

Hybrydowe procesy obróbki ubytkowej. Definicje, zasady tworzenia i znaczenie w przemyśle

Hybrid machining processes. Definitions, generation rules and real industrial importance

WIT GRZESIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.5-6.50>

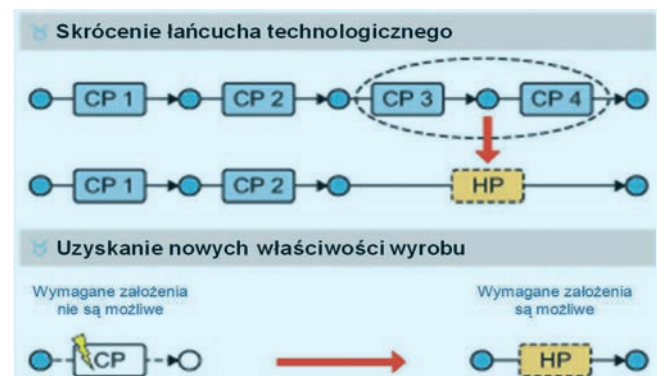
Przedstawiono trendy w rozwoju procesów obróbki ubytkowej w strategii Produkcja/Wytwarzanie 4.0. Podano zwięzłe charakterystyki konwencjonalnych i niekonwencjonalnych procesów obróbki ubytkowej oraz możliwości technologiczne ich integracji w bardziej wydajne procesy hybrydowe, wykorzystujące dwa (lub więcej) źródła energii albo różne mechanizmy usuwania nadmiaru obróbkowego. Wprowadzono nową terminologię dotyczącą hybrydyzacji procesów wytwórczych. **SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka hybrydowa, obróbka wspomaganą, obróbka łączona, skrawanie konwencjonalne, skrawanie niekonwencjonalne

Some important trends in the development of advanced machining processes with potential applications in Production/Manufacturing 4.0 are presented. In general, both conventional and unconventional machining processes are characterized in terms of potential technological possibilities related to their hybridization allowing the performance of more productive and effective machining processes. This is due to the fact that hybrid processes considerably enhance the advantages of individual processes and minimize potential disadvantages in individual processes. Possible classification systems of hybrid processes including the CIRP terminology are overviewed and some representative examples are provided. In particular, the hybrid machining processes based on the simultaneous and controlled interaction of process mechanisms and/or energy sources leading to the synergic effect ($1 + 1 = 3$) on the process performance are taken into account. Some conclusions and future trends in the implementation of hybrid processes are outlined.

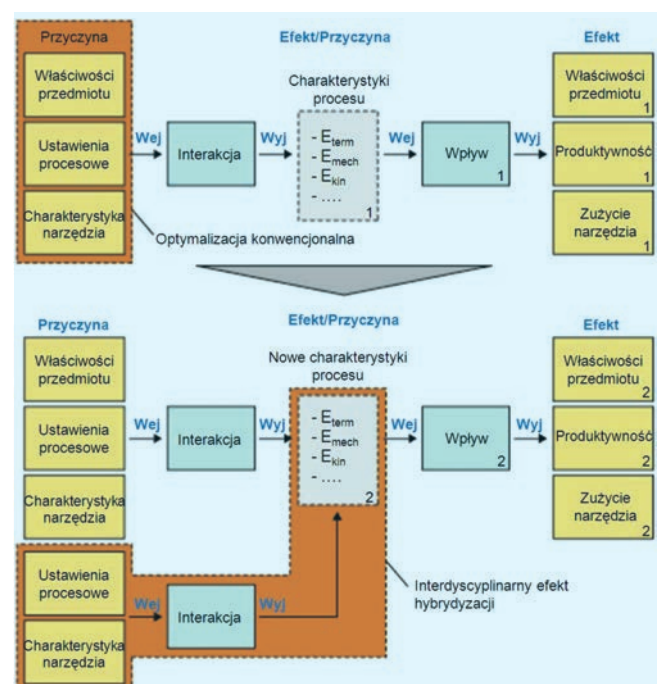
KEYWORDS: hybrid machining, assisted machining, mixed machining processes, conventional machining, unconventional machining

Obecnie globalne oczekiwania wobec procesów wytwórczych sprowadzają się do coraz większej elastyczności i efektywności/produktywności, a z drugiej strony – do utrzymania wysokiej jakości [1]. W przypadku przedmiotów o złożonych kształtach cykl wytwórczy może obejmować kilka etapów realizowanych na różnych urządzeniach (rys. 1). W takich przypadkach kolejne przenoszenie i ustawianie obrabianych przedmiotów jest zwykle nieefektywne ze względu na stratę czasu i zwiększone ryzyko błędów obróbkowych, co podnosi koszty utrzymania wymaganej jakości (albo oznacza uzyskanie gorszej jakości). Nie bez znaczenia jest większa przestrzeń, potrzebna, aby pomieścić kilka urządzeń. Z tych względów od wielu lat podejmowane są działania konstrukcyjne i technologiczne nad integracją wielu procesów w jednym, hybrydowym urządzeniu wytwórczym [2, 3].

Przykładem pierwszych rozwiązań tego typu mogą być obrabiarki wielofunkcyjne CNC do obróbki zintegrowanej (kompletnej) – *multi-tasking machine tools* – które pozwalają na istotne zmniejszenie kosztów i skrócenie czasu obróbki. Na kolejnych etapach integracji procesów wytwórczych pojawiły się urządzenia ze źródłem laserowym, wspomagającym obróbkę konwencjonalną. Obecnie rozwija się koncepcja hybrydowego procesu wytwarzania poprzez zintegrowanie w jednym urządzeniu wieloosiowej obróbki ubytkowej i obróbki przyrostowej (addytywnej) – *additive manufacturing (AM)* [2]. Obróbkę AM można wykorzystywać nie tylko do kształtowania dodatkowych



Rys. 1. Schemat skrócenia łańcucha procesowego dzięki hybrydyzacji procesu [6]. CP – *conventional production process*, HP – *hybrid production process*



Rys. 2. Porównanie konwencjonalnej optymalizacji z interdyscyplinarnym efektem hybrydyzacji procesu [6]

* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik (w.grzesik@po.opole.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Opolskiej

TABLICA I. Klasyfikacja zaawansowanych procesów obróbki ubytkowej (AMP) ze względu na wykorzystaną do usuwania materiału energię, z podaniem źródła energii, narzędzia i medium transferu energii, oraz mechanizm usuwania materiału [4, 5]

Rodzaj energii	AMP	Źródło energii	Narzędzie	Medium przenoszące	Mechanizm usuwania materiału
Mechaniczna	USM	Drgania ultradźwiękowe	Sonotroda	Zawiesina ścierna	Erozja lub ścieranie
	AJM	Ciśnienie pneumatyczne	Strumień ścierny	Powietrze	
	WJM	Ciśnienie hydrauliczne	Struga wody	Powietrze	
	AWJM	Ciśnienie hydrauliczne	Struga wodno-ścierna	Powietrze	
	IJM	Ciśnienie hydrauliczne	Strumień cząstek lodu	Powietrze	
Chemiczna	CHM	Składnik korozyjny	Maska	Odczynnik trawiący	Roztworzenie chemiczne
Elektrochemiczna	ECM	Prąd o dużym natężeniu	Elektroda	Elektrolit	Roztworzenie anodowe przez ruch jonów
Termiczna	EDM	Prąd o dużym napięciu	Elektroda	Dielektryk	Topienie i odparowanie
	EBM	Zjonizowany materiał	Strumień elektronów	Próżnia	
	IBM	Zjonizowany materiał	Strumień jonów	Atmosfera	
	LBM	Wzmocniony strumień świetlny	Wiązka laserowa	Powietrze	
	PAM	Zjonizowany materiał	Strumień plazmy	Plazma	

Legenda: AFM – *abrasive flow machining* (obróbka przetłoczno-ścierna), AJM – *abrasive jet machining* (obróbka aerościerna), AWJM – *abrasive water jet machining* (obróbka strumieniem wodno-ściernym), CHM – *chemical machining* (obróbka chemiczna), EBM – *electron beam machining* (obróbka elektronowa), ECM – *electrochemical machining* (obróbka elektrochemiczna), EDM – *electrodischarge machining* (obróbka elektroerozyjna), IBM – *ion beam machining* (obróbka jonowa), IJM – *ice jet machining* (obróbka strumieniem cząstek lodu), LBM – *laser beam machining* (obróbka laserowa), PAM – *plasma beam machining* (obróbka plazmowa), USM – *ultrasonic machining* (obróbka ultradźwiękowa), WJM – *water jet machining* (obróbka strumieniem wody).

elementów przedmiotu, ale również do naprawy drogich części, np. łopatek turbin ze śladami wżerów kawitacyjnych czy z pęknięciami na powierzchni.

Hybrydyzacja procesów wytwórczych, w tym obróbki ubytkowej, jest istotnym czynnikiem umożliwiającym realizację strategii Produkcji/Wytwarzania 4.0, ponieważ sprzyja innowacjom. Z tego względu hybrydyzacja jest także ważnym elementem w rozwoju zaawansowanych procesów wytwarzania – daje szerokie możliwości ich usprawniania i optymalizacji. W tabl. I zestawiono zaawansowane procesy obróbki ubytkowej, które mogą podlegać dalszej hybrydyzacji (patrz tabl. II).

Z rys. 2 wynika, że po wyczerpaniu możliwości optymalizacji konwencjonalnego procesu pozostaje możliwość znacznego usprawnienia jego przebiegu na drodze eliminowania znanych ograniczeń przez wprowadzanie dodatkowych, zewnętrznych źródeł energii. W ten sposób następuje interakcja nowych, dodatkowych procesów, wspomagających podstawowy proces konwencjonalny. Inną możliwością jest analiza typu skutek–przyczyna w odniesieniu do wszystkich składników łańcucha technologicznego, prowadząca do poprawy procesu przez integrację pojedynczych procesów albo przez skumulowanie kilku procesów w jednym procesie hybrydowym.

W tabl. I zestawiono stosowane na skalę przemysłową procesy obróbki ubytkowej, wykorzystujące różne źródła energii (mechaniczną, termiczną, chemiczną i elektrochemiczną), z pełną charakterystyką fizyczną i technologiczną.

Podstawy obróbki hybrydowej – zasady tworzenia procesów obróbki

Ewolucja konwencjonalnych i niekonwencjonalnych procesów obróbki po II wojnie światowej polegała na łączeniu procesów i wykorzystaniu różnych aktywnych źródeł energii lub realizacji kilku sposobów obróbki, a nawet kilku kolejnych etapów procesu technologicznego w jednym urządzeniu wytwórczym z myślą o osiągnięciu efektu synergii. Oznacza to, że w wyniku hybrydowego procesu, z zastosowaniem hybrydowej obrabiarki czy urządzenia wytwórczego, uzyskuje się efekt przewyż-

sający sumę efektów procesów składowych, realizowanych oddzielnie.

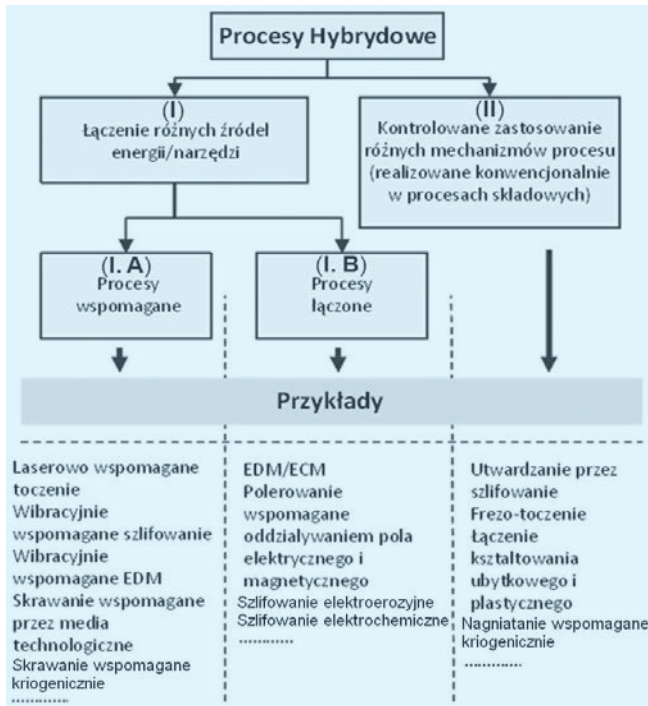
W naturalny sposób definicja obróbki hybrydowej podlegała ewolucji w związku z rozwojem technik i sposobów obróbki, które niefortunnie nazywa się obecnie technologiami. Pierwsza definicja z lat 70. ubiegłego wieku i późniejsze definicje uwzględniały kombinacje dwóch lub więcej procesów, które mogą być równocześnie wykorzystane do usuwania materiału (np. połączenie obróbki ściernej z EDM lub ECM), albo jeden z nich ma tylko charakter wspomagający, przyczyniający się do korzystnej zmiany warunków procesu, np. w skrajnych przypadkach przez laserowe nagrzewanie materiału lub jego kriogeniczne schładzanie.

Obecnie hybrydyzacja obejmuje różne techniki wytwarzania, tj. obróbkę ubytkową, bezubytkową (przetwarzanie materiału, zmianę mikrostruktury i właściwości mechanicznych), przyrostową oraz ich kombinacje [2, 7, 8]. Aby ujednoczyć terminologię, zaproponowano zmianę ich nazw na obróbkę subtraktywną (*subtractive machining*), transformatywną (*transformative machining*) i addytywną (*additive machining*) [2, 8].

CIRP tak definiuje hybrydowe procesy wytwarzania, obejmujące procesy wytwórcze/obróbkowe [7]: *Hybrydowe procesy wytwórcze są oparte na jednoczesnej i kontrolowanej interakcji mechanizmów procesu i/lub źródeł energii/narzędzi mających istotny efekt na przebieg procesu.*

Określenie „jednoczesna i kontrolowana interakcja” oznacza, że procesy/źródła energii muszą oddziaływać – bardziej lub mniej – w tej samej strefie procesu hybrydowego i w tym samym czasie. Wzmocnienie sumarycznego efektu hybrydyzacji procesu przedstawia zasada „1+1=3”, która wskazuje na zwiększenie efektywności procesu obróbki, np. przez zmiękczenie termiczne laserem obrabianego materiału.

Wyróżnia się (rys. 3) procesy oparte na łączeniu różnych źródeł energii lub różnych narzędzi (różnych metod i sposobów kształtowania), ujęte w grupie I, oraz procesy wykorzystujące kontrolowane mechanizmy różnych procesów, które są realizowane w konwencjonalnych procesach składowych (grupa II). W I grupie wyróżnia się procesy wspomagane (*assisted processes* – podgrupa I.A) i procesy łączone (*mixed/combined processes* – podgrupa I.B).

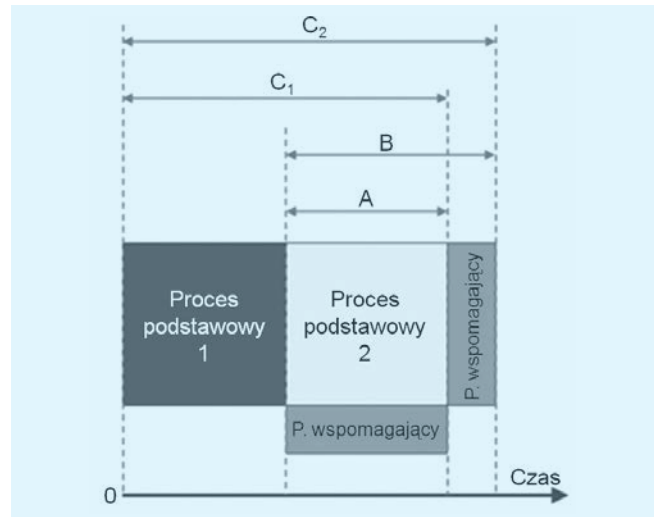


Rys. 3. Klasyfikacja hybrydowych procesów wytwórczych/obróbkowych według CIRP [2, 7]

W przypadku konwencjonalnej i niekonwencjonalnej obróbki ubytkowej największe znaczenie ma projektowanie procesów hybrydowych według zasady I.A (wspomaganie różnych sposobów skrawania energią drgań, termiczne laserem oraz mediami ciekłymi i gazowymi; także szlifowania, polerowania, EDM, ECM) i I.B (np. łączenie szlifowania i EDM; szlifowania i ECM; ECM i EDM). Inne procesy hybrydowe, dotyczące także przeróbki plastycznej, opisano w pracy [7].

W grupie II można podać przykłady łączenia cech kinematycznych dwóch sposobów skrawania, np. w postaci frezo-toczenia (*turn-milling*) i toczenia-przeciągania (*turn-broaching*), utwardzania powierzchni w czasie szlifowania (*grind-hardening*), utwardzania powierzchni przez intensywne nagniatanie przedmiotu schładzanego zmrożonym CO₂ (*cryogenic deep rolling*) czy łączenia obróbki skrawaniem z nagniataniem.

Na rys. 4 przedstawiono relacje czasowe między procesami składowymi różnych odmian procesów hybrydowych sklasyfikowanych na rys. 3. W odmianach I i II proces podstawowy i wspomagający mogą być realizowane równocześnie (przypadek A) lub sekwencyjne (przypadek B), natomiast łączenie dwóch procesów podstawowych 1 i 2 odbywa się sekwencyjnie (przypadek C₁, którego dobrą ilustracją jest połączenie wstępnego skrawania z nagnia-



Rys. 4. Relacje czasowe w hybrydowych procesach obróbkowych [9]. A – oddziaływanie równoczesne procesu podstawowego i wspomagającego, B – oddziaływanie sekwencyjne procesu podstawowego i wspomagającego, C₁ – oddziaływanie sekwencyjne dwóch procesów podstawowych, C₂ – oddziaływanie sekwencyjne dwóch procesów podstawowych i procesu wspomagającego

taniem wykończeniowym. Z kolei przypadek C₂ można odnieść do procesu ECDG, w którym oprócz EDM i ECM występuje wspomaganie ściernie. Oznacza to, że proces hybrydowy może być przypisany do czasu procesu albo do strefy obróbki [7, 9].

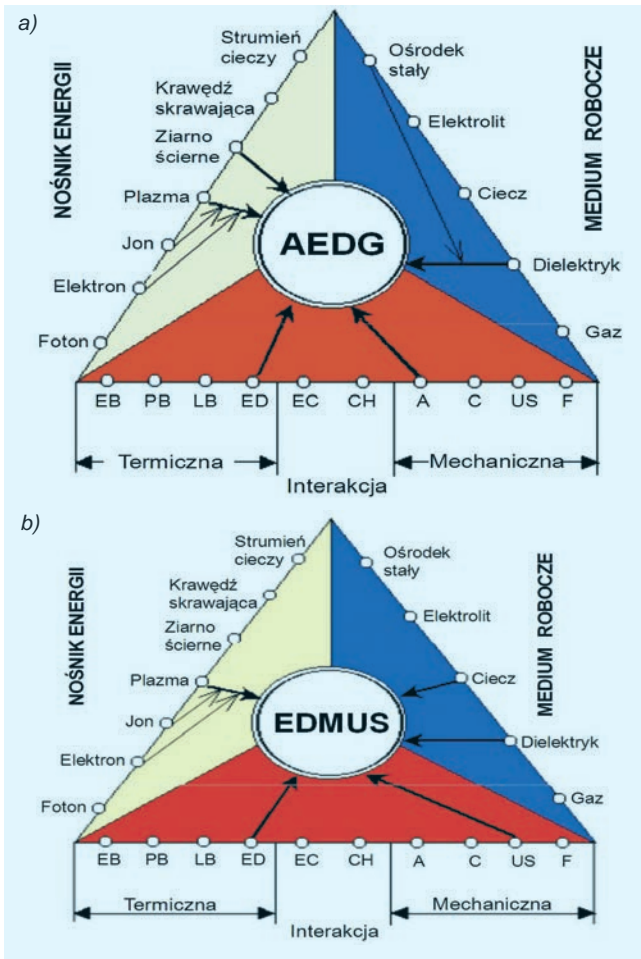
W tabl. II zestawiono kombinacje procesów hybrydowych, oparte na klasyfikacji procesów obróbki ubytkowej zaproponowanej w tabl. I. W grupie klasycznych sposobów skrawania, polegających na mechanicznym oddziaływaniu narzędzia o zdefiniowanej geometrii ostrza (*T*) na obrabiany materiał, wspomaganie procesu dotyczy zasady I.A. Z tego względu proces skrawania jest wspomagany laserem (TLB), plazmą (PLB) i drganiami ultradźwiękowymi (UST). Z kolei wspomaganie szlifowania (A) dotyczy zasady I.B i dlatego możliwe jest wspomaganie elektroerozyjne (AEDM), chemiczne (MCP), elektrochemiczne (AECH) i drganiami ultradźwiękowymi (USG). Natomiast procesy niekonwencjonalne (ED, CH, EC) mogą być łączone, np. ECDM, ECAM, i wspomagane, np. EDUSM, USECM, ECML.

Do lepszego wyjaśnienia zasad hybrydyzacji procesów obróbkowych mogą posłużyć wykresy potrójne (rys. 5), przedstawiające rodzaj interakcji mechanizmów procesu w zależności od użytego medium roboczego i nośnika/ nośników energii. Na rys. 5a i b podano przykłady wspomagania obróbki ścierniej wyładowaniami elektrycznymi (obróbki elektroerozyjno-ścierniej) i obróbki elektroerozyjnej – drganiami ultradźwiękowymi.

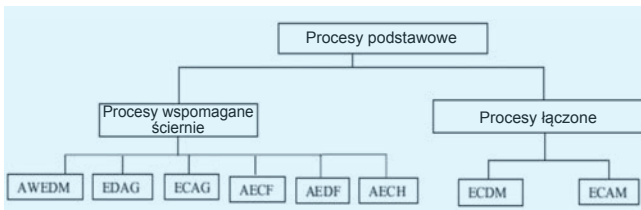
TABLICA II. Możliwości łączenia procesów obróbki ubytkowej (hybrydyzacji źródeł energii) [4, 5]

		ED	LB	EB	PB	CH	EC	A	T	US	F
Termiczne	ED	EDM					ECDM	AEDG		EDUSM	
	LB		LBM			ELB	ECML		TLB		
	EB			EBM							
	PB				PPM				TPB		
Mechaniczne	CH		ELB			CHM		EEM			CHP
	EC	ECAM	ECML				ECM	AECG		USECM	
	A	AEDM				MCP	AECH	G		USG	
	T		TLB		TPB				T	UST	
	US	EDMUS	LBMUS				USMEC	GUS	TUS	USM	USP
	F					CHP	ECL			USP	JM

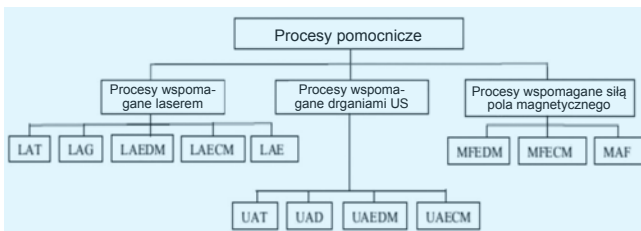
Legenda: A – ziarna ściernie (*abrasives*), T – narzędzie skrawające (*tool*), US – drgania ultradźwiękowe (*ultrasonic vibration*), F – ciecz/roztwór (*fluid*)



Rys. 5. Przykłady struktur energetycznych hybrydowych procesów obróbkowych: a) połączenie szlifowania i EDM (AEDM), b) wspomaganie wibracyjne EDM (EDMUS) [5]



Rys. 6. Podstawowe procesy obróbki hybrydowej (HMP) [10]: AWEDM – wycinanie ściernie-erozyjne, EDAG – szlifowanie ściernie-erozyjne, ECAG – szlifowanie ściernie-elektrochemiczne, AECF – wykończeniowa obróbka elektrochemiczno-ścierna, AEDF – wykończeniowa obróbka elektroerozyjno-ścierna, AECH – honowanie elektrochemiczno-ściernie, ECDM – obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna, ECAM – obróbka elektrochemiczno-plazmowa (łukowa)



Rys. 7. Pomocnicze procesy obróbki hybrydowej (HMP) [10]: LAT – laserowo wspomaganie toczenie, LAG – laserowo wspomaganie szlifowanie, LAEDM – laserowo wspomaganie obróbka elektroerozyjna, LAECM – laserowo wspomaganie obróbka elektrochemiczna, LAE – laserowo wspomaganie wytrawianie, MFEDM – wykończeniowa obróbka elektroerozyjna wspomaganie siłami pola magnetycznego, MFECH – wykończeniowa obróbka elektrochemiczna wspomaganie siłami pola magnetycznego, MAF – obróbka magnetyczno-ścierna, UAT – toczenie wspomaganie drganiem ultradźwiękowymi, UAD – wiercenie wspomaganie drganiem ultradźwiękowymi, UAEDM – EDM wspomaganie drganiem ultradźwiękowymi, UAECM – ECM wspomaganie drganiem ultradźwiękowymi

Na rys. 6 i 7 przedstawiono podział hybrydowych procesów obróbki ubytkowej na podstawowe i pomocnicze [10], które w zasadzie odpowiadają grupie procesów wspomaganych (grupa I.A na rys. 3) odniesionych do procesów konwencjonalnych i niekonwencjonalnych. Jak jednak zaznacza Ruszaj [11, 12], procesy obróbki ściernie wspomagane oddziaływaniem chemicznym, elektrochemicznym czy elektroerozyjnym – z uwagi na szkodliwy wpływ stosowanych w nich płynów roboczych (zwłaszcza elektrolitów) na środowisko pracy i środowisko naturalne – są ostatnio ograniczane do specjalnych stopów i kompozytów.

Podstawy obróbki hybrydowej – procesy wspomagane

Na rys. 7 przedstawiono kombinacje procesów podstawowych i wspomagających, stosowane w różnych technikach wytwarzania. Do najczęściej wykorzystywanych wspomagających źródeł energii należą: drgania o częstotliwości 0,1÷80 kHz i amplitudzie 1÷200 μm, media ciekłe i gazowe (CCS pod ciśnieniem, ciekły azot LN2, schłodzony CO₂) oraz laser [7, 13]. Z tego względu trzy najbardziej rozpowszechnione grupy procesów wspomaganych (grupa I.A na rys. 3) są wspomagane drganiem (*vibration/US-assisted machining*), termicznie laserem (*thermally-assisted machining*) i mediami w różnym stanie i pod różnym ciśnieniem (*media-assisted machining*).

Dotychczasowe zastosowania procesów wspomaganych i stan zaawansowania badań pokazano na rys. 8.

Częstotliwość publikowania wyników badań:	Procesy podstawowe										
	Toczenie	Frezowanie	Wiercenie	Szlifowanie	Polerowanie/Docieranie	EDM	ECM	LBM	Kształtowanie plastyczne	Cięcie na nożycach	Wytrawianie
● bardzo duża											
○ duża											
○ mała											
Źródła energii wspomagającej	Drgania/US	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Laser (LB)	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Struga wodna (WJ)							○			
	Ciecz pod ciśnieniem (HPC)	○			○				○		
	Pole magnetyczne (MF)	○				○	○	○		○	
	Przewodzone ciepło								○		

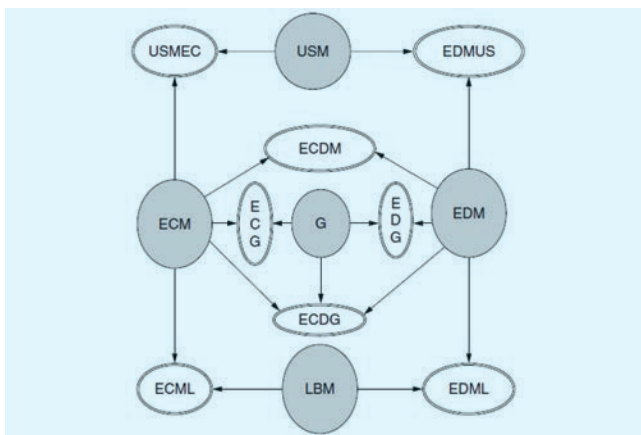
Rys. 7. Kombinacje wspomaganych procesów wytwórczych [7]

Procesy wspomagane drganiem	Badania podstawowe	Badania rozwojowe	Doskonalenie prototypu	Testy produkcyjne	Produkcja masowa
Toczenie					
Frezowanie					
Wiercenie					
Szlifowanie					
Polerowanie					
EDM					
Kształtowanie plastyczne					

Rys. 8. Stan zaawansowania badań nad wspomaganymi procesami wytwórczymi [7]

Podstawy obróbki hybrydowej – procesy łączone/kombinowane

Jak wspomniano, łączenie dwóch lub więcej subtraktywnych procesów obróbkowych jest – zgodnie z definicją – uwarunkowane ich równoczesnym oddziaływaniem w mniejszym lub większym stopniu na mechanizm usuwania materiału (grupa I.B na rys. 3). Dotychczas najszersze zastosowanie znalazły procesy łączące ścierny mechanizm szlifowania i termiczny efekt wyładowań elektrycznych, tj. AEDG (EDG) lub roztwarzanie elektrochemiczne, tj. AECG (ECG), oraz kombinację EDM i ECM, tj. ECDM. W tym ostatnim przypadku może dojść trzeci mechanizm ścierny, tj. w procesie hybrydowym ECDG. W trakcie elektrochemicznej obróbki ścierną prowadzone jest nie tylko szlifowanie (ECG), ale także honowanie (ECH) i dogładzanie (superfinisz) (ECS). Zasady łączenia procesów składowych w procesy hybrydowe przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Zasady łączenia procesów obróbkowych [5]

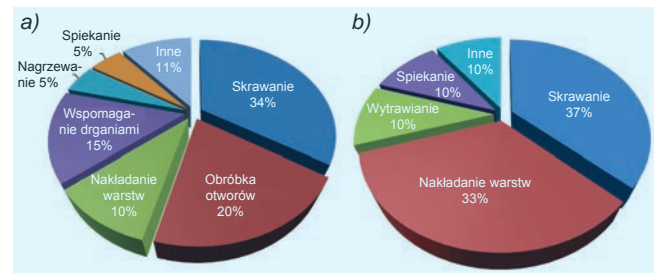
Podstawy obróbki hybrydowej – procesy w mikro- i nanoskali

Na rys. 10 pokazano różnice w strukturze procesów hybrydowych w mikro- (rys. 10a) i nanoskali (b).

Wyraźnie widać, że największy udział w mikroobróbce (ok. 64%) mają procesy subtraktywne i addytywne. Z kolei w nanoobróbce większe znaczenie ma – pomimo nadal istotnego udziału skrawania – proces addytywny (nakładanie warstw – udział ok. 33%). W mikroobróbce 55,8% stanowią wspomagane procesy subtraktywne przeprowadzane równocześnie, a 47,7% – procesy przeprowadzane sekwencyjnie. W nanoobróbce 30,7% procesów ma strukturę C₂, czyli występuje trzeci proces wspomagający, a 69,2% ogółu procesów hybrydowych prowadzi się sekwencyjnie [9].

Podsumowanie

- Realizacja strategii Produkcji/Wytwarzania 4.0 jest ściśle związana z hybrydyzacją procesów wytwórczych, w tym procesy obróbki ubytkowej, ze względu na dużą rolę w osiąganiu wysokiego poziomu innowacyjności wytwarzania. Hybrydyzacja dotyczy nie tylko normalnych procesów skrawania, ale także procesów w mikro- i nanoskali.
- Hybrydowe procesy obróbki przyczyniają się, ze względu na efekt synergii, do uzyskania wynikowego efektu przewyższającego sumę efektów procesów składowych realizowanych oddzielnie. Z tego względu pojawiają się dodatkowe możliwości optymalizacji procesu.
- W praktyce mogą być stosowane procesy hybrydowe oparte na wspomaganii dodatkowym źródłem energii,



Rys. 10. Udziały procesów składowych w hybrydowych procesach wytwórczych w mikro- (a) i nanoskali (b) [9]

łączeniu różnych źródeł energii lub/i narzędzi oraz kontrolowaniu różnych mechanizmów procesów składowych (ubytkowych, kształtowania plastycznego, obróbki cieplnej, obróbki przyrostowej).

- W grupie konwencjonalnych sposobów skrawania (toczenie, wiercenie, frezowanie) największe znaczenie ma wspomaganie energią drgań US, laserem i mediami technologicznymi (cieczą pod wysokim ciśnieniem, ciekłym azotem).
- W grupie konwencjonalnych sposobów obróbki ścierną (szlifowanie, honowanie, polerowanie, docieranie) największe znaczenie ma wzmocnienie efektu ściernego przez oddziaływanie elektroerozyjne i elektrochemiczne oraz sił magnetycznych. Jednak rozwój tej grupy procesów hybrydowych ograniczają restrykcje ekologiczne.
- Ze względów ekologicznych i pod wpływem wymagań co do funkcjonalności powierzchni elementów maszyn rozwijane są procesy hybrydowe, w których kontroluje się mechanizmy procesów składowych, np. kontrolowany przepływ ciepła w utwardzaniu szlifowaniem, intensywne odkształcenie warstwy wierzchniej połączone z oziębianiem kriogenicznym i przemianą fazową materiału.
- Obserwuje się szybki rozwój procesów i urządzeń hybrydowych, które łączą kształtowanie addytywne i obróbkę wiórową CNC.

LITERATURA

1. Grzesik W. „Wizje i strategie wytwarzania”, cz. I i II. *Mechanik*. 83, 3 (2010): s. 145–148 (cz. I). 83, 4 (2010): s. 232–239 (cz. II).
2. Grzesik W. „Advanced Machining Processes of Metallic Materials”. Amsterdam: Elsevier, 2017.
3. Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. Warszawa: PWN, 2018.
4. Gupta K., Jain N.K., Laubscher R.F. „Hybrid Machining Processes. Perspective on machining and finishing”. Heidelberg: Springer, 2016.
5. El-Hofy H. A.-G. „Advanced Manufacturing Processes. Nontraditional and Hybrid Machining Processes”. New York: McGraw Hill, 2005.
6. Roderburg A., Klocke F., Zeppenfeld Ch. “Design methodology for hybrid production processes”. *TRIZ Journal*. April 2009. www.triz-journal.com/archives/2009/04/02/.
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. Zhu Z., Dhokia V.G., Nassehi A., Newman S.T. “A review of hybrid manufacturing processes”. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 26, 7 (2013): s. 596–615.
9. Chu W.-S., Kim Ch.-S., Lee H.-T., Choi J.-O., Park J.-I., Song J.-H., Jang K.-H., Ahn S.-H. “Hybrid manufacturing in micro/nano scale: a review”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 1, 1 (2014): s. 75–92.
10. Shrivastava P.K., Dubey A.K. “Electrical discharge machining-based hybrid machining processes: A review”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 228, 6 (2013). DOI: 10.1177/0954405413508939.
11. Ruszaj A., Skoczypiec S. „Wybrane zagadnienia obróbki elektrochemiczno-ścierną”. *Mechanik*. 87, 2 (2015): s. 103–105.
12. Ruszaj A. „Obróbka elektrochemiczna – stan badań i kierunki rozwoju”. *Mechanik*. 90, 12 (2017): s. 1102–1109.
13. Jawahir I.S., Attia H., Biermann D., Duflou J., Klocke F., Meyer D., Newman S.T., Pusavec F., Putz M., Rech J., Schulze V. “Cryogenic manufacturing processes”. *Annals of the CIRP Manufacturing Technology*. 65, 2 (2016): s. 713–736. ■