologie stosowane w obróbce skrawaniem oraz omówiono potencjalne kierunki rozwoju tych metod wytwarzania. Szczególną uwagę skupiono na materiałach narzędziowych i powłokach przeciwzużyciowych, a także na tych elementach konstrukcyjnych narzędzi oraz strategii skrawania, które silnie oddziałują na szeroko rozumianą efektywność wytwarzania.

SŁOWA KLUCZOWE: skrawanie, narzędzia, technologie, innowacje

Modern tools and innovative technologies used in machining are presented, and potential development directions of these manufacturing techniques are described. Particular attention is drawn to anti-wear tool materials and coatings, as well as structural elements of tools and machining strategies which strongly affect the broadly understood manufacturing efficiency.

KEYWORDS: machining, tools, technologies, innovations

Postęp w technologiach obróbki skrawaniem zawsze odbywał się w sposób bardziej ewolucyjny niż rewolucyjny. Nawet gdy pojawiły się przełomowe materiały narzędziowe, takie jak stale szybko tnące, węgliki spiekane i ceramika narzędziowa, które pozwalały zdecydowanie zintensyfikować wydajność kształtowania, ich wdrażanie w przemyśle odbywało się stopniowo, na przestrzeni lat.

Podobnie jest teraz, i to nie tylko w odniesieniu do nowych czy też ciągle udoskonalanych materiałów narzędziowych, powłok ochronnych nakładanych na ostrza, lecz także nowych technologii, takich jak: obróbka na sucho, ze zminimalizowanym smarowaniem (MQL), skrawanie trochoidalne, obróbka kompletna, z dużymi prędkościami, wysokoproduktywna, na twardo czy z dużymi posuwami [1–3, 5–7, 19].

Artykuł jest poświęcony wybranym technologiom, pozwalającym intensyfikować efektywność skrawania.

Materiały narzędziowe i powłoki ochronne

Materiał narzędziowy odgrywa kluczową rolę w skrawaniu, ponieważ determinuje możliwość obróbki określonych materiałów, w dużym stopniu oddziałuje na intensywność zużywania się ostrza i produktywność, decyduje o kosztach wytwarzania itp. Poza tym ma wpływ na łatwość kształtowania ostrzy i przytwierdzenia ich do korpusu narzędzia oraz na odporność na trudne warunki skrawania (szoki mechaniczne i termiczne).

W obróbce materiałów narzędziowych nie zauważa się w ostatnich latach przełomowych osiągnięć. Trwają prace nad doskonaleniem znanych gatunków.

Ostatnim punktem zwrotnym w ulepszaniu stali szybko tnącej było zapoczątkowanie jej wytwarzania metodą metalurgii proszków. Brak segregacji twardych frakcji węglików w tej technologii pozwolił na zwiększenie ich ilości

w stopie, co zaowocowało nieco większą twardością stali niż można było osiągnąć tradycyjnymi metodami jej wytwarzania za pomocą odlewania i przekuwania.

Dalszy wzrost możliwości skrawnych narzędzi ze stali szybko tnących należy dziś przypisywać głównie powłokom przeciwzużyciowym.

Węgliki spiekane to w dalszym ciągu podstawowy materiał narzędziowy. Wykonuje się z niego ok. 50% narzędzi. Materiał ten w sposób optymalny, jak żaden inny, łączy w sobie takie cechy, jak odporność na ścieranie i stosunkowo duża wytrzymałość.

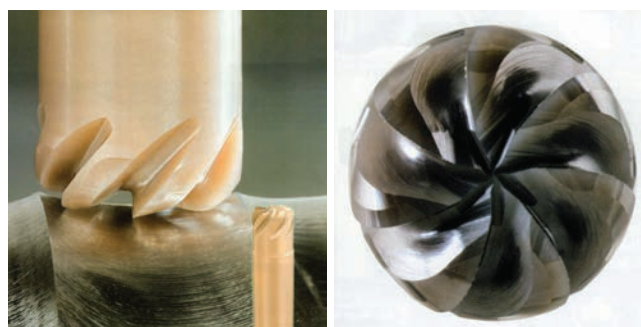
Kilkanaście lat temu udało się uzyskać ultradrobnoziarniste węgliki spiekane o wielkości ziarna ok. 0,3 μm . Taka struktura przyczyniła się do znaczącego wzrostu nie tylko twardości spieku, ale także jego wytrzymałości na zginanie – do tego czasu były to cechy przeciwstawne. Tak jak w przypadku stali szybko tnących, w ostatnich latach nie nastąpił znaczący postęp w rozwoju węglików spiekanych.

Podobny pogląd można wyrazić w odniesieniu do ceramiki tlenkowej, mieszanej i azotkowej [3, 9–10, 13, 15–16]. Trwają prace nad zwiększaniem odporności tych materiałów na kruche pękanie, szoki termiczne, a także ich wytrzymałości na zginanie. Jednak osiągnięcia na tym polu są umiarkowane.

Ostrza w postaci wymiennych płytek ceramicznych stosuje się od bardzo dawna. Natomiast wykorzystanie tych materiałów narzędziowych w monolitycznych narzędziach, takich jak wiertła lub frezy trzpieniowe, jest utrudnione ze względu na ich wspomniane wady oraz złe zachowanie się w warunkach niskich prędkości skrawania, jakie występują w przypadku narzędzi o małych średnicach lub w pobliżu osi obrotu narzędzia. Zwiększenie wytrzymałości na zginanie i odporności na kruche pękanie materiałów ceramicznych spowodowało, że zaczęto ponownie oferować frezy trzpieniowe z tych materiałów [9, 13].

Na rys. 1 przedstawiono frez ceramiczny do obróbki superstopów na bazie niklu. Jest on oferowany ze średnicami w zakresie 6–12 mm.

Nie udało się także znacząco poprawić właściwości skrawnych materiałów supertwardych. Głównym nurtem rozwoju są prace związane z udoskonalaniem materiału wiążącego ziarna diamentu bądź regularnego azotku boru. Znanych jest po kilkanaście gatunków spieków z tych materiałów. Różnią się one wielkością ziaren małych,



Rys. 1. Frez trzpieniowy ceramiczny (Iscar)

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

średnich bądź dużych ($\sim 2 \mu\text{m}$, $\sim 10 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$) oraz frakcji mieszanych, np. ziaren dużych i małych, co pozwala na uzyskanie większej koncentracji twardych frakcji w spieku. Podstawowym lepiszczem jest kobalt, który ma bardzo dobre właściwości zwilżające ziarna, a także dość wysoką temperaturę topnienia.

Regularny azotek boru (BN) jest prawie dwukrotnie bardziej odporny na wysoką temperaturę (do ok. 1400°C) niż diament. Aby to wykorzystać, do spiekania BN stosuje się nie tylko kobalt, ale także ceramikę Al_2O_3 i TiCN [15, 16]. Bywa, że koncentracja ziaren BN w spieku jest mniejsza niż 50%. Ponieważ spiekany BN ma kilkakrotnie większą wytrzymałość na zginanie od spieków diamentowych, dlatego materiał ten nadaje się na monolityczne płytki wielostrzowe, a nie tylko same naroża (jak to jest w przypadku spieków diamentowych).

Pewne możliwości rozszerzenia zastosowania diamentu do obróbki skrawaniem wiążą się z próbami powrotu do ostrzy z jego monokryształów. Jest to skutkiem dynamicznie rozwijających się metod syntezy diamentu. Obecnie oferowane są sztuczne diamenty o wielkości nawet $10 \times 10 \text{ mm}$ [3].

Co kilka miesięcy pojawiają się nowe bądź gruntownie zmodyfikowane wersje powłok przeciwwuzyciowych nanoszonych na ostrza. Powłoki do pracy z dużymi prędkościami lub do obróbek na twardo – a więc w warunkach bardzo wysokiej temperatury skrawania – wytrzymują temperaturę rzędu 1300°C . Pozwala to z sukcesem obrabiać zahartowane materiały za pomocą węglików spiekanych.

Od wielu lat stosuje się powłoki diamentowe nakładane na ostrza z węglików spiekanych. W ostatnim czasie pojawiają się one także w wersji, w której nakłada się naprzemiennie wiele warstw ultradrobnziarnistego i drobnziarnistego diamentu. Podnosi to właściwości mechaniczne całej powłoki i umożliwia zwiększenie jej grubości.

Różne źródła podają, że ok. 65–80% wszystkich narzędzi stosowanych w produkcji masowej jest powlekanych. Dotyczy to także narzędzi przeostrzanych, które są repowlekane. Stosuje się powlekanie ostrzy ze spieków z regularnego azotku boru oraz z ceramiki. Podejmuje się próby powlekania ostrzy węglkowych powłokami z regularnego azotku boru.

Minimalizacja wykorzystania materiałów narzędziowych

Większość materiałów narzędziowych ma w składzie kobalt, głównie w postaci lepiszcza. W ostatnich latach zauważa się gwałtowny wzrost zapotrzebowania na ten materiał, przede wszystkim w związku z zastosowaniem tego pierwiastka w produkcji baterii i akumulatorów. Ceny wyrobów zawierających kobalt osiągają zawrotny poziom. Stąd potrzeba:

- skonstruowania narzędzi z możliwie małą zawartością materiału narzędziowego, ale spełniających swoją rolę w efektywnym skrawaniu,
- wykorzystania wielu naroży roboczych w wymiennych płytkach narzędzi składanych,
- stosowania płytek mocowanych poprzez otwór,
- zapewnienia silnego, pewnego zamocowania wymiennego ostrza, żeby nawet w przypadku małych wymiarów gabarytowych ostrza można było skrawać z wysokimi parametrami,
- stosowania wymiennych ostrzy w narzędziach trzpieniowych o coraz to mniejszych średnicach (rys. 2), które do tej pory były wykonywane jako monolityczne narzędzia pełnowęglkowe,

- stosowania litych końcówek z materiałów supertwardych w narzędziach o małych wymiarach, nawet rzędu 1 mm [3, 9, 12, 13–17].

Na rys. 2 przedstawiono narzędzia trzpieniowe składane, alternatywne wobec narzędzi monolitycznych z węglików spiekanych. Są to narzędzia o skrajnie małych ostrzach. Dzięki nim ilość materiału narzędziowego potrzebnego do realizowania skrawania jest wielokrotnie mniejsza. Wymienne ostrza wymagają specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych elementów ustalająco-mocujących te ostrza, aby zapewnić dużą powtarzalność położeń i pewność mocowania.

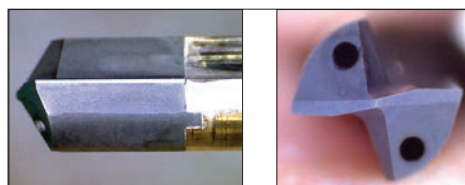


Rys. 2. Narzędzia składane ze skrajnie małymi ostrzami: a) wiertła z głowiczkami już od średnic $\text{Ø}4 \text{ mm}$, b) frezy trzpieniowe wielostrzowe już od średnic $\text{Ø}8 \text{ mm}$ (Iscar)

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe ostrza głowic frezowych, w których starano się wykorzystać jak najwięcej krawędzi/naroży skrawających przy możliwie małej objętości użytego materiału narzędziowego. Płytki te mimo tzw. dodatniej geometrii wykonuje się w wersji dwustronnej i mają one po 16 czynnych naroży. Masę materiału narzędziowego dodatkowo zmniejsza otwór do mocowania.



Rys. 3. Przykłady wielostrzowych płytek zapewniających maksymalizację liczby ostrzy w stosunku do objętości materiału narzędziowego (Iscar, Mitsubishi)



Rys. 4. Wiertło $2,5\div 6 \text{ mm}$ z końcówką ze spieku diamentowego bezpośrednio przypiekaną do korpusu narzędzia (Mapal)



Rys. 5. Rozwiartaki z BN do obróbki małych otworów (Mapal)

Zaokrąglanie krawędzi skrawających

Do niedawna przeważał pogląd, że im ostrzejsza krawędź, tym korzystniejsze właściwości skrawne narzędzia. Obecnie większość ostrzy skrawających ma mniej lub bardziej zaokrąglone krawędzie o promieniu od kilku do nawet kilkudziesięciu mikrometrów. Jedynie ostrza diamentowe oraz do obróbki materiałów miękkich i kompozytowych mają ostre krawędzie.

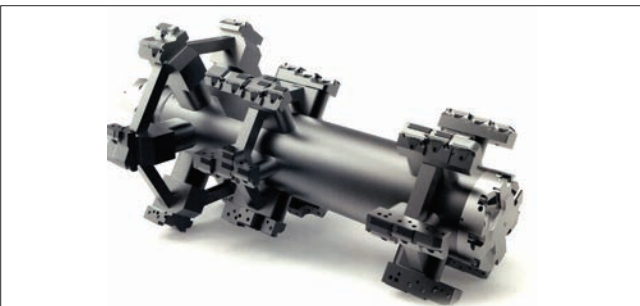
Zaokrąglenie krawędzi, uzyskane za pomocą obróbki ścierniej, np. polerowania, szczotkowania, obróbki strumieniowo-ścierniej, może istotnie wydłużyć trwałość narzędzia [4, 9, 11]. Dlatego pojawiło się wiele obrabiarek i urządzeń przeznaczonych właśnie do tego celu [4].

Narzędzia zespołowe

W rozwoju konstrukcji narzędzi zespołowych można wyróżnić dwa główne kierunki. Pierwszym z nich jest zwiększanie zakresu modułowości. Z gotowych podzespołów, najczęściej ze znormalizowanymi ostrzami, zestawia się nawet bardzo złożone narzędzia, a konstruuje się jedynie korpusy. Mogą one być niezbyt dokładnie wykonane, ponieważ precyzyjne ustawienie ostrzy narzędzia zapewnia najczęściej regulacja sprężystości odkształcanych elementów wkładek. Taka elastyczność sprzyja efektywnemu wykorzystaniu tej grupy narzędzi także w produkcji coraz krótszych serii wyrobów.

Drugi nurt rozwoju narzędzi zespołowych opiera się na dążeniu do zmniejszania ich masy, zwłaszcza w przypadku narzędzi o dużych gabarytach. Lekka, ażurowa, często spawana konstrukcja pozwala na zespołową obróbkę coraz większych przedmiotów i używanie standardowych manipulatorów do automatycznej wymiany narzędzi. Zmniejszaniu masy narzędzi, nie tylko zespołowych, może służyć zastosowanie lżejszych materiałów w produkcji korpusów. Już dziś dostępne są głowice frezowe np. ze stopów aluminiowych. Niektóre narzędzia takich firm, jak Mapal czy Gühring, mają korpusy ze stopów tytanu i z materiałów kompozytowych.

Na rys. 6 przedstawiono wiertło do zespołowej obróbki wielostopniowych otworów o dużych gabarytach. Kon-

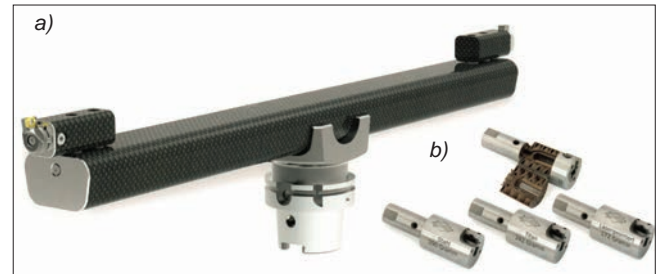


Rys. 6. Precyzyjne wiertło wielostopniowe o lekkiej konstrukcji do obróbki dużych otworów (Mapal)

strukcja tego narzędzia powstała na bazie spawanego korpusu. Ma ono 700 mm długości i ponad 40 ostrzy.

Na rys. 7 pokazano narzędzia o lekkiej konstrukcji:

- korpusy wytaczadeł z kompozytu wzmocnionego włóknami węglowymi; średnice tych narzędzi mogą osiągać wartości w zakresie 500÷3500 mm,
- oprawki narzędziowe o ażurowej budowie (np. wykonane z wykorzystaniem techniki generatywnej – druku 3D).



Rys. 7. Narzędzia o lekkiej konstrukcji: a) wytaczadło z kompozytowym korpusem, b) ażurowa oprawka narzędziowa wykonana techniką generatywną (Mapal)

Narzędzia sterowane i mechatroniczne

Zadaniem narzędzi sterowanych i mechatronicznych jest wspieranie oraz uzupełnianie możliwości i dokładności kształtowania, jakimi dysponują obrabiarki [2]. Zauważa się stopniowy ciągły rozwój konstrukcji takich narzędzi w kierunku wspierania ich możliwościami oferowanymi przez elektronikę oraz informatyczne systemy transmisji i przetwarzania danych. Nowoczesne narzędzia mechatroniczne łatwo integrują się z systemami sterowania obrabiarek CNC i ich oprzyrządowaniem. Stosuje się bezprzewodowe sterowanie wieloma narzędziami za pomocą jednego zintegrowanego układu pracującego w systemie Bluetooth [2, 11]. Pojawia się wiele dodatkowych funkcji, które sprawiają, że narzędzia te są lepiej nadzorowane i mniej narażone na zakłócenia mogące wystąpić w procesie produkcyjnym.

Trwają prace nad zwiększaniem dokładności obróbki za pomocą korekcji odkształceń sprężystych układu OUPN. Obecne możliwości układów pomiarowych, dynamiczne przetwarzanie sygnałów i szybkie reakcje aktuatorów korygujących odkształcenia elementów układów mechanicznych dają nadzieję, że nie tylko da się uzyskać skuteczną korekcję ich losowych, statycznych odkształceń, ale także w sposób czynny reagować na zmiany dynamiczne, w tym na tłumienie drgań [2, 11, 12].

Wspomaganie skrawania płynami obróbkowymi

Od pewnego czasu rozwijają się dwa podejścia do wspomaganie skrawania płynami obróbkowymi. Kilkanaście lat temu zarysowała się tendencja do stosowania obróbki na sucho i najwyżej tam, gdzie wymagała tego jakość kształtowanych powierzchni, dopuszczano tzw. zminimalizowane smarowanie (MQL) strefy skrawania za pomocą mgły olejowej.

Takie podejście uzasadniano wysokimi kosztami stosowania płynów obróbkowych (w wielu przypadkach kilkakrotnie przewyższającymi koszty narzędziowe), a także znacznymi kosztami utylizacji tych płynów, ochroną zdrowia, środowiska itp. Tym tendencjom sprzyjała chęć unikania znacznych szoków termicznych, jakie mogłyby się pojawić w związku z rozwojem skrawania z dużymi prędkościami i obróbką materiałów w stanie utwardzonym. Obróbkom tym towarzyszy wysoka temperatura

i stosowanie klasycznego chłodzenia narzędzi mogłoby prowadzić do wystąpienia pęknięć termicznych we wrażliwych materiałach narzędziowych.

Mimo niewątpliwie korzystnych efektów, zwłaszcza ekonomicznych, obróbki na sucho bądź z MQL okazało się, że w pewnych przypadkach skrawania w trudnych warunkach dobrze się sprawdza odwrotne postępowanie, a mianowicie kierowanie wysokociśnieniowej strugi chłodziwa bezpośrednio pod wiór oraz stycznie do powierzchni przyłożenia. W ten sposób uzyskuje się znacznie intensywniejsze chłodzenie i smarowanie, korzystniejszą jakość obrabianej powierzchni, lepsze rozdrobnienie i odprowadzenie wiórów oraz mniejsze zużycie narzędzi.

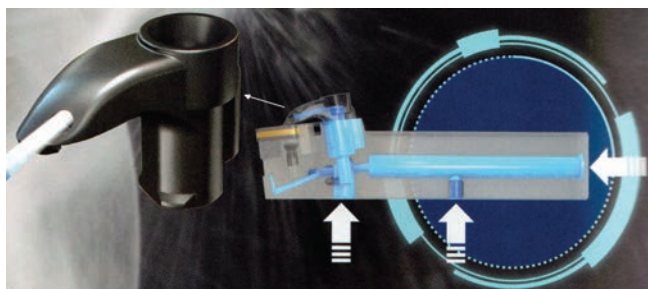
To podejście ma też wady, do których należy konieczność stosowania wysokociśnieniowych układów hydraulicznych zasilających strefę obróbki w media chłodząco-smarujące. Układy te muszą być skuteczne, bezpieczne i szczelne w warunkach wrzecion wirujących z dużą prędkością, automatycznie wymienianych narzędzi, szybko przemieszczających się suportów itp. W takich zastosowaniach wykorzystuje się specjalne adaptory i systemy oprzyrządowania do mocowania narzędzi w głowicach rewolwerowych i imakach tokarek, a także układy doprowadzania płynów przez wirujące wrzeciona, uchwyty i oprawki z zapewnieniem szczelności i ochrony otoczenia przed rozbryzgiami i tworzącym się aerozolem. Niemal wszystkie nowoczesne systemy narzędzi modułowych i oprawek umożliwiają doprowadzanie płynów obróbkowych wzdłuż osi narzędzia, poprzez kolejne jego moduły, bezpośrednio do strefy skrawania.

Standardem stają się układy podające chłodziwo o ciśnieniu w zakresie 50÷60 barów. Oferuje się już systemy na ciśnienie 150, a prognozuje się takie do 600 barów. Jednak nawet mniejsze zakresy ciśnień powodują, że podawanie strugi cieczy pod wiór wywołuje efekt „klina hydraulicznego”, co dość skutecznie nie tylko intensyfikuje odbieranie ciepła i zmniejsza tarcie między wiórem a powierzchniami roboczymi ostrza, lecz także przyczynia się do powstawania korzystniejszej, rozdrobnionej postaci wiórów. Pozwala też na zwiększenie optymalnej prędkości skrawania o ok. 30%.

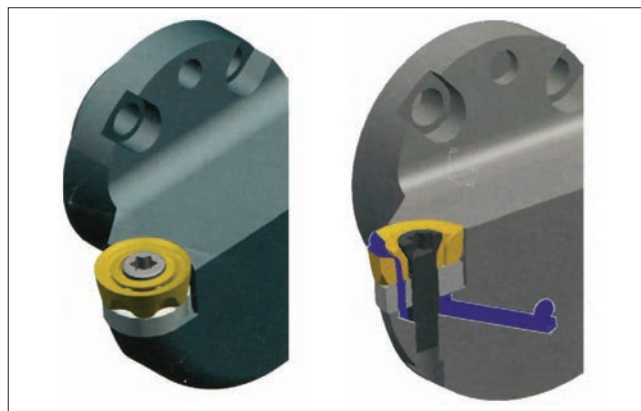
Tradycyjne chłodzenie przez polewanie strefy skrawania z góry – proste i tanie w zastosowaniu – z uwagi na małą skuteczność w przyszłości jeszcze bardziej straci na znaczeniu.

Na rys. 8 pokazano możliwości zasilania narzędzia w chłodziwo oraz dyszę, np. umieszczoną w łapie mocującej wymienne ostrze, kierującą strumień chłodziwa bezpośrednio pod wiór.

Ciekawe rozwiązanie podawania chłodziwa pod wiór, a zarazem chłodzenia wewnętrznego ostrza i płytki podporowej, zaproponowała firma Kennametal w nożu tokarskim wykonanym w technologii Beyond BLAST (rys. 9).

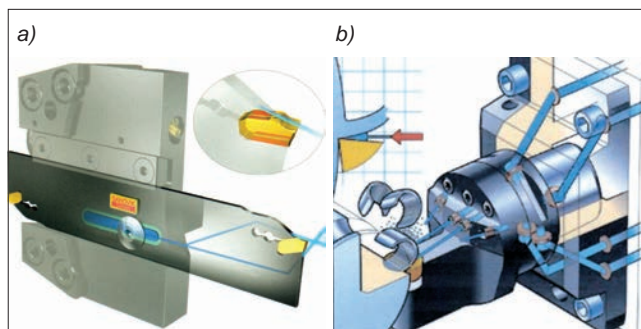


Rys. 8. Sposoby doprowadzania chłodziwa do oprawki noża oraz łapa mocująca ostrze z umiejscowioną w niej dyszą (Sandvik)



Rys. 9. Sposób doprowadzania chłodziwa do strefy skrawania poprzez ostrze skrawające (Kennametal)

Wiele firm narzędziowych kładzie nacisk na precyzyjne doprowadzanie chłodziwa tam, gdzie jest ono najbardziej potrzebne. Dzięki temu wzrasta skuteczność jego oddziaływania i możliwe jest zmniejszenie wydatku. Zwłaszcza w narzędziach z wąskimi ostrzami, np. przecinakach (rys. 10a) konieczne jest wykonanie trudnych technologicznie, długich i złożonych kanałków w korpusach oprawek. Jednak podanie cieczy obróbkowych w tak zintensyfikowany sposób zapewnia znacznie skuteczniejsze chłodzenie i smarowanie trudnodostępnego miejsca, w którym pracuje ostrze, wydłuża jego trwałość oraz ułatwia ewakuację wiórów (rys. 10b).



Rys. 10. Różne systemy doprowadzania chłodziwa bezpośrednio do strefy skrawania (Sandvik)

Kształtowanie kompozytów

Zauważa się silną tendencję do coraz szerszego stosowania materiałów kompozytowych, już nie tylko w branży lotniczej i produkcji wyrobów sportowych, ale wszędzie tam, gdzie jest silna presja na stosowanie materiałów o jak najkorzystniejszym stosunku właściwości mechanicznych do masy.

Różnorodność kompozytów rośnie. Niestety, najczęściej wraz z coraz korzystniejszymi właściwościami mechanicznymi pogarsza się obrabialność tych materiałów. Kompozyty, których sama osnowa jest w miarę dobrze skrawalna – np. tworzywa polimerowe, żywice, metale lekkie – wymagają ostrzy o stosunkowo dużym dodatnim kącie natarcia. Jednak wzmocnienia tych materiałów, z racji ich dużej wytrzymałości i twardości, najkorzystniej jest kształtować ostrzami z odmienną geometrią, o ujemnym kącie natarcia. W obróbce takich kompozytów preferuje się więc ostrza ze spieków diamentowych bądź z węglików spiekanych z powłokami diamentowymi. Materiały te przy dodatniej geometrii zachowują dość dobrą odporność na ścieranie.

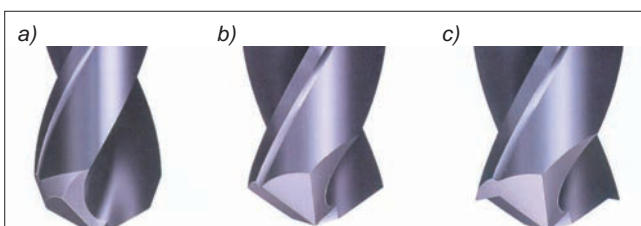
Kolejny problem występujący podczas obróbki kompozytów, zwłaszcza tych o osnowie z polimerów, stanowi delaminacja. Jest to wewnętrzne, równoległe do powierzchni rozwarstwianie się kompozytu oraz strzępienie się i pojawianie zadziorów na krawędziach obrabianych powierzchni. Szczególnie wyraźnie zjawisko to występuje podczas wiercenia otworów.

W konstrukcjach lotniczych w dalszym ciągu najsukrotniejszą techniką łączenia jest nitowanie. Wymaga ono wykonywania setek tysięcy otworów i to w warunkach montażowych na wielkogabarytowych konstrukcjach, których nie można zamocować na obrabiarce. Otwory muszą być wykonane bez jakichkolwiek defektów, a zwłaszcza wewnętrznych rozwarstwień trudnych do identyfikacji. Aby im zapobiec, stosuje się wiele rozwiązań, np.:

- Istotnie zmniejsza się kąty wierzchołkowe wiertel do ok. 90° , aby zmienić kierunek sił powstających na krawędziach – ze zbliżonego do osi na bardziej promieniowy. To zmniejsza moment zginający spodnie warstwy kompozytu, ogranicza skłonność do rozwarstwień oraz poprawia jakość krawędzi otworu, zwłaszcza na jego wylocie. Jednak w tej metodzie wydłuża się czas wchodzenia wiertła w materiał i wychodzenia z niego.
- Wprowadza się znaczne korekcie ścinu, zmniejszające siłę osiową, która ma dominujący udział w delaminacji spodnich warstw kompozytu podczas dochodzenia wiertła do dna otworu.
- Stosuje się wiercenie orbitalne albo frezowanie cyrkulacyjne, których kinematyka jest podobna (rys. 12). Obróbki te różnią się jedynie narzędziem. Oprócz innych zalet te sposoby wykonywania otworów zapewniają mniejsze obciążenie cieplne ścianek otworu, lepszą ewakuację wiórów oraz doskonałą jakość krawędzi na wlocie i wylocie otworów.

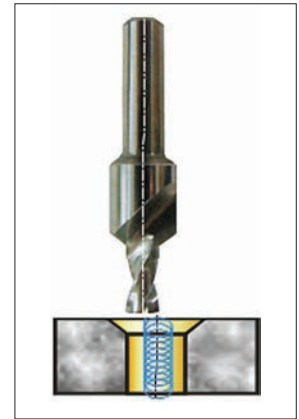
Do wiercenia orbitalnego skonstruowano wiele urządzeń/wiertarek zapewniających bezstopniowe, mechaniczne regulowanie wartości mimośrodów, dzięki czemu tym samym narzędziem można kształtować otwory o różnych średnicach. Urządzenia te mogą być obsługiwane ręcznie, montowane na ramionach robotów lub stanowić obrabiarki zadaniowe w liniach produkcyjnych. W przypadku zamocowania i obróbki przedmiotu na obrabiarce CNC ruch cyrkulacyjny można nadać z poziomu jej sterowania.

W tradycyjnej kinematyce wiercenia można poprawić jakość otworów wierconych w kompozytach przez modyfikację geometrii narzędzia. Aby ograniczyć odpryski i zadziory na wlocie i wylocie otworu w kompozytach o dużej zawartości włókien węglowych, można ukształtować krawędzie wiertel tak, jak to pokazano na rys. 11a. Aby zaś zapobiegać rozwarstwianiu się kompozytu o dużej zawartości żywic, należy skorygować ścin (rys. 11b) oraz zastosować geometrię dwustożkową (rys. 11a). Ostre naroża na zewnętrznej krawędzi (rys. 11c) mają zmniejszać zadziory na wlocie i wylocie otworu.



Rys. 11. Przykłady korekty geometrii wiertel poprawiającej jakość otworów wykonywanych w kompozytach (Sandvik)

Rys. 12. Schemat cyrkulacyjnego kształtowania otworów



Tradycyjne frezy, zwłaszcza trzpieniowe, mają spiralnie ułożone boczne krawędzie skrawające, aby wchodzenie ostrzy w materiał i wychodzenie z niego nie generowało drgań pogarszających warunki pracy. Ujemną stroną śrubowo ułożonych krawędzi jest powstawanie składowej siły osiowej. Podczas obróbki kompozytów może to prowadzić do strzępienia krawędzi, a w skrajnych wypadkach – do delaminacji warstw z tej strony, po której działa siła osiowa.

Aby temu zapobiec, krawędź skrawającą wykonuje się także jako śrubową, ale o budowie schodkowej (rys. 13). To zapewnia łagodne wchodzenie krawędzi w materiał i wychodzenie z niego, bez pojawiania się siły osiowej. Jednakże taka konstrukcja narzędzia jest dużo bardziej skomplikowana niż klasycznych frezów.

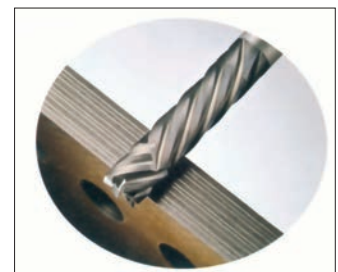
Frez trzpieniowy o średnicy $\varnothing 10$ mm z powłoką diamentową do obróbki kompozytów ze wzmocnieniem z włókien szklanych (GFRP) i węglowych (CFRP), wykorzystywanych w elementach konstrukcji lotniczych, przedstawiono na rys. 13.



Rys. 13. Frez trzpieniowy z powłoką diamentową o schodkowo zbudowanych krawędziach, do obróbki materiałów kompozytowych (Prototyp-Werke)

Frezy trzpieniowe ze zmiennym kątem pochylenia krawędzi podczas obróbki dociskają do siebie warstwy zewnętrzne kompozytu, co zapobiega jego rozwarstwianiu się (rys. 14.)

Rys. 14. Frez trzpieniowy ze zmiennym kątem pochylenia krawędzi do obróbki kompozytów (Sandvik)



Kompozyty, w których osnową jest ceramika, wykazują wyjątkowo dobre właściwości mechaniczne, zwłaszcza jeśli chodzi o twardość w wysokiej temperaturze. Nie tylko włókna czy cząsteczki wzmacniające te kompozyty, ale także osnowa bardzo silnie oddziałuje ściernie na ostrza skrawające. Praktycznie uniemożliwia to kształtowanie tych materiałów skrawaniem. Natomiast obróbka ścierna jest bardzo kosztowna i mało wydajna.

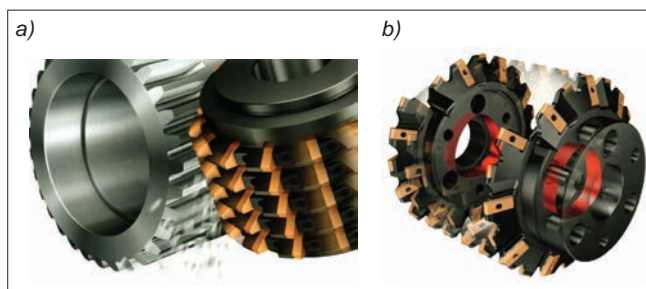
Próby zastosowania obróbek laserowych i wysokoenergetyczną strugą wodno-ścierną mają bardzo ograniczony zasięg, ponieważ nie pozwalają na nadawanie złożonych kształtów o dużej dokładności. Dlatego poszukuje się narzędzi i technologii do kształtowania skrawaniem tych kompozytów.

Kształtowanie kół zębatach

W kształtowaniu skrawaniem kół zębatach zarysowuje się w ostatnich latach kilka tendencji. Coraz szerzej stosuje się narzędzia składane – wysokowydajne frezy ślimakowe i tarczowe do obróbki obwodniowej – i pojawiło się szereg konstrukcji z wymiennymi ostrzami w narzędziach kształtowych.

Wymienne ostrza z węglików spiekanych nie wymagają kosztownego i czasochłonnego ostrzenia oraz renowienia, które wykonywane jest zazwyczaj przez firmę zewnętrzną. Pozwala to na obniżenie kosztów, a także zwiększenie wydajności obróbki dzięki zastosowaniu większych, optymalnych parametrów skrawania oraz krótszym czasom przezbrajania obrabiarki. W ten sposób udało się przenieść zalety narzędzi składanych na frezy do kształtowania kół zębatach.

Na rys. 15a przedstawiono składany frez ślimakowy, a na rys. 15b pokazano budowę segmentową takiego narzędzia, umożliwiającą zestawianie narzędzi o różnej szerokości.



Rys. 15. Frezy ślimakowe obwodniowe składane: a) obróbka koła zębatego, b) frez o budowie segmentowej (Sandvik)



Rys. 16. Frezowanie kół zębatach metodą InvoMilling i przykładowe narzędzia tarczowe (Sandvik)

Możliwości konstrukcyjne obrabiarek i ich sterowania rozwinęły się na tyle, że można dziś kształtować uzębienia frezami obwodniowymi na centrach tokarskich, co wpisuje się w nurt obróbek kompletnych. Coraz większe możliwości kształtowania uzębienia mają także uniwersalne frezarki CNC. Powstało szereg konstrukcji narzędzi składanych, np. frezów tarczowych, do obwodniowej obróbki kół zębatach. Aby można było zastosować taką obróbkę, należało rozszerzyć możliwości kinematyczne obrabiarek oraz opracować programy generujące ruchy obwodniowe. A więc

tam, gdzie nie wytwarza się na dużą skalę kół zębatach, można je kształtować na obrabiarkach uniwersalnych.

Pojawienie się zapotrzebowania na wydajną obróbkę kół zębatach, zwłaszcza o dużych modułach, zaowocowało powstaniem zmodyfikowanych i łączonych technologii ich kształtowania. Firmy Sandvik oraz DMG MORI opracowały technologię InvoMilling™ polegającą na zastosowaniu – zamiast obwodniowych frezów ślimakowych – prostych składanych frezów tarczowych oraz stworzeniu specjalnego oprogramowania sterującego pracą frezarek CNC (rys. 16). Na pierwszym etapie kształtowania obrabia się zgrubnie wręby międzyzębowe metodą kształtową, a na drugim etapie, znacznie dokładniej, metodą obwodniową obrabia się boki zębów.

Obecnie możliwe jest wykonywanie tą technologią kół o zębach prostych i skośnych o modułach z zakresu 1÷12 mm, a także wielowypustów oraz kół zębatach stożkowych o zębach prostych. Jedną z zalet tej technologii jest to, że nie używa się narzędzi specjalnych. Standardowe narzędzia tarczowe pozwalają kształtować zarysy uzębienia o różnych modułach. Warunkiem jest posiadanie pięciosiowej frezarki CNC oraz oprogramowania InvoMilling™.



Rys. 17. Klasyfikacja narzędzi do obróbki kół zębatach metodą uP-Gear (Sandvik)

Kolejną technologię – uP-Gear – wprowadziła firma Sandvik. Polega ona na tym, że do poszczególnych faz kształtowania zgrubnego uzębienia, zwłaszcza tych o dużych modułach, stosuje się różne narzędzia z grupy frezów tarczowych. Każde z nich kształtuje inny obszar wrębu (rys. 17).

Duże możliwości frezarek CNC sprawiły, że pojawiły się nowe zarysy uzębienia, np. kół stożkowych o sinusoidalnej linii zębów. Przekładnie z takim zarysem pozwalają na przeniesienie znacznie, bo o ok. 30%, większych momentów obrotowych. Mimo wyższej ceny mogą być z sukcesem stosowane wszędzie tam, gdzie kluczową rolę odgrywają masa lub małe gabaryty konstrukcji.

Diagnostyka i nadzorowanie

Globalizacja wytwarzania, przeniesienie produkcji do krajów o niskich kosztach wytwarzania, a także coraz droższe środki produkcji powodują, że jedną z dróg zachowania konkurencyjności rodzimego wytwarzania jest dalsza automatyzacja procesów.

W przypadku skrawania jednym z głównych motywów wprowadzania monitorowania jest chęć wykorzystania pełnych możliwości skrawanych coraz droższych narzędzi. Jeśli nie diagnozuje się na bieżąco stanu zużycia narzędzia,

to należy je wymieniać uprzedzająco, po tzw. okresie niezawodnej pracy. Okres ten jest znacząco krótszy od rzeczywistego okresu trwałości. I mimo, że np. 95% narzędzi mogłoby dalej pracować, należy je na wszelki wypadek wymienić, by nie powstawały braki lub zakłócenia w produkcji. To generuje znaczne straty finansowe.

Stąd w renomowanych zakładach, w produkcji masowej, większość obrabiarek do skrawania jest już wyposażona w układy nadzorujące pracę narzędzi. Chociaż są one drogie, wymagają wysoko wykwalifikowanego personelu i komplikują proces technologiczny (zwłaszcza jeśli jest on często zmieniany) czy korekty, to *per saldo* się to opłaca.

Stopień i zakres automatyzacji wytwarzania sukcesywnie postępuje dzięki:

- rozwojowi czujników umożliwiających dokładniejszą, bardziej niezawodną identyfikację zagrożeń przebiegu procesów,
- zwiększaniu szybkości reagowania na zakłócenia procesu skrawania odbywającego się z coraz większą prędkością i dynamiką, w którym skutki nieprawidłowości obróbki, np. kolizji, są coraz bardziej kosztowne,
- rozwojowi systemów i procedur samoczynnego reagowania na zakłócenia procesu i ich przewidywania,
- większej szybkości, poprawności i skuteczności działań mających zapobiegać awariom i przestojom procesu obróbkowego.

Nowe strategie skrawania

Nowe możliwości techniczne stwarzają przesłanki do znacznej poprawy szeroko rozumianej efektywności wytwarzania. Szczególnie wyraźnie daje się to zaobserwować w przypadku frezowania, gdzie często zachodzi potrzeba – w wyniku skracania serii produkcyjnych, a także wysokich wymagań wytrzymałościowych wyrobów (np. dla przemysłu lotniczego) – kształtowania przedmiotów z pełnego materiału.

Już bardzo dawno temu pojawiły się technologie skrawania z dużymi prędkościami (HSC), a nieco później – skrawania wysokoproduktywnego (HPC), w którym zmniejszono nieco prędkość skrawania w stosunku do HSC, aby wydłużyć trwałość narzędzia, ale zwiększono pozostałe parametry obróbki. Uzyskano tym samym zdecydowanie większą wydajność kosztem nieco mniejszej dokładności. Tak więc HPC stosuje się w obróbkach zgrubnych i kształtujących, a HSC – w wykończeniowych.

Kolejnym trendem, który nabiera znaczenia, jest skrawanie z dużymi posuwami. Ta technika pojawiła się w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku w ZSRR w toczeniu dzięki zastosowaniu noży Kolesowa. Pół wieku później odrodziła się w nieco zmodyfikowanej wersji z zastosowaniem ostrzy typu Wiper. Ostrza o „ściętym” narożu pozwalały na uzyskiwanie znacznie mniejszej chropowatości w porównaniu z ostrzami o klasycznych narożach, lub na znaczne zwiększenie posuwów z zachowaniem tej samej chropowatości. Efektywność wykorzystania ostrzy typu Wiper znacząco wrosła dla dużych posuwów.

Ten rodzaj obróbki ma również swoje wady, np.:

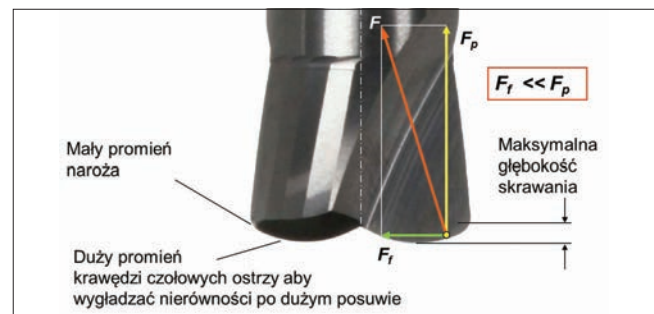
- trudności z automatyzacją generowania korekcji toru narzędzia uwzględniającego kształt naroża (natomiast jest ona możliwa w przypadku ostrzy tradycyjnych o dowolnych promieniach zaokrąglenia r_n),
- konieczność korygowania drogi narzędzia, jeśli skrawanie odbywa pod kątem w stosunku do osi obrotu przedmiotu,
- zakłócenia kształtu pojawiające się w obróbce powierzchni krzywoliniowych,

- zwiększone opory skrawania, co może wpływać na dokładność obróbki,
- niejednakowa chropowatość powierzchni kształtowanych podczas zmiennych kierunków skrawania.

Kolejnym powodem wzrostu zainteresowania skrawaniem z dużymi posuwami była możliwość uzyskiwania stosunkowo dużej wydajności frezowania dla znacznych wysięgów narzędzi, występujących np. podczas kształtowania głębokich kieszeni i obróbki trudnodostępnych miejsc. Specjalnie ukształtowanie krawędzie (rys. 18) na powierzchniach czołowych frezów oraz małe głębokości skrawania powodowały, że siła wypadkowa działa na frez i wrzeciono obrabiarki nie prostopadle, ale wzdłuż ich osi obrotu. W tym kierunku sztywność układu jest znacznie większa niż w kierunku promieniowym, co przekłada się na mniejsze drgania i odkształcenia i pozwala zwiększyć wydajność skrawania.

Ta dość efektywna obróbka będzie nabierała znaczenia w przyszłości, ponieważ rozwijają się techniki wytwarzania półfabrykatów poprzez odlewanie, kucie i metodami przyrostowymi. Postępy w tym obszarze powodują, że naddatki na obróbki wykończeniowe będą coraz mniejsze. Dla małych naddatków zwiększenie wydajności obróbki jest możliwe m.in. poprzez zwiększenie posuwów.

W technologii skrawania z dużymi posuwami zmienia się kształt krawędzi skrawających – początkowo miały one duże promienie zaokrąglenia (rys. 18 i 19), co wymagało odrębnych płytek, teraz zaś są to liniowe krawędzie standardowych płytek, pochylone pod niewielkim kątem (rys. 20).



Rys. 18. Idea konstrukcji frezów do skrawania z dużymi posuwami [16]



Rys. 19. Przykłady frezów do skrawania z dużymi posuwami (SECO)



Rys. 20. Frez do skrawania z dużymi posuwami (Iscar)

Rośnie zainteresowanie frezowaniem wgłębnym, przypominającym kinematyką wiercenie w niepełnym materiale. W przypadku wybierania głębokich kieszeni, nierazko na dużych głębokościach, wymagających znacznych wysięgów narzędzi, frezowanie to ma szereg zalet w porównaniu z klasycznym frezowaniem walcowo-czołowym.

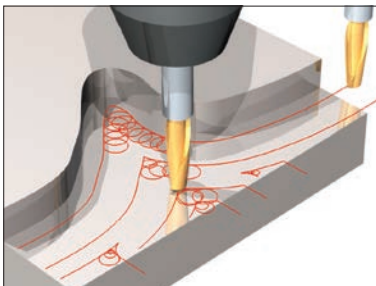
Podobnie jak we frezowaniu z dużymi posuwami, siły skrawania w większym stopniu są tu skierowane wzdłuż osi wrzeciona, a w mniejszym – w kierunku prostopadłym. Jak wspomniano, w tym kierunku układ narzędzie–wrzeciono jest sztywniejszy, co pozwala na zwiększenie dopuszczalnego obciążenia narzędzia, stabilniejszą pracę i umożliwia wzrost wydajności.

Zatem powód stosowania wysokich posuwów i frezowania wgłębnego jest podobny. Różnica polega na tym, że frezowaniem z dużymi posuwami obrabia się małe naddatki, a wgłębnym – usuwa się duże objętości materiału. Główną wadą tych sposobów kształtowania jest bardzo niedokładnie obrobiona powierzchnia boczna ścianek przedmiotów, które wymagają późniejszej, już klasycznej, obwodowej obróbki wykończeniowej. Mimo to można się spodziewać skrócenia czasu obróbki głębokich kieszeni nawet o 50%.

Z elementów procesu technologicznego najskuteczniej na obniżenie kosztów wytwarzania wpływa skrócenie jego czasu. Dlatego pojawiła się technologia obróbki na twardo. Skrócenie czasu kształtowania wyrobu uzyskano dzięki wyeliminowaniu obróbki cieplnej oraz związanego z nią transportu.

Poza tym w tej technologii nie występują odkształcenia hartownicze więc nie trzeba ich usuwać obróbką ścierną. Jakość powierzchni hartowanych po skrawaniu jest bardzo wysoka i w wielu przypadkach nie jest też konieczna ścierna obróbka wykończeniowa.

Do głównych ograniczeń w stosowaniu skrawania z dużymi prędkościami oraz obróbki na twardo należy ograniczona trwałość narzędzia. Wynika to z wysokiej temperatury skrawania. Dlatego pojawiła się technologia skrawania trochoidalnego (rys. 21), w której zredukowano kąt opasania frezu, by znacznie, nawet o połowę, obniżyć tę temperaturę. W ten sposób podniesiono efektywność skrawania tą technologią.



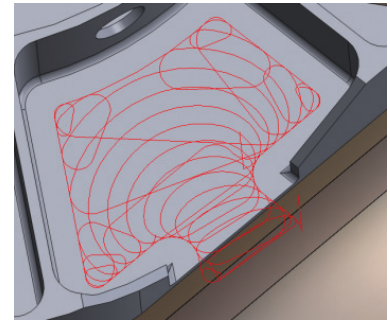
Rys. 21. Przykład zaprojektowanych torów frezu podczas frezowania trochoidalnego [16]

Powstało wiele odmian tej obróbki, w których tory narzędzia odbiegają nawet dość znacznie od trochoidy, mimo że nadal są tak nazywane.

Interesującą modyfikacją toru trochoidalnego narzędzia jest technologia iMachining, opatentowana przez firmę SolidCAM. Założenia tej technologii [17] polegają na zapewnieniu quasi-stałego obciążenia narzędzia oraz usuwaniu przynajmniej 65% naddatku podczas ciągłego kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym.

Program iMachining tak generuje ścieżkę narzędzia (rys. 22), żeby zapewnić jego stałe obciążenie, co wymaga także czasami zmian wielkości posuwów. Utrzymywanie stałej lokalnej szerokości frezowania pozwala ustabilizować temperaturę pracy na odpowiednim poziomie

Rys. 22. Przykład toru narzędzia wygenerowanego technologią iMachining podczas obróbki kieszeni



i zapobiega przegrzaniu ostrzy. Mimo dość wysokiej ceny oprogramowania, takie technologie pozwalają na uzyskanie znacznie większej wydajności i istotnego wydłużenia okresu trwałości narzędzi, co przekłada się na zwiększenie efektywności obróbki.

Czas wymiany narzędzia

W dążeniu do podnoszenia efektywności skrawania coraz większą rolę będzie odgrywać skracanie nieproduktywnych przestojów obrabiarki [1]. Niektóre maszyny osiągają już czasy automatycznej wymiany narzędzia poniżej sekundy. Tę dynamikę można efektywnie wykorzystać również podczas wymiany zużytego narzędzia na nowe lub zregenerowane, jeśli ma się w magazynie obrabiarki narzędzia siostrzane, dokładnie ustawione na wymiar bądź z precyzyjnie określonymi korekcjami, które są potem, np. automatycznie, wczytywane do układu sterowania maszyny.

Wydaje się, że takie podejście do automatyzacji będzie w przyszłości dominujące. Gdy z różnych względów nie będzie można racjonalnie zastosować automatycznej lub w znacznym stopniu zautomatyzowanej wymiany narzędzi, to alternatywą będzie takie jej przeprowadzenie, aby przestoje z tego powodu były jak najkrótsze. W takich przypadkach korzystna jest wymiana samego ostrza, zwłaszcza gdy powtarzalność położeń jego naroży i krawędzi jest na tyle duża, że nie trzeba dokonywać czasochłonnego ponownego ustawiania narzędzia i określania korekcji jego położeń. Wydaje się to kolejną przesłanką do zastępowania narzędzi przeostrzalnych – składanymi (rys. 2, 15, 16) [1, 10].

Technologie hybrydowe

Coraz wyższe wymagania dotyczące dokładności wymiarowo-kształtowej wyrobów, a także tendencje do skracania serii produkcyjnych na rzecz ich różnorodności, wywołują presję na tworzenie technologii i obrabiarek hybrydowych, łączących zalety kilku sposobów kształtowania.

Już nie chodzi np. o zaawansowane centra obróbkowe na bazie tokarek CNC, na których oprócz toczenia można frezować, wiercić otwory skośne, nacinać uzębienia, dłutować rowki, stosować obróbki ściernie itp. Takie obrabiarki, wyposażone w moduły lub narzędzia mechatroniczne, co prawda znacznie rozszerzają możliwości kształtowania wyrobów, ale z racji dużej uniwersalności nie są zbyt wydajne.

Obrabiarki hybrydowe to np. rozwiązania konstrukcyjne tokarko-frezarek, tokarko-szlifierek itp. Ostatnio pojawiły się obrabiarki łączące obróbkę skrawaniem, ścierną, drążenie elektroerozyjne i elektrochemiczne. Często techniki te wspomagają się drganiami oraz różnymi źródłami energii. Szczęólnego znaczenia nabiera włączenie w jeden system wytwórczy technik generatywnych (rys. 23 i 24). Te ostatnie stosuje się wielokrotnie i naprzemiennie podczas

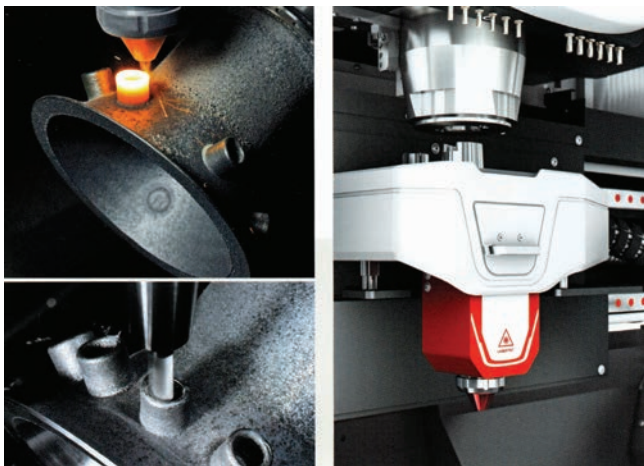
wytwarzania jednego przedmiotu w jednym z mocowaniu. Tego typu urządzenie znacznie rozszerzają możliwości kształtowania bardzo skomplikowanych wyrobów.

Obrabiarki hybrydowe pozwalają także na upowszechnianie tzw. obróbki kompletnej, czyli ukształtowanie, a nawet montaż całego wyrobu odbywa się w jednej operacji. Przedmiot wytwarza się bez lub z możliwie małą liczbą przemocowań. Skutkuje to zwiększeniem wydajności i znaczną poprawą dokładności obróbki, przede wszystkim powierzchni sprzężonych wymiarowo ciasnymi polami tolerancji.

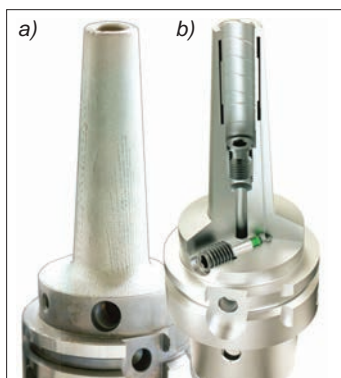
Możliwości konfigurowania obróbek hybrydowych są bardzo szerokie, zwłaszcza jeśli łączy się różne źródła energii. Uzyskuje się często efekt synergii ich wzajemnych oddziaływań. Jest to szczególnie korzystne w przypadku bardzo trudno obrabialnych materiałów oraz trudno kształtowalnych przedmiotów. Obecnie zasięg stosowania tych technologii nie jest zbyt szeroki i ogranicza się zazwyczaj do wytwarzania skomplikowanych prototypów, a także form i narzędzi do seryjnego replikowania przedmiotów, wykorzystywanych głównie w nanotechnologiach. Jest to spowodowane znacznymi kosztami tych technologii i niezbyt dużą jeszcze ich wydajnością. Wydaje się, że z racji rozlicznych zalet tych technik, a także coraz lepszego poznawania możliwości wytwórczych, obszar ich zastosowania będzie się rozszerzał.

Obszerny przegląd obróbek hybrydowych, z próbą ujednoczenia definicji i nazewnictwa, znajduje się w [5].

Rośnie wykorzystanie technik generatywnych w wytwarzaniu korpusów narzędzi (rys. 7b) czy oprzyrządowania narzędziowego, np. opravek hydraulicznych (rys. 24). Dzięki dużym możliwościom tych technologii można wykonywać oprawki także do mocowania narzędzi o bardzo małych średnicach, nawet rzędu kilku milimetrów [12].



Rys. 23. Przykład łączenia w jednej maszynie technik generatywnych (druk 3D) i skrawania (DMG MORI)



Rys. 24. Przykłady korpusów opravek hydraulicznych drukowanych techniką 3D: a) dodrukowana część do części chwytowej, b) przekrój oprawki po wykonaniu (MAPAL)

Podsumowanie

W wyniku zmian związanych z wprowadzeniem produkcji 4.0 prognozuje się, że w samej Europie, w niedalekiej przyszłości, będzie musiało zmienić swoje kwalifikacje od kilku do kilkunastu milionów pracowników. Pełniejsza informatyzacja niemal wszystkich środków produkcji i systemów zarządzania nią obejmie jeszcze szerzej techniki wytwarzania. Obserwuje się dążenie do komputerowego wspomaganie na każdym etapie wytwarzania, w tym podczas opracowywania technologii, z coraz bardziej zaawansowanymi procedurami je optymalizującymi.

Czołowe światowe firmy narzędziowe oferują dostęp do elektronicznych, najczęściej umieszczanych na stronach internetowych, danych, informacji i procedur mogących mieć znaczenie w doborze narzędzia do operacji technologicznej, pomagających w wyborze parametrów i warunków obróbki. W wielu przypadkach można obliczyć czas obróbki, a niekiedy także skalkulować koszty operacji.

Mimo znacznego postępu bezubytkowych, a nawet przystawionych technik wytwarzania, pozwalających na dostarczanie coraz bardziej precyzyjnie wykonanych półfabrykatów, w dalszym ciągu kluczową rolę w produkcji odgrywają skrawanie i obróbki ściernie. Wynika to z ich większej dokładności, stabilności procesu oraz możliwości uzyskiwania wymaganej, coraz wyższej jakości warstwy wierzchniej kształtowanej powierzchni, obejmującej czasami bardzo wyrafinowaną strukturę geometryczną jej topografii, naprężenia własne i umocnienie.

Trzeba też zauważyć w ostatnich czasach znaczne przewartościowanie się pojęcia „technologiczności konstrukcji”. To, co kiedyś było uważane za skrajnie nietechnologiczne, bo było trudne bądź niemożliwe do wykonania, dzisiaj, z racji nowych możliwości kształtowania, jakie oferują obrabiarki i narzędzia, w tym narzędzia sterowane i mechatroniczne, może stać się rozwiązaniem technologicznym.

LITERATURA

1. Cichosz P. „Efektywność kształtowania przedmiotów osiowosymetrycznych w zintegrowanym wytwarzaniu”. Wrocław: Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1998.
2. Cichosz P., Kuzinowski M. „Sterowane i mechatroniczne narzędzia skrawające”. Warszawa: PWN, 2016.
3. Cichosz P., Kuzinowski M., Tomov M. „Narzędzia skrawające z materiałów supertwardych. Cz. I. Ostrza diamentowe”. *Mechanik*. 8–9 (2017): s. 660–671; Cichosz P., Kuzinowski M., Tomov M. „Narzędzia skrawające z materiałów supertwardych. Cz. II. Ostrza z regularnego azotku boru”. *Mechanik*. 10 (2017): s. 819–824.
4. Cichosz P., Kuzinowski M., Tomov M., Urych A. „Zaokrąglenie krawędzi skrawających ostrzy z węglików spiekanych”. *Mechanik*. 7 (2018): s. 458–462.
5. Grzesik W. „Hybrydowe procesy obróbki ubytkowej. Definicje, zasady tworzenia i znaczenie w przemyśle”. *Mechanik*. 5–6 (2018): s. 338–342.
6. Grzesik W. „Advanced Machining Processes of Metallic Materials”. Amsterdam: Elsevier, 2017.
7. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Mc Intosh D. „Hybrid processes in manufacturing”. *Annals of the CIRP Manufacturing Technology*. 63, 2 (2014): s. 561–583.
8. Materiały informacyjne firmy DMG MORI.
9. Materiały informacyjne firmy Gühring.
10. Materiały informacyjne firmy Iscar.
11. Materiały informacyjne firmy Komet.
12. Materiały informacyjne firmy Mapal.
13. Materiały informacyjne firmy Mitsubishi.
14. Materiały informacyjne firmy Novator AB.
15. Materiały informacyjne firmy Sandvik Coromant.
16. Materiały informacyjne firmy SECO.
17. Materiały informacyjne firmy SolidCAM.
18. Materiały informacyjne firmy TIZ Tools.
19. Rösiger A., Goller R. „Stand der Technik bei der Bearbeitung von CMCs”. *Sitzung der AG Endbearbeitung des CCEv Ceramic Composites*. Augsburg (20 listopada 2015).