

Obróbka skrawaniem oraz techniki przyrostowe jako integralne etapy procesu wytwarzania hybrydowego z metali w Przemysle 4.0

Metal cutting and additive manufacturing as an integral stages of metals hybrid manufacturing in Industry 4.0

MARCIN A. KRÓLIKOWSKI
MARTA B. KRAWCZYK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.129>

W artykule omówiono rolę procesu obróbki skrawaniem jako integralnego etapu wytwarzania elementów z metali z wykorzystaniem technik przyrostowych. Wytwarzanie przyrostowe AM (*additive manufacturing*) jest zaliczane do grupy technik Przemysłu 4.0, które zmieniają oblicze przemysłu i w przyszłości będą podstawą produkcji hybrydowej. Niniejszy artykuł wskazuje, że wytwarzaniu przyrostowemu z metali towarzyszą prawie zawsze dodatkowe metody obróbki konwencjonalnej. **SŁOWA KLUCZOWE:** wytwarzanie przyrostowe, postprocesing, Przemysł 4.0, obróbka hybrydowa

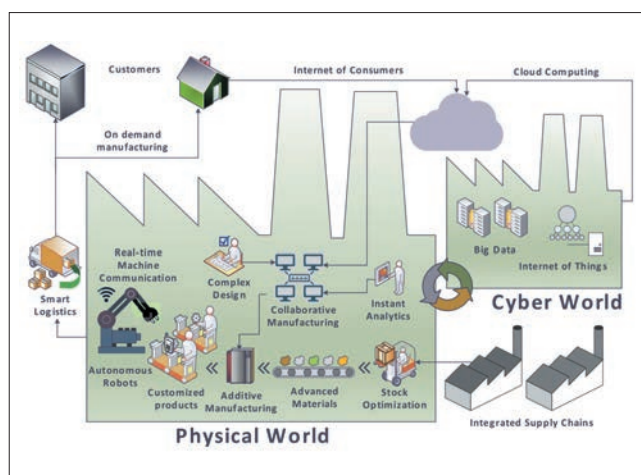
This paper describes the role of metal cutting process as integral part of manufacturing with application of MAM (metal additive manufacturing) techniques. Additive manufacturing is written explicit as main feature included in Industry 4.0 cycle. AM techniques lead to hybrid manufacturing techniques as well. This paper points that AM almost always is accompanied by supplementary conventional machining.

KEYWORDS: additive manufacturing, post-processing, Industry 4.0, hybrid manufacturing

Przemysł 4.0

Czwarta rewolucja przemysłowa, nazywana Przemysłem 4.0, ma na celu zwiększenie konkurencyjności gospodarczej poprzez integrację nowoczesnych technik produkcyjnych z nowymi technologiami informacyjnymi [1]. Jej dwa podstawowe obszary to obszar wirtualny oraz fizyczny – razem stanowią system cyberfizyczny. Środowisko wirtualne obejmuje m.in. Internet rzeczy (*Internet of Things*, IoT), przetwarzanie w chmurze (*Cloud Computing*) czy duże zbiory danych (*Big Data*), natomiast w środowisku fizycznym znajdują się autonomiczne roboty (*Autonomous Robots*) oraz wytwarzanie przyrostowe (rys. 1) [2].

Przemysł 4.0 opiera się na paradygmacie masowej, personalizowanej produkcji, należy więc opracować nietradycyjne metody otrzymywania wyrobów zgodnych z indywidualnymi wymaganiami klienta. W związku z tym AM może stać się kluczową technologią wytwarzania niestandardowych produktów – obiektów o zaawansowanych atrybutach (o nowych kształtach, z nowych materiałów) [1]. Dzięki większym możliwościom uzyskiwania produktów o złożonej geometrii wytwarzanie przyrostowe jest obecnie wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu,



Rys. 1. Schemat inteligentnych fabryk z podziałem na obszary i główne zagadnienia [1]

takich jak lotnictwo czy biomedycyna [3]. Jest szybko rozwijającą się technologią tworzenia dokładnych i skomplikowanych obiektów. W niedalekiej przyszłości może zastąpić konwencjonalne techniki produkcyjne.

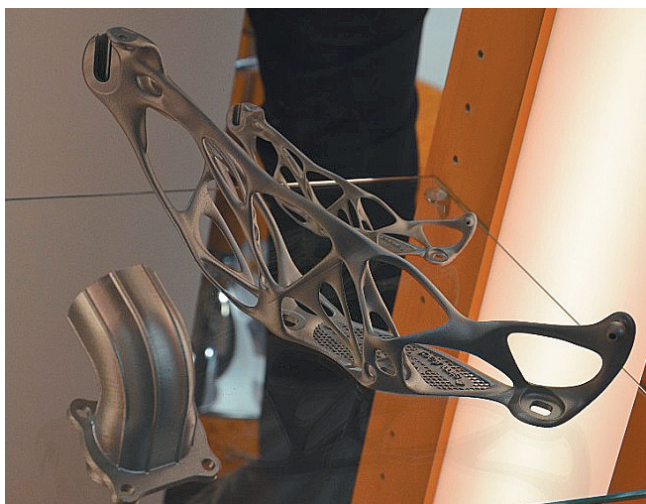
Według raportu Wohlersa z 2017 r. [4] wraz z rozwojem technologii w kolejnych latach ma rosnąć udział druku 3D w produkcji części, a nawet gotowych wyrobów. Raport wskazuje na scenariusze (oparte na inwestycjach w techniki przyrostowe), według których już w 2040 r. lub najpóźniej w 2060 r. aż 50% globalnej produkcji będzie powstawać na urządzeniach do wytwarzania przyrostowego.

Selektywne stapianie proszków metali

Techniki wytwarzania przyrostowego wykorzystują szeroką gamę materiałów – od ciekłokrystalicznych żywic polimerowych, przez tworzywa termoplastyczne, po metale. Właśnie te ostatnie oferują największe możliwości w kontekście produkcji masowej [1]. Wytwarzanie przyrostowe z metali (*metal additive manufacturing*, MAM) już teraz jest najczęściej wybieraną techniką w przemyśle [5], co wynika z szerokiego zastosowania elementów metalowych w niemal wszystkich obszarach inżynierii [1]. Wśród technik MAM najbardziej rozpowszechnione są dwie metody wykorzystujące proszki metali:

- selektywne stapianie wiązką lasera proszków metali i ich stopów (*selective laser melting/direct laser metal sintering*, SLM/DLMS), wdrożone w branżę samochodowej [6];
- topienie wiązką elektronów (*electron beam melting*, EBM).

* Dr inż. Marcin A. Królikowski (marcin.krolikowski@zut.edu.pl), dr inż. Marta B. Krawczyk (mkrawczyk@zut.edu.pl) – Instytut Technologii Mechanicznej – Zakład Technologii Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie



Rys. 2. Elementy samochodowe wytworzone z wykorzystaniem optymalizacji topologii metodami DLMS/SLM



Rys. 3. Elementy lotnicze (a) i samochodowe (b) z precyzyjnie obróbnymi kołnierzami

Metody SLM/DLMS umożliwiają wytwarzanie elementów metalowych o praktycznie dowolnie złożonej geometrii (rys. 2 i 3), na skalę jednostkową lub seryjną.

Integralnym procesem wytwarzania przyrostowego jest usunięcie uzyskanych elementów z platform roboczych. Najczęściej wykorzystywane są do tego metody obróbki elektroiskrowej. Z reguły konieczna jest także obróbka skrawaniem części właściwej, mająca na celu skorygowanie niedokładności metod przyrostowych [7]. Obróbka ta jest traktowana jako wykończeniowa (postprocessing), zwłaszcza elementów części współpracujących. Na rys. 3 przedstawiono elementy, które wymagają obróbki wykończeniowej do skorygowania dokładności otworów montażowych (rys. 3a) lub otworów w dyszach (rys. 3b).

Warto podkreślić, że w ramach Przemysłu 4.0 przewidywane jest powstanie produkcji hybrydowej, która będzie ze sobą łączyła różne techniki przyrostowe albo prowadziła do różnych kombinacji procesów produkcyjnych, wykraczających poza konwencjonalne procesy MAM, aby wytwarzać lepsze produkty, o wyższej jakości powierzchni, większej wytrzymałości zmęczeniowej itp. [1]. Procesy obróbki hybrydowej, a zwłaszcza kombinacje obróbki przyrostowej i ubytkowej, wymagają indywidualnego podejścia do modelowania części już na etapie projektowania 3D w programach CAD. Ponieważ do poważniejszych problemów należą właśnie bazowanie i mocowanie elementów (zob. element na rys. 4a), niezbędna jest predykcja technologii obróbki ubytkowej. Wykorzystuje się tu specjalnie opracowane bazy obróbkowe, które następnie zostają usunięte [8]. Takie podejście do obróbki hybrydowej nie tylko zapewnia właściwe zamocowanie, lecz także w zależności od funkcji i baz konstrukcyjnych umożliwia osiągnięcie zakładanej dokładności wymiarowo-kształtowej. W szczególnych przypadkach możliwe jest zastosowanie – jako elementów bazujących – płyt produkcyjnych, które podczas procesów obróbki skrawaniem pełnią rolę palet. Oczywiście możliwość obróbki dolnych fragmentów jest wtedy ograniczona. Należy dodać, że producenci urządzeń do obróbki przyrostowej (np. SLM Solutions) inwestują obecnie w oprogramowanie pozwalające na integrację procesów obróbkowych w zintegrowanych systemach CAD/CAM, tak jak od lat się dzieje z procesami obróbki ubytkowej.

Metody MAM z wykorzystaniem proszków metali są stosowane na skalę przemysłową głównie tam, gdzie powierzchnie lub gdzie prowadzone kanały mają być np. konformalne (jak w konstrukcjach lotniczych). Takie elementy pokazano na rys. 3. Górny element (rys. 3a), z kołnierzami precyzyjnie obróbnymi metodami obróbki ubytkowej, to złącze paliwowe samolotu Airbus A 350. Dolny element (rys. 3b) wymaga zaś dokładnego bazowania i wykonania obróbki ubytkowej. Uzyskiwana dokładność obróbki, traktowanej jako postprocessing, zależy od jej przygotowania na etapie projektowania części i procesów AM. Potwierdzili to Flynn i in., którzy w swojej pracy [9] zauważyli, że synergiczne połączenie procesów wytwarzania przyrostowego oraz obróbki ubytkowej w obrębie jednej stacji roboczej pozwala wykorzystywać zalety każdego z tych procesów i ułatwia wytwarzanie elementów o wysokim współczynniku kształtu z pożądaną dokładnością geometryczną oraz charakterystyką powierzchni.

Podobnie Manogharan i in. [8] podkreślali, że możliwe jest poprawienie wydajności procesu poprzez proces hybrydowy, składający się z EBM i szybkiej obróbki CNC.

Obróbka hybrydowa na obrabiarkach skrawających

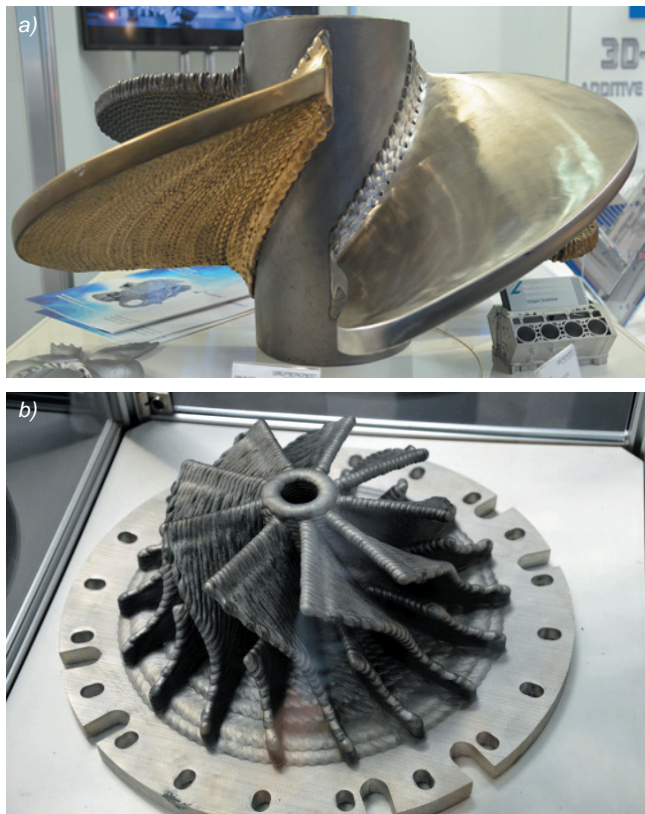
Pewnym odwróceniem problemu jest zastosowanie głowicy wykorzystującej technologię LMD/DMD (*laser metal deposition/direct metal deposition*) jako jednego z narzędzi stosowanych na obrabiarkach skrawających do metali. Integralną częścią procesu obróbki jest tu wytwarzanie przyrostowe, poprzedzające obróbkę skrawaniem (postprocessing). Taka obróbka hybrydowa może być wykorzystana jako proces produkcyjny albo proces regeneracji części bądź korekty błędów na poziomie konstrukcyjnym lub technologicznym. Producenci oprogramowania CAD/CAM komercyjnie oferują narzędzia programowe do projektowania procesów technologicznych z wykorzystaniem tej odmiany obróbki, nazywanej obróbką hybrydową (np. Siemens NX).

Metody alternatywne

Metody wykorzystujące proszki metali cechują się złożonością procesu oraz wysokimi kosztami urządzeń i materiału, a ponadto – ze względu na silne działanie rakotwórcze proszków metali – wymagają specjalnej, bardzo drogiej infrastruktury. Dotyczy to nie tylko samego procesu, lecz także pre- i postprocessingu, czyli przygotowania i suszenia materiału, a następnie właściwej obróbki. W każdym z tych procesów konieczne jest przestrzeganie restrykcyjnych przepisów bezpieczeństwa (z przepisami dotyczącymi ryzyka zapłonu włącznie). Istnieje więc trend do rozwijania metod alternatywnych. Skoro nie jest prawdą, że – jak pierwotnie głoszono – metody MAM całkowicie wyprą klasyczną obróbkę ubytkową, pojawiły się metody, w których obróbka skrawaniem jest elementem procesu technologicznego kształtowania części.

Nowatorskimi metodami o dużej wydajności objętościowej są m.in. WAAM/SMD (*wire + arc additive manufacturing/shaped metal deposition*) oraz komercyjna metoda AMLTEC™ (*additive metal layering technologies*), zastrzeżona dla firmy AML Technologies z USA, które opierają się na wielowarstwowym, precyzyjnie sterowanym napawaniu łukowym [10–12]. Te metody niedawno zostały wdrożone w przemyśle lotniczym, ponieważ umożliwiają kształtowanie wszystkich spawalnych metali i wytwarzanie bardzo dużych komponentów [10].

Na rys. 4 przedstawiono elementy wytworzone metodą WAAM z wykorzystaniem wstępnie obrobionych części bazowych. W tej metodzie obróbka skrawaniem jest procesem kształtowania podobnie jak w przypadku półwyrobów wytwarzanych metodami obróbki plastycznej czy odlewnictwa. Jest to jednak również metoda MAM, cechująca się dużą swobodą kształtowania i wydajnością objętościową (dla elementu na rys. 4a – 280 cm³/h).



Rys. 4. Przykłady elementów wykonanych metodą WAAM: a) śruba napędowa wytworzona bezpośrednio na gotowym półfabrykacie walcowym, b) turbina przeznaczona do kompleksowej obróbki w pięciu osiach

Rys. 5. Przykładowy element demonstracyjny, wykonany techniką MFDM



Metodą o rosnącej popularności jest również MFDM (*metal fused deposition modelling*), nawiązująca do znanej metody FDM, czyli nakładania warstwa po warstwie płynnego materiału, który, stygnąc, przechodzi do fazy stałej. W przypadku produkcji części maszyn metoda ta wymaga zastosowania procesów obróbki skrawaniem. Stosuje się ją do wytwarzania elementów o niewielkich gabarytach. Należy do metod niewymagających infrastruktury przemysłowej (*desktop devices*). Przykładowy element wytworzony tą metodą przedstawiono na rys. 5.

Podsumowanie

Metody przyrostowe w połączeniu z metodami konwencjonalnymi stwarzają możliwości wytwarzania w warunkach produkcyjnych elementów zarówno spersonalizowanych (np. implantów czy pomocy ortopedycznych), jak i całych serii. Procesy wytwarzania przyrostowego stają się składowymi typowymi procesami technologicznymi i zaczynają być obsługiwane przez systemy komputerowego wspomaganie wytwarzania (CAM) jako typowe procesy technologiczne łączone z procesami obróbki ubytkowej. Podobnie zaczynają być elementami systemów PPC (*production planning and control*) i ERP (*enterprise resource planning*). Wkrótce łączenie obróbki przyrostowej z ubytkową przestanie być obróbką hybrydową i w dobie czwartej rewolucji przemysłowej stanie się klasyczną obróbką.

LITERATURA

1. Dilberoglu U.M., Gharehpagh B., Yaman U., Dolen M. "The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0". *Procedia Manufacturing*. 11 (2017): s. 545–554.
2. Liu Y., Xu X. "Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A comparative analysis". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 139 (2016): s. 1–8.
3. Thompson M.K., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell R.I., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B., Martina F. "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 65 (2016): s. 737–760.
4. www.ingwb.com/insights/research/3d-printing-a-threat-to-global-trade (dostęp: 16.03.2018 r.).
5. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing". *International Materials Reviews*. 6608 (2016): s. 1–46.
6. www.bmw.com/en/innovation/3d-print.html (dostęp: 01.08.2018 r.).
7. Królikowski M., Filipowicz K. "Verification of geometrical accuracy of selective laser melting (SLM) built model". *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 37 (2013): s. 85–91.
8. 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.
9. Flynn J.M., Shokrani A., Newman S.T., Dhokia V. "Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 101 (2016): s. 79–101.
10. Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. "Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V". *Metallurgical and Materials Transactions A. Physical Metallurgy and Materials Science*. 44 (2013): s. 968–977.
11. Szost B.A., Terzi S., Martina F., Boisselier D., Prytuliaka A., Pirlin T., Hofmann M., Jarvis D.J. "A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components". *Materials & Design*. 89 (2016): s. 559–567.
12. Cegielski P., Skublewska A., Gawroński P., Ostrysz M., Dylewski M., Gajowiczek M. "Zrobotyzowane drukowanie 3D części maszyn metodami spawalniczymi". *Przegląd Spawalnictwa*. 89 (2017): s. 35–42.