

Technologie wytwarzania przyrostowego metali

Technologie wytwarzania przyrostowego metali (tzw. druku 3D) zrewolucjonizowały przemysł wytwórczy poprzez umożliwienie produkcji obiektów o dowolnej geometrii z szerokiej gamy materiałów, np. stali, lekkich stopów aluminium, tytanu, szkieł metalicznych, a nawet kompozytów metal – ceramika.

SUMMARY

Metal additive manufacturing

Słowa kluczowe: wytwarzanie przyrostowe, druk 3D, topienie laserowe, topienie wiązką elektronów, nowe technologie, rynek metali

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, laser melting, electron beam melting, new technologies, metals market

The mechanical properties of additively manufactured (AM) objects often exceed those of castings while properly chosen post-processing technique allows obtaining a surface with roughness required by most industrial applications. However, many companies still do not decide to implement AM technologies in their manufacturing facilities. The biggest barriers which prevent the usage of AM processes in industrial practice are noticed as high costs, unsatisfactory quality of manufactured objects, lack of experience, and a limited range of materials. What are the perspectives for reducing these barriers in the near future and the current possibilities of various AM technologies? How to choose the best metal AM technology for our application? In this article, I will try to answer these and other questions which often appears in industry and academia.

TEKST: dr inż. Bartłomiej Wysocki

Multidyscyplinarne Centrum Badawcze
Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie

zdjęcia: autor

Głównymi odbiorcami, stanowiącymi ponad 60% całego rynku technologii wytwarzania przyrostowego, są przemysł lotniczy, obronny, motoryzacyjny, maszynowy oraz medyczny [1]. Największe światowe firmy przeznaczają znaczne nakłady finansowe na rozwój technologii addytywnych w swoich przedsiębiorstwach, o czym świadczy powstanie m.in. programu America Makes w USA czy niemieckiego sojuszu Fraunhofer Competence Field Additive Manufacturing. Znaczny wzrost rynku technologii przyrostowych w ostatnich latach związany jest ze zmianami zachodzącymi w zakładach przemysłowych, które wykorzystują druk 3D nie tylko do prototypowania, ale coraz częściej do wytwarzania funkcjonalnych części oraz całych produktów z powszechnie dostępnych oraz nowych materiałów [2]. Szacuje się, że rynek technologii wytwarzania przyrostowego metali, na który składają się zarówno urządzenia, jak i materiały, osiągnie w 2022 r. 4,1 miliarda dolarów i będzie wzrastał w kolejnych latach przy złożonej rocznej stopie wzrostu (CAGR) na poziomie 24% rocznie [1]. Prognozuje się, że zastosowanie technologii przyrostowych do wytwarzania elementów metalicznych będzie dynamicznie rozwijać się w kolejnych latach, ale stopień tego wzrostu będzie zależał głównie od zmniejszenia barier ich implementacji w praktyce przemysłowej. Mimo że właściwości mechaniczne obiektów wytwarzanych przyrostowo niejednokrotnie przewyższają właściwości odlewów, a odpowiednio dobrane obróbki wykańczające umożliwiają otrzymanie powierzchni o rozwinięciu wymaganym przez większość aplikacji, to przedsiębiorcy często nie decydują się na wdrożenie tych technologii w swoich zakładach. Jako największe bariery w zastosowaniu technologii wytwarzania przyrostowego w praktyce przemysłowej wskazywane są zbyt

TECHNOLOGIE WYTWARZANIA PRZYROSTOWEGO METALI

Technologia
Proces

Wytłaczanie materiałów (Material Extrusion – ME)	Łączenie lepiszczem (Binder Jetting – BJ)	Fuzja w złożu proszku (Powder Bed Fusion – PBF)	Bezpośrednie osadzanie metali (Direct Energy Deposition – DED)	Łączenie materiałów (Material Jetting – MJ)
<ul style="list-style-type: none"> Osadzanie topionego materiału (Fused Deposition Modeling – FDM / Fused Filament Fabrication – FFF) <p>Materiał wsadowy: filament kompozytowy metaliczno-polimerowy</p>	<ul style="list-style-type: none"> Łączenie lepiszczem (Binder Jetting) <p>Materiał wsadowy: proszek o preferowanej średniej wielkości poniżej 15 mikrometrów</p>	<ul style="list-style-type: none"> Selektywne topienie laserowe (Selective Laser Melting – SLM / Direct Metal Laser Sintering – DMLS) Selektywne topienie wiązką elektronów (Electron Beam Melting – EBM) <p>Materiał wsadowy: proszek sferyczny o preferowanej średniej wielkości 20–80 mikrometrów</p>	<ul style="list-style-type: none"> Laserowe kształtowanie przyrostowe (Laser Engineered Net Shaping – LENS) Wytwarzanie przyrostowe wiązką elektronów (Electron Beam Additive Manufacturing – EBAM) <p>Materiał wsadowy: proszek sferyczny o preferowanej średniej wielkości 50–150 mikrometrów Materiał wsadowy: drut metaliczny</p>	<ul style="list-style-type: none"> Łączenie nanocząstek (NanoParticle Jetting – NPJ) <p>Materiał wsadowy: zawiesina nanocząstek metalicznych</p>

Rys. 1.

1. Lista pięciu technologii wytwarzania przyrostowego metali (zgodnie z ISO/ASTM 52900:2021)

✦ wysokie koszty, niesatysfakcjonująca jakość wytworzonych obiektów, brak doświadczenia oraz ograniczone spektrum materiałów [3]. Jakie są perspektywy zniwelowania tych barier i możliwości różnych technologii wytwarzania przyrostowego? Jak wybrać odpowiednią technologię wytwarzania przyrostowego metali dla naszej aplikacji? Na te i inne pytania postaram się Państwu odpowiedzieć w niniejszym artykule.

Wytwarzanie przyrostowe czy druk 3D?

Porządek w terminologii związanej z technologiami wytwarzania przyrostowego przyniosła norma ISO/ASTM 52900 [4], której druga odsłona została wydana w listopadzie 2021 r. Została ona wydana tylko w wersji angielskiej, więc niniejszy artykuł opiera się na tłumaczeniu na nasz język ojczysty zarówno nazw technologii, jak i innego użytego w niej słownictwa. Zgodnie z normą ISO/ASTM 52900 „druk 3D” jest nietechnicznym synonimem „wytwarzania przyrostowego” i powinien być używany tylko w kontekście urządzeń przeznaczonych do zastosowań nieprzemysłowych. Tutaj oczywiście pojawia się pierwsza wątpliwość, ponieważ w zależności od tego, jaka jest docelowa aplikacja i związane z nią wymagania dotyczące właściwości mechanicznych oraz jakości powierzchni, możemy wybrać do naszego zakładu produkcyjnego urządzenie takie samo jak wybiera większość użytkowników domowych, czyli niskobudżetową drukarkę polimerową

lub urządzenie produkcyjne, których ceny w zależności od technologii sięgają nawet kilku milionów euro. Moim zdaniem najważniejsze jest, czy planujemy zakup urządzenia produkcyjnego, które ma tworzyć obiekty, które będziemy sprzedawać, czy urządzenia do wytwarzania wizualnych prototypów. Jeśli planujemy zakup urządzenia produkcyjnego, a w przypadku zainteresowania wytwarzaniem przyrostowym z metali wydaje się to jedyna opcja, powinniśmy mimo przyzwyczajenia zaprzestać używania zwrotu „druk 3D”.

Przegląd technologii wytwarzania przyrostowego metali

Zgodnie z przyjętymi standardami na rynku istnieje obecnie 7 technologii wytwarzania przyrostowego, z czego pięć z nich (rys. 1) stosowane jest do produkcji obiektów metalicznych. Technologie wytwarzania przyrostowego poprzez fuzję w złożu proszku oraz bezpośrednio osadzanie metali dzielą się na procesy, w których do konsolidacji materiału wykorzystywany jest laser lub wiązka elektronów. W przypadku fuzji w złożu proszku zarówno proces selektywnego topienia laserowego, jak i selektywnego topienia wiązką elektronów wykorzystuje podobne wielkości materiałów wsadowych. W większości urządzeń możemy wykorzystać proszki sferyczne o średniej wielkości cząstek w zakresie 20–80 mikrometrów, uzyskując pożądane właściwości mechaniczne. Wielkość proszków w tym zakresie to nie jest wymóg konieczny, a raczej zalecenie. Proszki nieregularne moż-

na technologicznie używać w obu tych procesach, jednak będą sprzyjały one porowatości i spadkowi właściwości mechanicznych. Podobnie w technologii łączenia lepiszczem średnia wielkość cząstek poniżej 15 mikrometrów będzie sprzyjała regularnemu połączeniu materiału, ale nawet większe proszki są technicznie możliwe w użyciu, jednak właściwości powierzchni obiektów, jak i ich właściwości mechaniczne będą niższe niż podawane przez producenta urządzeń.

Wytłaczanie materiałów

Tak, jest możliwe „drukowanie 3D” metali (m.in. stali 316L, 17-4PH, H13, stopów Inconel, miedzi) na urządzeniach działających w technologii wytłaczania materiałów (ang. *material extrusion*) w procesie wytwarzania przyrostowego z tworzyw termoplastycznych (ang. *fused filament fabrication* – FFF lub też *fused deposition modeling* – FDM). Proces wykonania funkcjonalnej części wymaga jednak odpowiednio przygotowanego zaplecza do obróbek poprocesowych. Po procesie konieczne jest oczyszczenie wydruku w oparach kwasu azotowego w celu usunięcia polimeru i spiekania wytworzonego obiektu w temperaturze ~1400°C, aby uzyskać połączenie cząstek metalicznych między sobą. Warto mieć również świadomość, że porowatość obiektów metalicznych wytworzonych technologią wytłaczania materiału będzie większa niż tych wytworzonych w jednoetapowych procesach wytwarzania przyrostowego takich jak topienie laserowe lub wiązką elektronów w złożu proszku. Poważną wadą procesu jest również niepełna dowolność kształtu, czyli np. brak możliwości wytworzenia kanałów do chłodzenia konformalnego w matrycach czy obiektów będących komórkowymi ciałami stałymi. Technologia wytłaczania materiałów metalicznych, a właściwie kompozytów metal – polimer, ma jednak jedną wielką zaletę – umożliwia wytworzenie największych elementów w najniższych kosztach. Oczywiście nie będą to obiekty sięgające nawet metra wysokości, które są możliwe do uzyskania podczas bezpośredniego osadzania metali w procesach LENS lub EBAM, ale będą mogły mieć kilkadziesiąt (40–60) centymetrów w każdym kierunku, bo takie wymiary zapewnia wiele popularnych polskich i zagranicznych urządzeń FFF/FDM dostępnych na rynku od producentów takich jak m.in. Zortax, Zmorph, 3D Gence, Flashforge, Stratasy i innych. Urządzenia dedykowane



Rys. 2.

produkcji metalowych części z filamentów, spełniających normy ISO/ASTM nawet dla lotnictwa, oferuje m.in. amerykańska firma Markforged, ale cena całego zestawu z piecem będzie zbliżona do najtańszych rozwiązań dedykowanych proszkom metalicznym.

Łączenie lepiszczem

Łączenie materiałów lepiszczem to obecnie najbardziej ekonomiczna technologia wytwarzania przyrostowego, umożliwiająca pełną dowolność kształtu i formy wytworzonego przyrostowo obiektu, tzn. umożliwia wytwarzanie obiektów o porowatości otwartej takich jak piany filtracyjne oraz matryce z kanałami chłodzącymi. Umożliwia produkcję średnich i dużych serii obiektów metalicznych z dowolnych stopów metali, począwszy od popularnych stali narzędziowych i brązów, przechodząc przez czystą miedź, a kończąc nawet na stopach tytanu w przypadku nielicznych, ale dostępnych na rynku urządzeń działających w próżni. Technologia łączenia materiałów metalicznych w postaci proszku lepiszczem nie jest ograniczona geometrycznie tak jak metoda wytłaczania materiałów oraz posiada wielką przewagę nad technologią fuzji w złożu proszku za pomocą lasera lub wiązki elektronów, a mianowicie nie wymaga podczas projektowania i wytwarzania wykorzystania struktur wsparciowych. Urządzenia działające w technologii spajania lepiszczem posiadają największe komory wśród urządzeń do produkcji z prosz-

2. Komora robocza urządzenia X1 160 Pro ExOne/ Desktop Metal działającego w technologii spajania proszków lepiszczem

3a, 3b. Implanty i instrumentarium medyczne wytworzone przez polską firmę MaterialsCare w procesie topienia laserowego w złożu proszku (a), hamulec ze stopu tytanu po obróbkach powierzchni wytworzony przez firmę SLM Solution dla Bugatti (b)



Rys. 3.

❖ ków metalicznych w złożu proszku (rys. 2). Wady? Jak w każdej technologii przyrostowej są pewne. Największą trudnością wykorzystania tej technologii i wdrożenia w zakładzie produkcyjnym jest wieloetapowość procesu. Obiekty, które powstają poprzez połączenie cząstek proszków metalicznych lepiszczem, wymagają utwardzenia lepiszcza w piecu niskotemperaturowym, a następnie przeniesiona do pieca wysokotemperaturowego, gdzie następuje docelowe spieczenie proszków i odparowanie lepiszcza. Wadą tej technologii jest więc konieczność przewidzenia na etapie projektowania skurczu materiałowego, który wynosi 15-17%, i odpowiednie przeskalowanie modelu komputerowego (ang. *computer-aided design* – CAD) na etapie projektowania. Na szczęście producenci oferują do tego specjalistyczne oprogramowanie, niestety zwykle w abonamencie rocznym wartości kilku tysięcy dolarów. W przypadku elementów z materiałów reaktywnych, takich jak tytan czy magnez, musimy do spiekania użyć pieców próżniowych, których ceny zaczynają się od prawie pół miliona złotych. Same urządzenia do spajania materiałów lepiszczem to koszt od około 1 miliona złotych dla platform roboczych o wielkości zaczynających się od niespełna 1000 cm³, a ich ceny rosną w zależności od wielkości komory roboczej. Większość obiektów wytworzonych tą technologią posiada 1-3% porowatości otwartej dla materiałów z opracowanych przez producentów urządzeń. Głównym gra-

czem na rynku spajania materiałów metalicznych lepiszczem są Amerykanie, posiadający firmę Desktop Metal, która niedawno przejęła inne amerykańskie przedsiębiorstwo o nazwie ExOne.

Fuzja w złożu proszku

Wytwarzanie przyrostowe metali w technologii fuzji w złożu proszku jest możliwe przy zastosowaniu procesów topienia laserem (ang. *direct metal laser sintering* – DMLS lub *selective laser melting* – SLM) lub topienia elektronami (ang. *electron beam melting* – EBM). Technologia fuzji metali w złożu proszku umożliwia, przy odpowiednio dobranych parametrach pracy lasera czy wiązki elektronów, uzyskanie obiektów z porowatością poniżej 0,5%. Powoduje to, że procesy topienia laserowego lub elektronami w złożu proszku umożliwiają otrzymanie obiektów o wysokiej wytrzymałości, często przewyższającej wytrzymałość tych wytworzonych konwencjonalnie [5]. Ponadto użytkownik ma możliwość wytworzenia elementów o dowolnych kształtach, z predefiniowaną porowatością otwartą, kanałami wewnętrznymi i cienkimi ściankami, przez co procesy topienia laserem lub wiązką elektronów w złożu proszku są najczęściej używane do wytwarzania porowatych implantów kostnych, łopatek turbin oraz form wtryskowych. Procesy te wykorzystywane są w medycynie oraz weterynarii do produkcji spersonalizowanych implantów twarzoczaszki oraz kości



Rys. 4.

długich (rys. 3a) oraz w stomatologii do produkcji koron i mostów. Jest to możliwe dzięki obecności na rynku urządzeń oraz metalicznych materiałów proszkowych (stopy tytanu oraz kobalt – chrom) spełniających wymagania certyfikacji medycznej. Istnieją w Polsce zakłady stomatologiczne posiadające urządzenia do wytwarzania przyrostowego koron i mostów, mimo że ich cena zaczyna się od około 1 miliona złotych. Są to jednak urządzenia z niewielkimi platformami roboczymi posiadającymi objętość na poziomie 1000 cm³. Większe urządzenia, które umożliwiają wytwarzanie obiektów rzędu kilkudziesięciu centymetrów w każdej osi, to koszt kilku milionów złotych. Do tego dochodzą wysokie koszty materiałów eksploatacyjnych (proszki o odpowiedniej gradacji, gazy ochronne, metaliczne platformy robocze, filtry oraz materiały eksploatacyjne używane do rozgarniania proszków). Trudno sobie również wyobrazić zakład, który mógłby działać w tej technologii bez pieca do obróbek cieplnych, urządzenia CNC do skrawania platform roboczych czy zestawu do obróbek mechanicznych lub elektrochemicznych. Odpowiednio dobrane obróbki powierzchni pozwalają zejść z Ra/Sa rzędu kilkudziesięciu mikrometrów do wartości, jakie zaprezentowała m.in. firma Bugatti dla hamulców wykonanych ze stopu tytanu (rys. 3b). Przez lata szybkość urządzeń do topienia laserowego stanowiła problem, jednak obecnie dostępne są na rynku urządzenia wykorzystujące kil-



4a, 4b. Wymienniki ciepła wytworzone przez firmę GKN Additive (a) oraz silnik rakietowy wytworzony na urządzeniu MK4 firmy AMCM na potrzeby amerykańskiego przedsiębiorstwa kosmicznego Launcher [6] (b)

ka laserów, które stapiają jednocześnie wiele obszarów platformy roboczej oraz urządzenia wykorzystujące lasery o mocy powyżej 1 kW. Zwiększenie mocy laserów spopularyzowało w ostatnich latach szczególnie produkcję elementów takich jak wymienniki ciepła z czystej miedzi i jej stopów (rys. 4a). Nowością na rynku są też urządzenia wykorzystujące zielony laser, przeznaczone do wytwarzania z czystej miedzi oraz firmy takie jak AMCM, zajmujące się modyfikacją urządzeń na potrzeby przetwarzania proszków miedzi (rys. 4b). Amerykański koncern GE po przejęciu firmy Arcam oferuje popularne w medycynie, m.in. do produkcji panewek stawu biodrowego oraz stabilizatorów kręgosłupa, urządzenia ARCAM EBM, które zamiast lasera używają do topienia wiązki elektronów. Najpopularniejsze urządzenia działające w technologii fuzji w złożu proszku oferują obecnie firmy z Niemiec: EOS, SLM Solutions, Aconity, Trumpf, USA: GE, 3D Systems oraz Wielkiej Brytanii: Renishaw. Osoby chcące wspierać nasz rodzimy polski biznes mogą sprawdzić ofertę firmy Inntec.

Łączenie materiałów

Technologia wytwarzania przyrostowego poprzez łączenie materiałów jest typowa dla wytwarzania przyrostowego z żywic fotoutwardzalnych (Polyjet od firmy Stratasys), ale istnieje również proces, który został zaprezentowany w 2017 roku przez firmę XJet z Izraela, przeznaczony do materiałów me- ❖

❖ talicznych oraz ceramicznych. Proces łączenia nanocząstek polega na osadzaniu przez głowicę drukującą dwóch materiałów: 1. nanocząstek metali lub ceramiki (materiał docelowy naszego obiektu) zawieszonych w cieczy oraz 2. tworzywa sztucznego pełniącego rolę struktury wsporczącej. Podczas osadzania głowica generuje ciepło, które powoduje odparowanie zawiesiny, pozostawiając tylko nieznacznie związane nanocząstki. Ciepło generowane przez głowicę powoduje utwardzanie polimeru, który pełni rolę struktury wsporczącej i który może zostać usunięty z wytworzonego obiektu poprzez czyszczenie w wodzie. Obiekt po procesie łączenia nanocząstek należy spieć docelowo w piecu. Proces łączenia nanomateriałów umożliwia uzyskanie najdokładniejszych (cienkie ścianki rzędu kilkuset mikrometrów) obiektów o najniższym, ze wszystkich technologii wytwarzania przyrostowego metali, rozwinięciu powierzchni i nie wymaga obróbek chemicznych/mechanicznych po wytworzeniu docelowego kształtu. Można za jego pomocą wytwarzać wszelkie precyzyjne, a nawet ruchome obiekty metaliczne takie jak koła zębate i jest to prawdopodobnie najbardziej precyzyjny, obok procesu topienia laserowego metali w złożu proszku, dostępny na rynku komercyjny proces. Producent urządzeń do wytwarzania przyrostowego z nanomateriałów posiada na daną chwilę w portfolio jeden materiał metaliczny, którym jest zawieszina nanocząstek stali austenitycznej sprzedawana w postaci kartridży podobnych jak w drukarkach atramentowych. Ceny urządzeń zaczynają się od około 2,5 miliona złotych dla platform roboczych o wielkości 50 x 28 x 20 cm (XYZ).

Bezpośrednie osadzanie metali

Technologia bezpośredniego osadzania metali w postaci proszków lub drutu umożliwia wytworzenie przyrostowe największych obiektów sięgających nawet kilku metrów wysokości. Najbardziej rozpowszechniony rynkowo proces laserowego kształtowania przyrostowego (ang. *laser engineered net shaping* – LENS) został opracowany na potrzeby wojska w celu naprawy wałów korbowych i innych krytycznych części pojazdów wojskowych. W procesie laserowego kształtowania przyrostowego proszek sferyczny napawany jest bezpośrednio dyszami w docelowe miejsce (np. pęknięcie/wyszczerbienie) i topiony w ognisku lasera. Istnieje możliwość wytwarzania z kilku materiałów jednocześnie

– każdy podawany jest ze zbiornika z proszkiem osobną dyszą [7]. Obecnie istnieją mobilne stacje mogące działać w warunkach polowych i naprawiać uszkodzone części pojazdów i maszyn. W Polsce urządzenia LENS są w posiadaniu Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, która od lat prowadzi pionierskie projekty w zakresie ich wykorzystania w medycynie. W przypadku procesu wytwarzania przyrostowego wiązką elektronów (ang. *electron beam additive manufacturing* – EBAM) materiałem wsadowym jest drut, który wprowadzany jest w odpowiedni obszar wydruku na podstawie modelu CAD, a następnie topiony wiązką elektronów. Wydajność procesu wytwarzania przyrostowego z drutu za pomocą wiązki elektronów wynosi około 18,2 kg/h i jest on kilka razy wydajniejszy niż proces topienia laserem proszków metalicznych wprowadzanych dyszami, którego wydajność jest na poziomie 2,3 kg/h [8]. Jeżeli chodzi o ceny to koszty instalacji EBAM firmy Sciaky zaczynają się od około 1,5 miliona dolarów. Tańsze są urządzenia do napawania proszków metalicznych, które do konsolidacji wykorzystują laser – w zależności od wielkości komory roboczej ich ceny kształtują się od 150–250 tysięcy dolarów. Urządzenia te produkuje amerykański Optomec i RPM Innovations, koreański InssTek, a ostatnio nawet japoński NIKON.

Podsumowanie

Znalezienie odpowiedniej technologii wytwarzania przyrostowego wymaga od nabywcy dokładnej analizy stosunku jakości i wydajności do ceny urządzenia. W pierwszej kolejności należy zadać sobie pytanie, jaki ma kształt nasz obiekt docelowy i czy na pewno obróbka skrawaniem nie jest prostsza i szybsza. Jeśli mamy pewność, że kształt docelowej części jest niemożliwy do wytworzenia poprzez obróbkę skrawaniem, chcemy wytwarzać obiekty spersonalizowane lub małe serie, to technologie wytwarzania przyrostowego metali wydają się szczególnie warte rozważenia. Warto też sprawdzić, czy materiał, z którego chcemy rozpocząć produkcję, jest dostępny u producenta urządzenia, tzn. czy są opracowane parametry przetwarzania danego metalu lub stopu przy wykorzystaniu wybranego przez nas procesu. Większość producentów urządzeń oferuje parametry przetwarzania dla podstawowych typów stali (316L, 17-4PH, H13) zarówno dla procesów ekstruzji materiałów, topienia wiązką lasera/elektronów lub



5a, 5b. 5. Proszki metali wytworzone polską technologią atomizacji ultradźwiękowej (a) oraz urządzenie Blue Power Casting Systems wykorzystujące polską technologię atomizacji ultradźwiękowej (b)

Rys. 5.

łączenia cząstek metalicznych lepiszczem. Wielu producentów urządzeń działających w różnych technologiach oferuje parametry dla tytanu (np. Ti CP, Ti6Al4V), niklu (np. IN625, IN718) oraz aluminium (np. Al-Si10Mg) przy wykorzystaniu proszków o odpowiedniej gradacji i czystości, co z reguły wiąże się z koniecznością zakupu tych materiałów od producentów urządzeń. Jednak niektórzy producenci urządzeń nie posiadają w swojej ofercie parametrów przetwarzania materiałów wsadowych, lecz pozostawiają tę kwestię użytkownikom urządzeń. Jest to poważna bariera wejścia na rynek wytwarzania przyrostowego metali nowych podmiotów gospodarczych, ponieważ większość zakładów produkcyjnych nie posiada zaplecza do podstawowych badań charakterystyki materiałowej takich jak metalografia czy rozwinięcie powierzchni. Proces optymalizacji parametrów topienia laserowego lub łączenia proszków lepiszczem, które to wydają się w większości aplikacje optymalne kosztowo, związany jest z koniecznością wytworzenia setek, a niekiedy tysięcy, próbek wytworzonych przy zmiennych zestawach parametrów. Proces optymalizacji parametrów przetwarzania wymagany jest nie tylko przy rozpoczęciu pracy z całkowicie nowego materiału metalicznego, ale nawet przy zmianie gradacji lub czystości materiału wsadowego. Wyżej wymienione trudności powodują, że optymalizacja parametrów procesu wytwarzania przyrostowego dla róż-

nych technologii przeznaczonych do metali jest raczej domeną instytutów lub centrów badawczych. Pierwszą w Polsce jednostką przeznaczoną do projektowania nowych materiałów metodami mechaniki kwantowej na potrzeby wytwarzania przyrostowego, wytwarzania zaprojektowanych materiałów o specjalnych właściwościach i optymalizacji parametrów m.in. w procesie topienia laserowego i łączenia proszków lepiszczem jest Multidyscyplinarne Centrum Badawcze Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie. Laboratoria Multidyscyplinarnego Centrum Badawczego UKSW w Dziekanowie Leśnym służą wsparciu przedsiębiorców zainteresowanym wdrożeniem technologii wytwarzania przyrostowego w swoich zakładach. Jednym ze światowych trendów związanych z technologiami wytwarzania przyrostowego, realizowanych również w MCB UKSW, są badania nad wykorzystaniem uczenia maszynowego do automatyzacji analizy badań materiałowych i doboru parametrów procesu. Prace te prowadzone są w celu skrócenia czasu opracowania parametrów nowych materiałów metalicznych z kilku lat do nawet 6 miesięcy.

O tym, że w Polsce rozwija się przemysł związany z technologiami przyrostowymi świadczą już nie tylko firmy specjalizujące się w wytwarzaniu desktopowych urządzeń do druku 3D z filamentów polimerowych, ale coraz bardziej widoczne firmy działające w wymagającym i kosztownym obszarze ❖

❖ technologii wytwarzania przyrostowego metali. Szczególnym hitem naszego rodzimego rynku są producenci atomizerów ultradźwiękowych (Amazemet oraz 3D Lab), którzy produkują (głównie na eksport) urządzenia do wytwarzania proszków metalicznych zarówno ze złomu metalowego, jak i drutów/prętów o dowolnym składzie chemicznym (rys. 5a). Technologię firmy Amazemet opracowaną na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej licencjonuje niemiecka firma Blue Power Casting Systems, która jest znanym na świecie producentem atomizerów gazowych (rys. 5b). Urządzenia te pozwalają na wytwarzanie materiałów odpowiednich dla procesu topienia laserowego w złożu proszku nawet z miedzi i metali szlachetnych, których produkcja rośnie w naszym kraju dzięki prężnym działaniom koncernu KGHM Polska Miedź S.A. Bardzo widoczne są, oprócz wcześniej wspomnianej stomatologii, firmy z obszaru medycyny, które produkują m.in. spersonalizowane

Produkcyjnych – Fraunhofer Project Center (CAMT-FPC), które powstało na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej, na którym dostępnych jest wiele technologii wytwarzania przyrostowego w skali przemysłowej.

Jestem przekonany, że mimo wysokich kosztów technologii wytwarzania przyrostowego metali dla większości odbiorców będą one systematycznie maleć, ze względu na wzrost dostępności urządzeń oraz wiedzy w środowisku branżowym. Obserwujemy widoczny wzrost cen niektórych stopów metalicznych związany ze wzrostem cen pierwiastków sprowadzanych z Rosji (nikiel, tytan, pallad), ale uważam, że w dłuższej perspektywie nie wpłynie to negatywnie na rynek technologii przyrostowych metali, a nawet będzie mu sprzyjać, ponieważ technologie wytwarzania przyrostowego w znacznym stopniu ograniczają produkcję odpadów materiałowych. W drugim tygodniu maja bieżącego roku prezydent Biden po-



Znalezienie odpowiedniej technologii wytwarzania przyrostowego wymaga od nabywcy dokładnej analizy stosunku jakości i wydajności do ceny urządzenia.

instrumentarium medyczne. Na rynku pojawiają się również firmy usługowe, które nie specjalizują się w wytwarzaniu swoich projektów, ale produkcji obiektów na zlecenie na podstawie modeli CAD przesłanych przez zleceniodawców. Ten model biznesowy prowadzą w Polsce największe światowe koncerny, takie jak Materialise, która swoje centrum wytwórcze ulokowało pod Wrocławiem. Jednak produkcja Materialise w naszym kraju ogranicza się obecnie do tworzyw sztucznych. We Wrocławiu znajduje się również Centrum Zaawansowanych Systemów

wołał w USA nowy program „AM Forward”, mający wspierać rynek poprzez uzupełnianie braków w łańcuchu dostaw poprzez wykorzystanie technologii przyrostowych [9]. Myślę, że jest to świetna inicjatywa, której potrzebujemy również na naszym europejskim obszarze. Nawet jeśli nie znikną problemy w zakupie surowców spowodowane przez konflikt na Ukrainie, to chociaż wesprzemy naszą gospodarkę i dostarczymy jej zaawansowanych produktów, co z pewnością będzie wartością dodaną w dłuższej perspektywie czasu. □

Piśmiennictwo

1. Grand View Research. Metal 3D printing market size, share & trends analysis report by component (hardware, software, services), by technology, by software, by application, by vertical, by region, and segment forecasts, 2022-2030. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metal-3d-printing-market> (2022).
2. Kenny J.: GE Additive: It's not just about prototypes anymore. <https://www.ge.com/additive/stories/its-not-just-about-prototypes-anymore> (2018).
3. 3D HUBS. Additive manufacturing trend report 2021. [https://www.metal-am.com/3d-hubs-publishes-its-additive-](https://www.metal-am.com/3d-hubs-publishes-its-additive-manufacturing-trend-report-2021/)

- manufacturing-trend-report-2021/ (2021).
4. ISO/TC 261 Additive manufacturing. ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary. <https://www.iso.org/standard/74514.html> (2021).
5. Wysocki B. et al.: Laser and electron beam additive manufacturing methods of fabricating titanium bone implants. „Appl. Sci”, 2017, 7, 657.
6. Stevenson K.: 3D printed copper rocket engine tested successfully. <https://www.fabbaoo.com/news/3d-printed-copper-rocket-engine-tested-successfully#> (2022).
7. Ziętala M. et al.: The microstructure, me-

- chanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping. „Mater. Sci. Eng. A”, 2016, 677, 1-10.
8. What is directed energy deposition (DED) 3D printing? <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/what-is-ded-3d-printing/>.
9. US President Biden launches AM Forward initiative to boost Additive Manufacturing. <https://www.metal-am.com/us-president-biden-launches-am-forward-initiative-to-boost-additive-manufacturing/>.