

Hybrydowe procesy kształtowania wyrobów, integrujące techniki przyrostowe i ubytkowe

Hybrid manufacturing of metallic parts integrated additive and subtractive processes

WIT GRZESIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.58>

Przedstawiono nową koncepcję hybrydowego kształtowania złożonych wyrobów, bazującą na integracji techniki przyrostowej oraz wykańczającej obróbki ubytkowej na jednej obrabiarence CNC. Ta koncepcja jest intensywnie rozwijana w ramach strategii Produkcja/Wytwarzanie 4.0. Podano zasady i możliwości technologiczne integracji laserowego napawania proszkowego i wykańczającego toczenia/frezowania w różnych zastosowaniach przemysłowych, takich jak: kształtowanie przyrostowe dodatkowych elementów w złożonych geometrycznie wyrobach, nanoszenie warstw funkcjonalnych oraz naprawa zużytych lub uszkodzonych, dużych i drogich elementów, np. łopatek i obudów turbin lotniczych. Omówiono stosowane strategie technologiczne, programy CAD/CAM i rozwiązania konstrukcyjne obrabiarek hybrydowych CNC.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka hybrydowa, obróbka przyrostowa, obróbka ubytkowa CNC, naprawa części, obrabiarki hybrydowe

This review paper highlights the hybrid manufacturing processes which integrate the additive and subtractive processes performing on one hybrid platform consisting of the LMD (laser metal deposition) unit and multi-axis CNC machining center. This hybrid technology is rapidly developed and has many applications in Production/Manufacturing 4.0 including the LRT (laser repair technology). In particular, some important rules and advantages as well as technological potentials of the integration of a powder metal deposition and finishing CNC milling/turning operations are discussed and overviewed. Some representative examples such as formation of difficult features around the part periphery, deposition of functional layers and coatings and repair of high-value parts in aerospace industry are provided. Moreover, the technological strategies, CAD/CAM and CAI programs and construction designs of the hybrid manufacturing platforms are explained. Some conclusions and future trends in the implementation of hybrid processes are outlined.

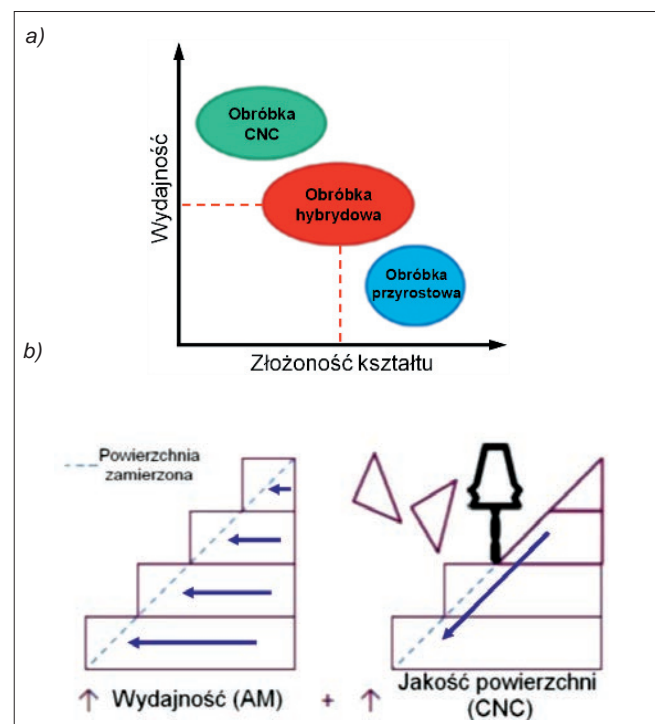
KEYWORDS: hybrid machining, additive machining, CNC machining, repair technology, hybrid machine tools

Artykuł jest kontynuacją tematu hybrydowej obróbki konwencjonalnej i niekonwencjonalnej, zapoczątkowanego przez autora w poprzednim wydaniu miesięcznika *Mechanik* [1]. Autor rozwija problematykę integracji/zespolenia kilku procesów w jednym urządzeniu wytwórczym, nazywanym urządzeniem hybrydowym, które powstało na bazie wielofunkcyjnych obrabiarek CNC do obróbki zintegrowanej/kompletnej (*multi-tasking machine tools*), takich jak wieloosiowe centra frezarskie czy centra tokarsko-frezarskie (*turning-milling centers*) [2, 3]. Pierwszy etap integracji, który nastąpił na przełomie lat 80. i 90., polegał na zainstalowaniu źródła lasera wspomagającego obróbkę

konwencjonalną. Obecnie hybrydyzacja procesów wytwórczych/obróbkowych zakłada prowadzenie na jednym urządzeniu obróbki przyrostowej, czyli addytywnej (*additive manufacturing* – AM), oraz końcowej/wykańczającej obróbki skrawaniem (subtraktywnej) wraz z automatyczną kontrolą wymiarową [1, 3]. Obróbkę addytywną zwykle nazywa się drukowaniem 3D (*3D printing*).

Wachlarz możliwych rozwiązań jest bardzo szeroki – od kształtowania dodatkowych elementów przedmiotu za pomocą drukowania 3D i napawania proszkowego (*laser metal deposition* – LMD), przez nakładanie elementów z materiałów innych niż bazowy, po naprawę uszkodzonych/zużytych, drogich części.

Jak pokazano na rys. 1a, obróbka hybrydowa w takim wariacie jest kompromisem między możliwością kształtowania metodą przyrostową wyrobów o złożonej konstrukcji oraz dużą produktywnością uzyskiwaną w obróbce CNC. Należy podkreślić, że produktywność procesu AM jest o rząd wielkości mniejsza w porównaniu ze skrawaniem CNC. Użytkownicy często mają więc dylemat: wybrać większą wydajność (większą grubość nakładanej warstwy materiału) czy lepszą jakość powierzchni (mniejszą grubość warstwy materiału). W rezultacie hybrydowy proces wytwarzania (rys. 1b) jest opłacalny przy mniejszych i średnich seriach, ponieważ daje możliwość niezależnej kontroli wydajności i jakości powierzchni [3].

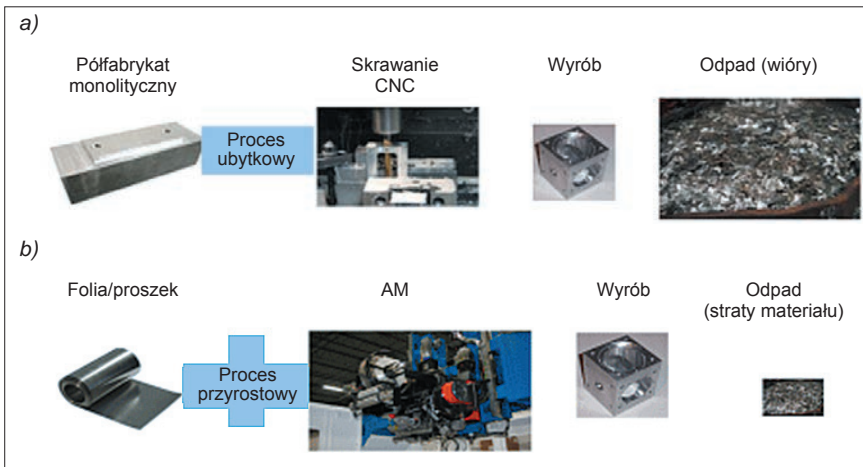


Rys. 1. Cechy procesów składowych (a) i ich integracja w procesie hybrydowym AM + CNC (b) [4]

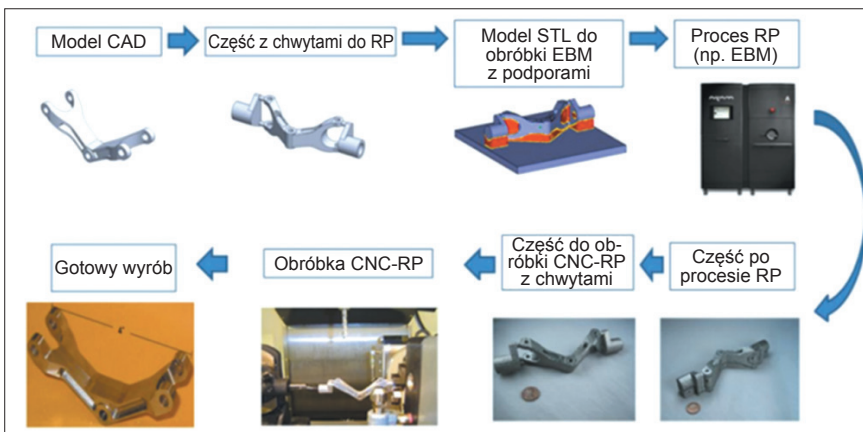
* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik (w.grzesik@po.opole.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Opolskiej

Połączenie tych komplementarnych technik jest obecnie standardem w przypadku większości wyrobów metalowych wytwarzanych techniką AM, gdy wymagane są: odpowiednia jakość (funkcjonalność) powierzchni, zawężone tolerowanie wymiarów, wyeliminowanie ryzyka nadmiernych naprężeń, estetyka wyrobu. Ważnym argumentem przemawiającym za tą technologią jest radykalne zmniejszenie ilości odpadów (rys. 2) w efekcie zastosowania folii lub proszków zamiast monolitycznych półfabrykatów. To pozwala zminimalizować naddatek na wykańczającą obróbkę skrawaniem. Należy dodać, że podczas kształtowania złożonych elementów monolitycznych z aluminium i tytanu w branży lotniczej usuwa się nawet 80÷90% objętości materiału wyjściowego [3].

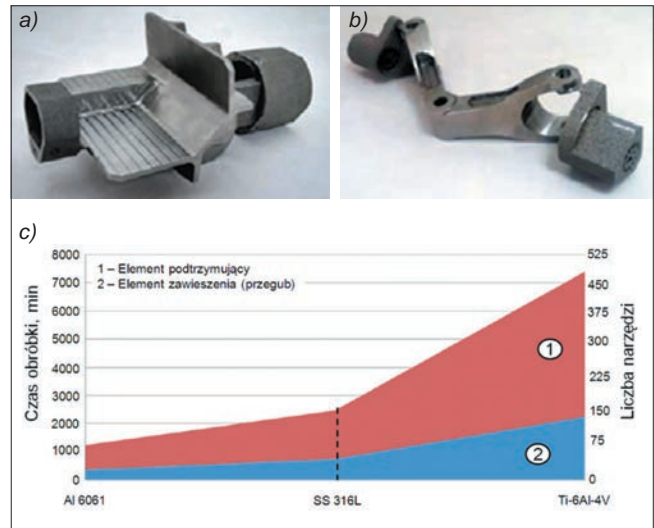
Na rys. 3 przedstawiono schemat kształtowania wyrobu w hybrydowym procesie AIMS (*additive system integrated with subtractive methods*), który polega na szybkim prototypowaniu metodą EBM i kolejnym szybkim skrawaniu na obrabiarce CNC, po zamocowaniu za pomocą wykonanych wcześniej bocznych elementów chwytowych (rys. 4a i b). Proces AIMS wymaga użycia dwóch rodzajów podtrzymek ochronnych (rys. 4a i b), aby uzyskać wysięg podczas nakładania warstw i zamocowanie części w uchwycie na obrabiarce CNC. Należy przyjąć, że czas wymiany narzędzia nie jest uwzględniany w łącznym czasie wytwarzania. Z tego powodu całkowity czas wytwarzania będzie się wydłużał jako pochodna mniejszej trwałości ostrza i większej liczby wymian narzędzia (rys. 4c), co łatwo zauważyć w przypadku stopu tytanu Ti-Al6-4V.



Rys. 2. Porównanie obróbki ubytkowej (a) i przyrostowej (b) [4]



Rys. 3. Schemat kształtowania wyrobu w hybrydowym procesie AM (EBM, tj. *electron beam melting*, lub DMLS) oraz SM (CNC-RP) [5]



Rys. 4. Przykłady części wykonywanych metodą hybrydową – podpora (a), przegub (b) – oraz porównanie czasu skrawania dla części wykonywanych metodą RP na obrabiarce CNC (c) [5]

Podstawy hybrydowego wytwarzania przyrostowo-ubytkowego

Dotychczasowe badania w skali laboratoryjnej i przemysłowej były ukierunkowane na utworzenie modułowej platformy wytwórczej integrującej różne techniki przyrostowe (AM) z obróbką skrawaniem (SM CNC), np. [4–7]:

- FDM/wyciskanie z zastosowaniem różnych wariantów obrabiarek CNC;
- SLM z centrami pionowymi VMC, np. Lumex Avance-25, Matsuura, Japan;
- DMD, tj. bezpośrednie nanoszenie warstw metalu, w tym napawanie laserowe (*laser cladding*) na centrum obróbkowym – np. Hamuel HSTM 1000 (pięcioosiowym centrum tokarsko-frezarskim), GF HPM 450U (pięcioosiowym centrum frezarskim ze stołem uchylno-obrotowym), DMG MORI Lasertec 65 3D (pięcioosiowym centrum frezarskim) czy Mazak VC-500 AM (pięcioosiowym pionowym centrum frezarskim).

Ogólną koncepcję hybrydowej obróbki typu AM + SM CNC przedstawiono poglądowo na rys. 5. Równocześnie na bazie modelu 3D CAD część jest drukowana na podstawie danych przesłanych w formacie STL i w odpowiednim systemie CAM tworzony jest program sterujący CNC. Na następnym etapie wytworzony element poddaje się skrawaniu wykańczającemu na obrabiarce CNC. Dostępny jest zintegrowany system programowania, bazujący na pakiecie NX CAM (rys. 4b), umożliwiającą przeprowadzenie kompletnej obróbki hybrydowej.

Podstawowym problemem konstrukcyjnym w synergetycznej integracji technik AM i CNC jest dodanie systemu do praktycznie każdej

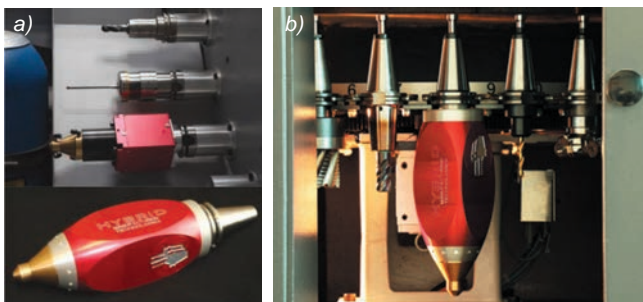


Rys. 5. Ogólna koncepcja integracji (a) i kompletnego programowania (b) obróbki przyrostowej i ubytkowej (AM + CNC) według firmy Siemens [4]

obrabiarki CNC (nowej lub używanej, bez względu na zastosowany układ sterowania) bez specjalnej modyfikacji albo po odpowiedniej modernizacji (*retrofitting*). Pionierskim projektem badawczym, zakończonym w 2008 r., był RECLAIM (*Remanufacture of high value products using a combined laser cladding, inspection and machining system*) [4, 8], który zalecał opłacalną modernizację nowych obrabiarek CNC przez instalację na nich modułu napawania laserowego (rys. 7). Należy wspomnieć, że jedna z pierwszych obrabiarek hybrydowych firmy AeroMet Corp., integrująca laserowe napawanie/nanoszenie warstw na frezarce CNC, była zastosowana już w 2004 r. do wytwarzania materiałów/wyrobów dla przemysłu lotniczego na potrzeby samolotu myśliwskiego F-15.

Ważnym problemem konstrukcyjnym, przed którym stanęli pomysłodawcy wbudowania systemu DMD (*directed metal deposition*) w obrabiarkę CNC, było wykorzystanie standardowych uchwytów narzędziowych, np. stożka HSK 63, do montażu głowicy we wrzecionie obrabiarki (rys. 6b). Konieczny jest jednak dodatkowy rozdzielacz, który: zasila głowicę – gdy jest zamontowana we wrzecionie, odcina zasilanie – gdy głowica LMD jest zamieniana na frez.

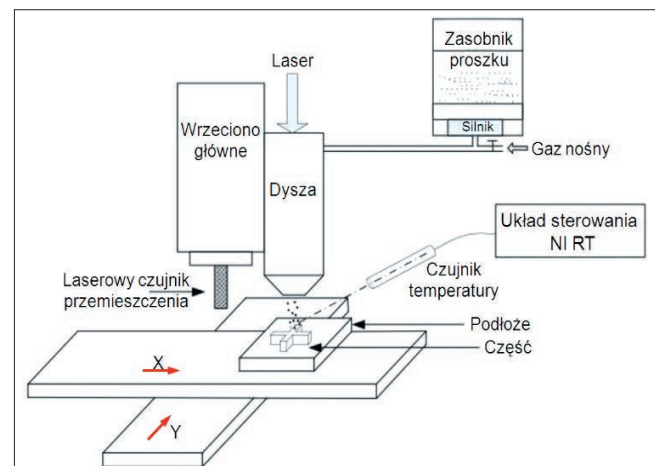
Schemat budowy i działania pięcioosiowej prototypowej obrabiarki hybrydowej, którą zaprojektowano w Laborato-



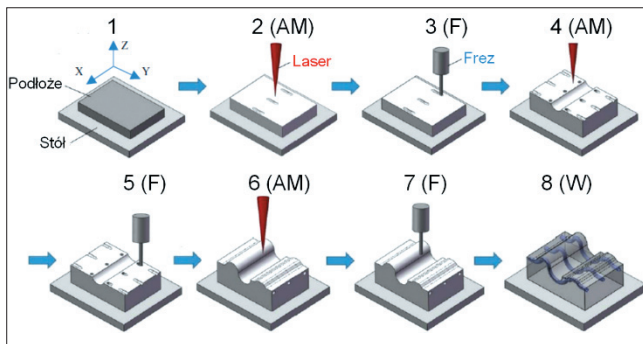
Rys. 6. Przykład umieszczenia w magazynie narzędzi głowicy do napawania, frezu kulistego i sondy pomiarowej (a) (poniżej widok głowicy do napawania proszkowego) oraz pionowy magazyn narzędziowy hybrydowego centrum tokarsko-frezarskiego HSC (b) [4, 9]

rium Laserowo Wspomaganych Procesów Wytwórczych (LAMP) na Uniwersytecie Missouri pod koniec lat 90., przedstawiono na rys. 7. W obrabiarce zintegrowano proces addytywny (LMD) i subtraktywny (frezowanie), aby umożliwić tworzenie prototypów o cienkościennych strukturze ze złożonymi elementami zewnętrznymi, które nie są możliwe do uzyskania w oddzielnych procesach AM (LMD) i SM CNC. Inne zastosowania tej obrabiarki to: naprawy uszkodzonych elementów, tworzenie gradientowych materiałów funkcjonalnych, wytwarzanie elementów o dużym wysięgu bez dodatkowych podpór, wbudowywanie sensorów i wykonywanie specjalnych kanałków wewnętrznych. Maszynę wyposażono w: sterowanie w czasie rzeczywistym NI RT firmy Mikron, czujnik światłowodowy IR do pomiaru temperatury w strefie topienia proszku, laserowy czujnik przemieszczenia firmy Omron do ustalania pozycji głowicy oraz system wizyjny Fastcom [10].

Na rys. 8 przedstawiono przebieg hybrydowego procesu wytwarzania (A/SM) złożonego z selektywnego topienia laserowego SLM (*selective laser melting*) i frezowania



Rys. 7. Konstrukcja obrabiarki hybrydowej z wrzecionem frezarskim i głowicą do laserowego napawania proszkowego [10]



Rys. 8. Przebieg hybrydowego procesu A/SM [11]. Oznaczenia: AM – obróbka addytywna, F – frezowanie, W – obróbka wykańczająca (zwykle polerowanie)

CNC. Cyfrowy model CAD zostaje podzielony na cienkie warstwy, które następnie są wirtualnie nanoszone metodą STM, warstwa po warstwie. Podłoże (substrat) jest zamocowane do stołu obrabiarki. Część jest tworzona z proszku, który jest stapiany, kiedy laser skanuje powierzchnię. Proces jest powtarzany i postępuje, gdy platforma obniża się kolejno o grubość warstwy, a naniesione warstwy proszku są sukcesywnie stapiane i tworzą fragment spiekanej części (2), który podlega następnie frezowaniu (3). Całkowite ukształtowanie części następuje po kolejnych dwóch etapach przemiennej obróbki przyrostowej i ubytkowej – odpowiednio (4) i (5) oraz (6) i (7). Należy podkreślić, że frezowanie usuwa zwykle błędy wymiarów i kształtu wprowadzane w poprzedniej operacji AM. Możliwe jest wykonanie złożonych zarysów wewnętrznych, np. kanałków chłodzących.

Przykłady zastosowania procesów hybrydowych AM + SM CNC

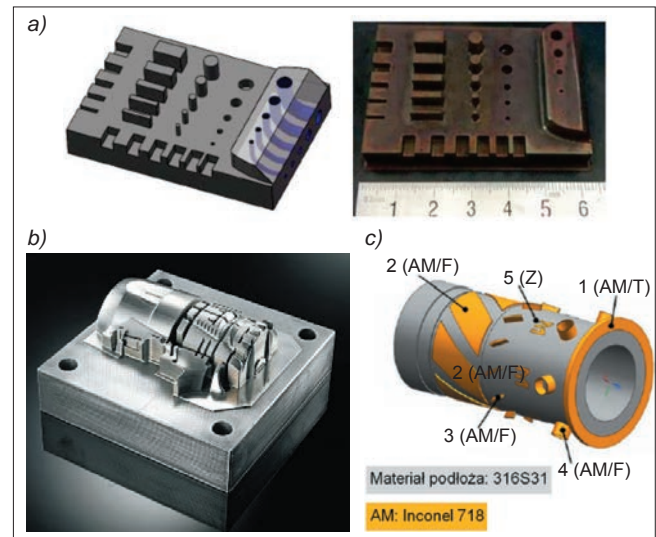
W ostatnich latach obserwuje się znaczący wzrost zainteresowania hybrydową obróbką addytywną i ubytkową w różnych obszarach. Wynika to przynajmniej z kilku powodów [4, 12–15], w tym z możliwości: wytwarzania elementów o żądanej dokładności i jakości powierzchni; dobudowy złożonych fragmentów (np. króćców i kołnierza – rys. 9c i 11a), co obniża koszty; wykonywania napraw w jednym zamocowaniu; wytwarzania elementów z wielu materiałów w technologii druku 3D (np. nanoszenie warstw z Inconelu 718 – rys. 9c).

Forma wtryskowa przedstawiona na rys. 9a została wykonana z proszku stali utwardzanej dyspersyjnie 18Ni (C300) o wielkości ziarna 35 μm na podłożu ze stali nierdzewnej przez spiekanie metodą SLM i frezowanie z wysoką prędkością – HSM (*high speed milling*). Stosowano stałą grubość nakładanej warstwy (40 μm) i specjalną strategię skanowania laserowego, aby uniknąć zniekształceń czy pęknięć [4]. Prędkość przemieszczenia wiązki lasera była równa 1400 mm/s, a średnica plamki lasera – ok. 0,2 mm. Frezowanie odbywało się w stanie nagrzanym i z tego względu temperatura skrawania była wyższa niż w procesie konwencjonalnym. Część po obróbce podlega jeszcze obróbce cieplnej.

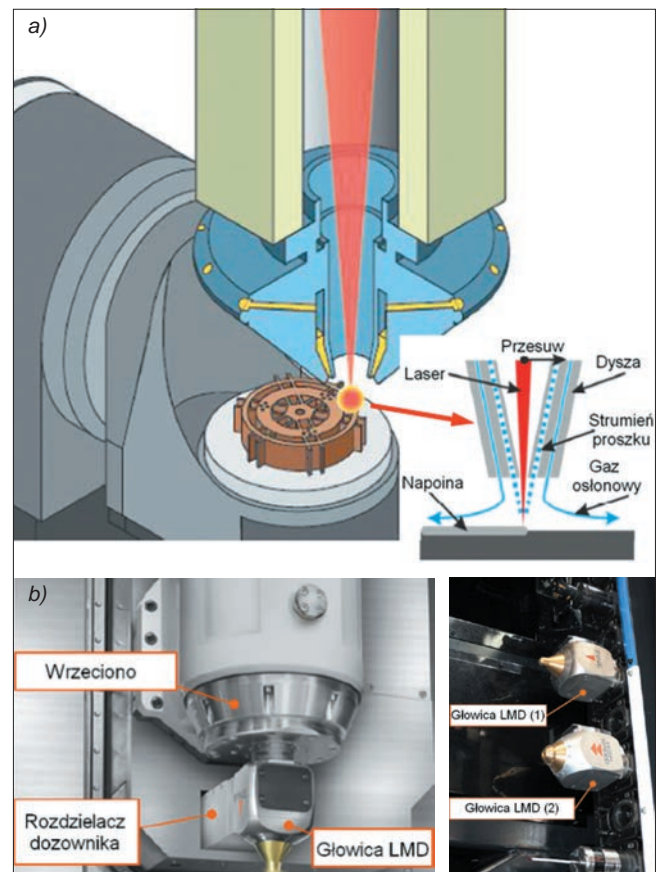
Forma wtryskowa przedstawiona na rys. 9b została w całości wykonana na obrabiarkie hybrydowej Matsuura Lumex Avance-25, przy czym na pierwszym etapie stosowano spiekanie laserowe proszku metalu (3-D SLS), a na drugim – szybkościowe frezowanie [19]. Obrabiarka jest wyposażona w dwułopatkowy układ zagęszczania stopionego proszku – łopatką prowadzącą czysty ścieżkę pod nową warstwę, a pomocnicza wygładza i zagęszcza świeżo nałożoną warstwę. Wykorzystany proces hybry-

dowy przekłada się na znaczne oszczędności kosztów i w zasadzie eliminuje EDM jako metodę wytwarzania form i matryc.

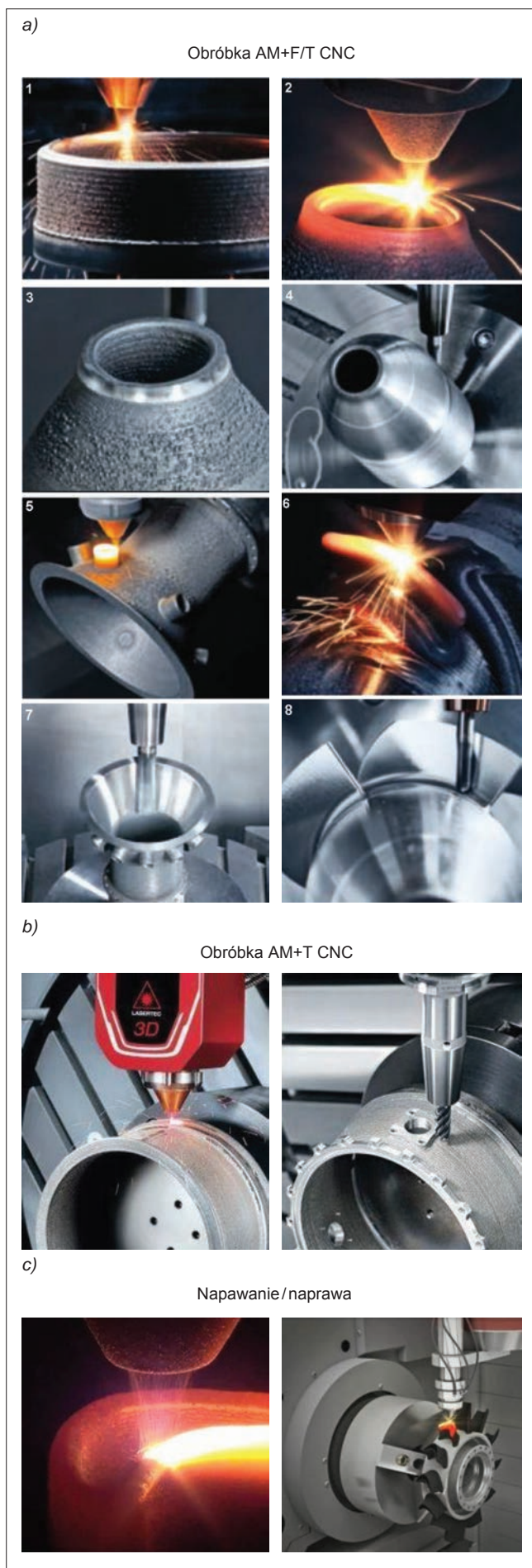
Wał drążony, pokazany na rys. 9c, wykonano na obrabiarkie hybrydowej INTEGREGX i-400 AM firmy Mazak metodą przyrostową – w dwóch etapach. Zastosowano dwie głowice do laserowego napawania, pracujące z różną wydajnością – HS LMD i F LMD (rys. 10b). Zasadę



Rys. 9. Forma wtryskowa z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi wykonana w hybrydowym procesie A/SM (*additive/subtractive manufacturing*) (a), forma ciśnieniowa wykonana w hybrydowym procesie SLM + frezowanie CNC (b) oraz wał drążony, wykonany na potrzeby przemysłu naftowego z nałożonymi lokalnie warstwami ze stopu Inconel 718 (c) [4, 11, 13, 16, 17]. Oznaczenia: AM/T – obróbka addytywna plus toczenie, AM/F – obróbka addytywna plus frezowanie, Z – znakowanie laserowe



Rys. 10. Zasada procesu LMD (*laser metal deposition*) (a) oraz widok głowic do nakładania warstw z różną wydajnością, zamocowanych we wrzecionie frezarskim (b) [14, 17]



Rys. 11. Przykłady proszkowego napawania laserowego i frezowania/toczenia CNC (a, b) oraz naprawy łopatek (c) [7, 18]

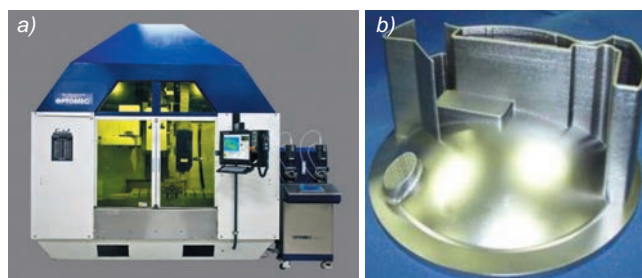
proszkowego napawania laserowego (*laser cladding*) w procesie AM przedstawiono na rys. 10a. W obróbce przyrostowej (rys. 9c) nanosi się kołnierz (1), sześć segmentów spiralnej powłoki (2), 12 płetw (3) i sześć króćców (4) ze stopu Inconel 718 (użyto proszku o wielkości ziarna $50\div 100\ \mu\text{m}$). Operacje 1, 2 i 3 przeprowadza się za pomocą głowicy HS LMD (*high speed LMD*), a króćce formuje się głowicą F LMD (*fine LMD*). Całkowity czas wykonania części wynosił 634 min i – co ciekawe – nie był krótszy od czasu wykonania monolitycznej części z Inconelu 718. Decydującymi czynnikami były jednak dużo niższe koszty materiałowe i narzędziowe oraz zachowanie wymaganych właściwości eksploatacyjnych (odporności termicznej, korozyjnej, na utlenianie i pęcznienie).

Firma DMG MORI osiągnęła wysoki poziom rozwoju w zakresie hybrydowego kształtowania, nanoszenia powłok i napraw [7]. Jej standardową obrabiarką hybrydową o dużej uniwersalności jest centrum obróbkowe Lasertec 65 3D, które wykorzystuje technikę napawania proszkiem nadmuchiwany do strefy wiązki lasera (*blown-powder deposition welding*). Ta technika jest bardziej wydajna niż spiekanie laserowe, np. wykonanie części o masie ok. 3,5 kg jest 20-krotnie szybsze, a frezowanie wykańczające stosuje się tylko w uzasadnionych przypadkach. Obrabiarka powstała na bazie pięcioosiowego centrum do precyzyjnego frezowania z możliwością pięcioosiowej obróbki symultanicznej. Jednostka AM została wyposażona w laser diodowy o mocy 2,5 kW. Przykłady możliwości technologicznych i praktycznego zastosowania tej obrabiarki przedstawiono na rys. 11.

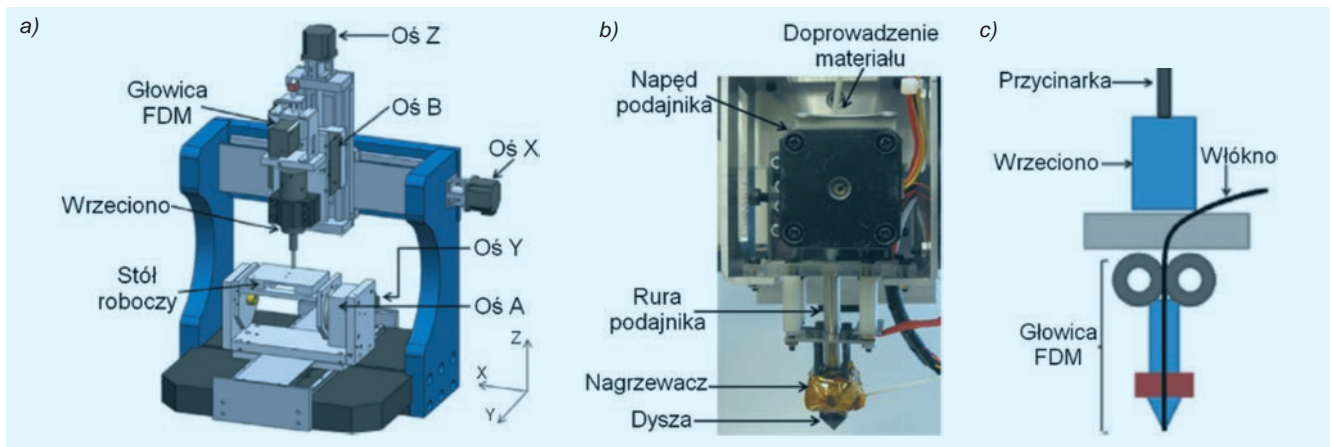
Proces technologiczny stopniowego kształtowania części jest podobny do procesu typu A/SM, przedstawionego na rys. 8. Po napawaniu części walcowej (1) i stożkowej (2) następuje obróbka CNC (3) i wykańczająca (4). Możliwe są nabudowa króćców (5) lub zwojów śrubowych (6), a następnie frezowanie wykańczające całego zarysu (7, 8). Możliwości obrabiarki hybrydowej są rozszerzane o toczenie, co pozwala na obróbkę elementów obrotowo-symetrycznych z późniejszym frezowaniem nadlewów (rys. 11b). Stół obrotowy jest rozwiązaniem stosowanym w napawaniu lub naprawie (rys. 11c), np. łopatek wirnika sprężarki.

Na rys. 12a przedstawiono pionowe centrum frezarskie wyposażone w moduł obróbki przyrostowej LENS (*laser engineered net shaping*) Print Engine firmy OPTOMECC, który ma liczne zastosowania we frezarkach, tokarkach i robotach – jako uzupełnienie procesu obróbki ubytkowej. Przykład części wytworzonej w jednym ustawieniu pokazano na rys. 12b.

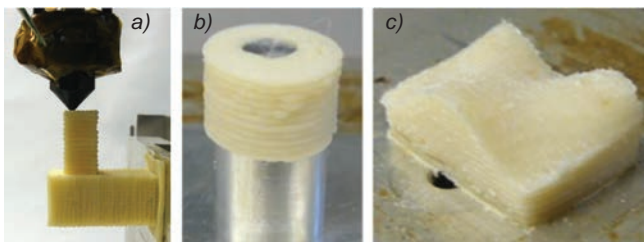
Nowym pomysłem jest integracja popularnej techniki szybkiego prototypowania FDM (*fused deposition modelling*) i frezowania CNC (rys. 13). Ma to zastosowanie w przypadku elementów z tworzyw polimerowych,



Rys. 12. Pionowe centrum frezarskie wyposażone w moduł LENS AM firmy OPTOMECC (a) oraz przykład obudowy wykonanej metodą hybrydową (b) [9]



Rys. 13. Konstrukcja obrabiarki hybrydowej FDM + CNC: a) schemat budowy, b) konstrukcja ekstrudera FDM, c) zasada działania głowicy wyciskającej [20]



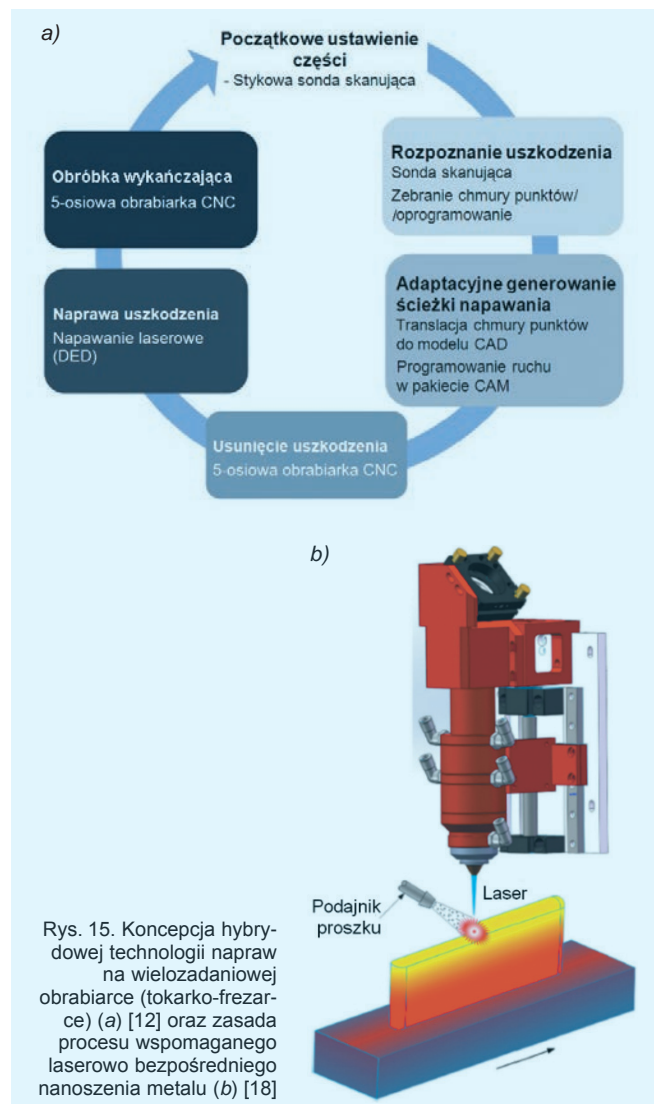
Rys. 14. Przykłady części wykonywanych na obrabiarkach hybrydowych FDM + CNC: a) część z wysięgiem (typu Γ), b) stopniowy element z aluminium z wypełnieniem z tworzywa, c) element z powierzchnią swobodną po frezowaniu [20]

drukowanych bez dodatkowych podpór lub wzmacnianych wypełnieniami metalowymi [20]. Obróbkę CNC stosuje się do wykańczania, przycinania lub kształtowania powierzchni swobodnych (rys. 14). Pozwala ona usunąć niekorzystny wpływ procesu FDM na kształt elementu wskutek dużego skurczu materiału i wprowadzania nadmiernych naprężeń własnych. Konstrukcję prototypowej obrabiarki hybrydowej wyposażonej w głowicę do wyciskania płynnego tworzywa przedstawiono na rys. 13a i b, a zasadę działania głowicy – na rys. 13c.

Naprawa wyrobów z zastosowaniem zintegrowanej techniki AM + CNC

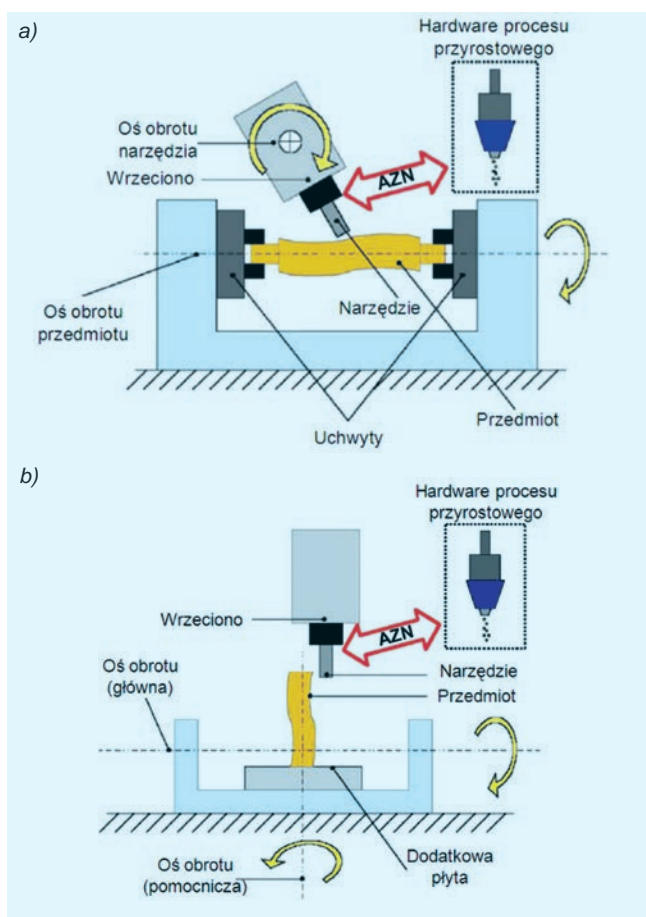
Odrębnym obszarem badań i zastosowań obróbki hybrydowej jest regeneracja/odnowa (*remanufacturing*) drogich części dla przemysłu lotniczego, w którym na dużą skalę wykorzystuje się materiały żarowytrzymałe i żaroodporne (stopy HRSA), np. stop tytanu Ti6-4 czy Inconel 718. W początkowej fazie rozwoju skoncentrowano się na naprawie łopatek turbin z Ti-6Al-4V z uszkodzonymi krawędziami i śladami zużycia. Obecnie laserowa technologia napraw LRT (*laser repair technology*) – obejmująca kilka podobnych technik nanoszenia warstw, takich jak: bezpośrednie nanoszenie metalu DMD (*direct metal deposition*), laserowe wytwarzanie przyrostowe LAM (*laser additive manufacturing*) czy laserowe nanoszenie metalu LMD (*laser metal deposition*) – jest dynamicznie rozwijana i znajduje liczne zastosowania w praktyce. W dużym skrócie metoda ta polega na: usuwaniu materiału w otoczeniu strefy uszkodzenia, nanoszeniu nowego materiału wypełniającego ubytek oraz wykańczającym skrawaniu i polerowaniu, przywracającym pierwotną geometrię i właściwości użytkowe powierzchni.

Obecnie producenci oferują specjalizowane, wieloosiowe obrabiarki hybrydowe (integrujące proces przyro-



Rys. 15. Konceptcja hybrydowej technologii napraw na wielozadaniowej obrabiarkach (tokarko-frezarce) (a) [12] oraz zasada procesu wspomaganego laserowo bezpośredniego nanoszenia metalu (b) [18]

stowego, bezpośredniego nakładania warstw z obróbką ubytkową), które są wyposażane w skanery laserowe 3D i urządzenia kontrolne (sondy pomiarowe 3D). Kompletny proces hybrydowy obejmuje więc: szybkościowe frezowanie (HSM), skanowanie powierzchni 3D, tworzenie modelu i podział warstw ubytku materiału, napawanie laserowe, kontrolę 3D, usuwanie zadziórów z krawędzi/polerowanie i znakowanie laserowe [12, 21, 22]. Szczegółowy opis cyklu naprawy, zaproponowany w ramach projektu RECLAIM [8, 12], przedstawiono na rys. 15.



Rys. 16. Konfiguracje hybrydowych platform wytórczych: a) na bazie centrum tokarsko-frezarskiego, b) na bazie pięcioosiowego centrum obróbkowego (AZN – automatyczny zmieniacz narzędzi) [20]

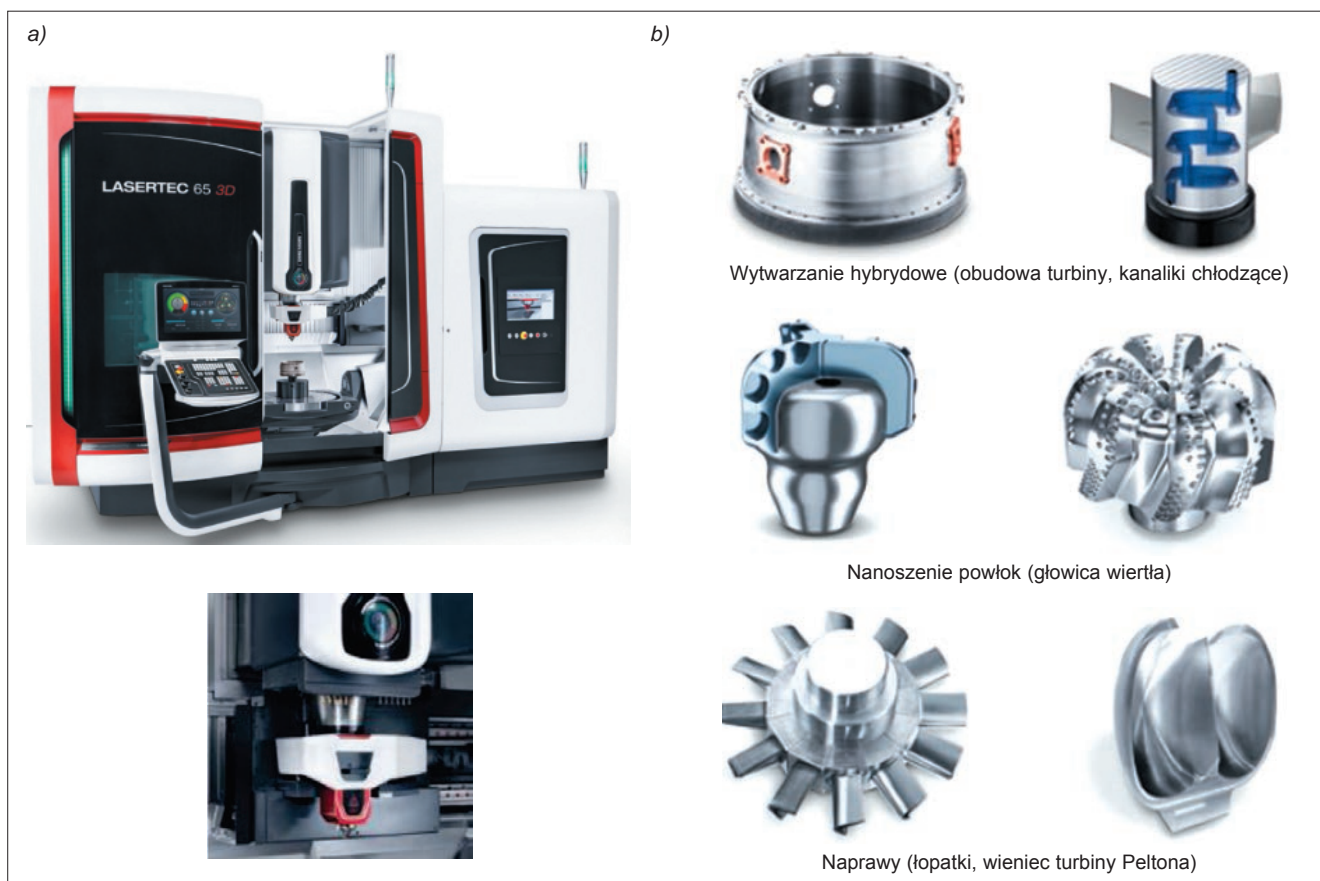


Rys. 17. Napawanie krawędzi (a) i frezowanie łopatki turbiny po napawaniu (b) [21]

Uważa się, że obrabiarka hybrydowa z takim wyposażeniem jest najbardziej elastycznym systemem do odnowy zużytych części i pochłania jedynie część energii, czasu i kosztów wymaganych do wytworzenia nowej części.

Konfiguracje dwóch najczęściej stosowanych w przemyśle hybrydowych platform wytórczych do napraw zużytych/uszkodzonych części przedstawiono na rys. 16. Rozwiązanie z rys. 16a powstało na bazie centrum tokarsko-frezarskiego (*turning-milling centre*). Przedmiot jest mocowany w osi wrzeciono, co przy jego obrocie zapewnia różną orientację w stosunku do narzędzia (zespół narzędzi przedstawiono na rys. 6a; dodatkowo stosuje się specjalne narzędzia do polerowania [21]). Przykład obróbki hybrydowej na platformie wytórczej HSTM 1000 (firmy Hamuel Reichenbacher), zbudowanej według koncepcji z rys. 16a, pokazano na rys. 17.

Z kolei przykład realizacji obróbki hybrydowej na platformie wytórczej LASERTEC 65 3D (firmy DMG MORI), zbudowanej według koncepcji z rys. 16b, przedstawiono na rys. 18. W obróbce addytywnej stosuje się wcześniej omówioną technikę LDT. W tym przypadku integracja obejmuje napawanie laserowe i pięcioosiową obróbkę, co umożliwia wykonanie takich zadań technologicznych, jak hybrydowe wytwarzanie, nakładanie powłok proszkowych czy naprawy. Należy zauważyć, że wytwarzanie może polegać na



Rys. 18. Integracja pięcioosiowej frezarki z laserowym napawaniem (a) oraz przykłady zastosowania (b) [7]



Rys. 19. Przykłady naprawy różnych wyrobów z użyciem techniki LDT [18]: a) naprawa obudowy sprężarki gazowej (materiał: Inconel 718), b) naprawa wału ze stali 4340 (materiał napawany: stal odporna na korozję 420 LC), c) naprawa łącznika przekładni planetarnej (materiał napawany: stal odporna na korozję 420 LC), d) uzupełnienie materiału na wybrakowanej odkuwce ze stopu tytanu Ti6-4

tworzeniu części z wielu materiałów (np. występy z miedzi/ mosiądzu nakładane na obwodzie obudowy ze stopu Inconel 718): stali odpornych na korozję, superstopów na osnowie niklu (Inconelu 625, Inconelu 718), brązu i mosiądzu, stopów Cr-Co-Mo, stali i stopów Cr-Co-Mo, stali spawalnych [21, 23].

Przykłady innych, dużych i drogich części – np. obudowy sprężarki ze stopu Inconel 718, wału i łącznika przekładni planetarnej – na które nałożono warstwę ze stali nierdzewnej 420 SS, a także wybrakowaną odkuwkę ze stopu tytanu Ti6-4 przedstawiono na rys. 19.

Podsumowanie

Realizacja strategii Produkcji/Wytwarzania 4.0 jest ściśle związana z hybrydyzacją procesów wytwórczych. Swym zasięgiem obejmuje procesy oraz urządzenia hybrydowe, które łączą kształtowanie addytywne z obróbką wiórową CNC (LM/SM CNC) i nie są ujęte w podstawowej klasyfikacji hybrydowych procesów obróbki [1]. Trzy typowe zastosowania to: wytwarzanie części (lub tylko niektórych złożonych fragmentów) z materiałów proszkowych, nakładanie powłok z materiałów innych niż bazy, naprawy.

Moduły obróbki przyrostowej, które instaluje się na różnych wieloosiowych obrabiarkach CNC, wykorzystują takie techniki nakładania warstw, jak: FDM, SLM, EBM, DED czy LBDW (*laser beam deposition welding*). Ogólnie przyjętą zasadą jest proces laserowego nakładania metalu (LMD). Można się spotkać z różnym nazewnictwem technik laserowych, stosowanym przez producentów obrabiarek hybrydowych, np.: LENS, DMD, DED, PBF (*powder bed fusion*) czy POM (*precision optical manufacturing*) [24].

Ważnym obszarem zastosowań procesów AM/SM CNC są naprawy i przywracanie cech użytkowych wybrakowanym częściom (np. niewymiarowym odkuwkom) o dużych wymiarach, wykonanym z drogich materiałów. W tym celu

stosuje się specjalną technologię napraw (LRT).

Obecnie producenci oferują specjalizowane wieloosiowe obrabiarki hybrydowe, integrujące proces przyrostowy, bezpośredniego nakładania warstw z obróbką ubytkową. Maszyny te wyposaża się w skanery laserowe 3D i urządzenia kontrolne (sondy pomiarowe 3D). Integracja obejmuje także pakiety CAD/CAM i CAI (*Computer Aided Inspection*).

LITERATURA

- Grzesik W. „Hybrydowe procesy obróbki ubytkowej. Definicje, zasady tworzenia i znaczenie w przemyśle”. *Mechanik*. 91, 5–6 (2018): s. 338.
- Grzesik W. „Wizje i strategię wytwarzania”. Cz. I i II. *Mechanik*. 83, 3 (2010): s. 145–148 (cz. I), 4 (2010): s. 232–239 (cz. II).
- Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. Warszawa: PWN, 2018.
- Jones J.B. „The synergies of hybridizing CNC and additive manufacturing”. Hybrid Manufacturing Technologies Ltd, 2014.
- Manogharan G., Wysk R., Harrysson O., Aman R. „AIMS – a metal additive hybrid manufacturing system: system architecture and attributes”. *Procedia Manufacturing*. 1 (2015): s. 273–286.
- Mazak’s VC-500 AM Hybrid Speeds Multitasking, *Additive Manufacturing* (2016), www.mazak.com.
- Additive manufacturing in milling quality, 2017, www.dmgmori.com.
- Reclaim Project – Remanufacturing the Future, 2012, www.catapult.org.uk.
- Sottak T. „Hybrid Manufacturing. 3D printed metals – core applications”. www.optomec.com.
- Nagel J.S., Liou F.W. „Hybrid manufacturing system. Design and Development”. *Manufacturing Systems* (Chapter 11), ed. F.A. Aziz, InTech Europe, Rijeka, 2012.
- Du W., Bai Q., Zhang B. „A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts”. *Procedia Manufacturing*. 5 (2016): s. 1018–1030.
- Flynn J.M., Shokrani A., Newan S.T., Dhokia V. „Hybrid additive and subtractive machine tools – research and industrial developments”. *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*. 101 (2016): s. 79–101.
- Liu J., Wang X., Wang Y. „A complete study on satellite thruster structure (STS) manufactured by a hybrid manufacturing (HM) process with integration of additive and subtractive manufacture”. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 92 (2017): s. 4367–4377.
- Schmidt M., Merklein M., Bourell D., Dimitrov D., Hausotte T., Wegener K., Overmeyer L., Vollersten F., Levy G.N. „Laser based additive manufacturing in industry and academia”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 66, 2 (2017): s. 561–583.
- Norfolk M. „The top 5 reasons hybrid additive manufacturing make sense”, 2018, www.fabrisonic.com.
- Hudson R. „Hybrid system combines additive and subtractive manufacturing”, www.mitsuseiki.com.
- Yamazaki T. „Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive technology with CNC machining”. *Procedia CIRP*. 42 (2016): s. 81–86.
- Laser Deposition Technology (LDT): Examples. www.rpm-innovations.com.
- Technology Spotlight: Hybrid additive/subtractive machining centre, 2018, Matsuura Machinery, www.matsuurausa.com.
- Lee W., Wei Ch., Chung S. „Development of a rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining”. *Journal of Materials Processing Technology*. 214 (2014): s. 2366–2374.
- Hybrid Manufacturing. „The world’s first hybrid turbine blade & turbo fan remanufacturing machine”, www.hamuel.com.
- Zhang X., Li W., Chen X., Cui W., Liou F. „Evaluation of component repair using direct metal deposition from scanned data”. *Int. Journal Advanced Manufacturing Technology*. 95 (2018): s. 3335–3348.
- Przestacki D., Chwałczuk T., Wojciechowski S. „The study on minimum uncut chip thickness and cutting forces during laser-assisted turning of WC/NiCr clad layers”. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 91 (2017): s. 3887–3898.
- Merklein M., Junker D., Schaub A., Neubauer F. „Hybrid additive manufacturing technologies – an analysis regarding potential and applications”. *Physics Procedia*. 83 (2016): s. 549–559. ■