

Development of methods for designing and manufacturing aircraft components with additive technologies

Opracowanie metod projektowania i wytwarzania elementów samolotów technikami przyrostowymi

WŁODZIMIERZ ADAMSKI
JANUSZ MICHALCEWICZ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2020.3.7>

This article is the description of the additive technology used for the production of aviation parts made of stainless steel and titanium, and shows the direction of further research and development of this technology for the needs of the aviation industry. The application of the robot-controlled LBDMD system (robotized laser based direct metal deposition for aircraft parts), which uses a 6-axis robot arm with a rotary table, has been shown in this paper. The LBDMD system simplifies the development of the multidirectional deposition process for complex parts, significantly reducing their production time. The benefits obtained from the use of additive manufacturing (AM) technology in the production of aviation parts were presented.

KEYWORDS: additive manufacturing, laser based direct metal deposition, 8-axis robot

W niniejszym artykule przedstawiono technologie przyrostowe, które są wykorzystywane w produkcji części lotniczych ze stali nierdzewnej i tytanu, oraz kierunek dalszych badań i rozwoju tych technologii w kontekście przemysłu lotniczego. Pokazano zastosowanie sterowanego robotem systemu LBDMD (systemu zrobotyzowanego, laserowego, bezpośredniego napawania metalu do produkcji części lotniczych), który wykorzystuje sześcioksiowe ramię robota wraz ze stołem obrotowym (dwie osie). System LBDMD upraszcza opracowanie procesu napawania wielokierunkowego w przypadku złożonych części, przez co znacznie skraca się czas ich produkcji. Zaprezentowano korzyści wynikające z zastosowania technologii przyrostowej AM w produkcji części lotniczych.

SŁOWA KLUCZOWE: technologia przyrostowa, laserowe bezpośrednie napawanie metalu, robot ośmioosiowy

Wprowadzenie

Wytwarzanie przyrostowe AM (*additive manufacturing*) – znane także jako drukowanie 3D, szybkie pro-

totypowanie lub wytwarzanie dowolnych kształtów i form – to proces łączenia materiałów w celu tworzenia obiektów z danych modelu 3D, zwykle warstwa po warstwie, w przeciwieństwie do ubytkowych metod produkcji, takich jak obróbka skrawaniem.

Zastosowanie wytwarzania przyrostowego AM z proszkami metali jest stosunkowo młodym, rozwijającym się sektorem przemysłu (rys. 1). Technologia przyrostowa stała się procesem odpowiednim nie tylko do wykonywania prototypów, lecz także do produkcji złożonych metalowych części w postaci ażurowych elementów oraz bionicznych kształtów.

Obecnie produkcja przyrostowa może zrewolucjonizować zarówno branżę projektową, jak i przemysł, np. lotniczy, energetyczny, motoryzacyjny, medyczny, narzędziowy i konsumpcyjny. Jest jednym z elementów przemysłu 4.0.

W odróżnieniu od technologii ubytkowych, takich jak skrawanie, wytwarzanie przyrostowe polega na nakładaniu i spajaniu kolejnych warstw materiału. Ta nowa, dodatkowa technika produkcyjna znajduje coraz szersze zastosowanie (rys. 2).

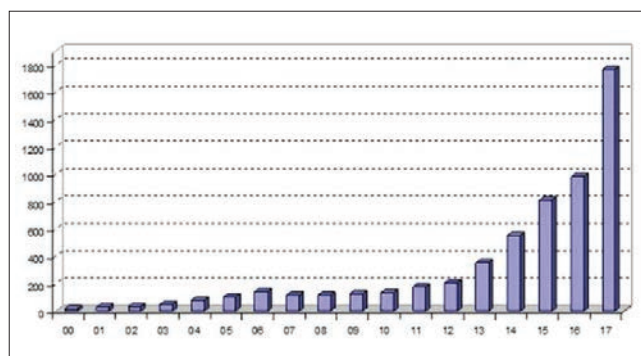


Fig. 1. The rapid development of additive technology in the world [6]
Rys. 1. Gwałtowny rozwój technologii przyrostowej na świecie [6]

* Dr hab. inż. Włodzimierz Adamski, w_adamski@poczta.onet.pl, <https://orcid.org/0000-0002-2996-4036> – Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Polska
Mgr inż. Janusz Michalcewicz, j.michalcewicz@eurotech.com.pl, <https://orcid.org/0000-0001-6253-9982> – Eurotech sp. z o.o., Mielec, Polska

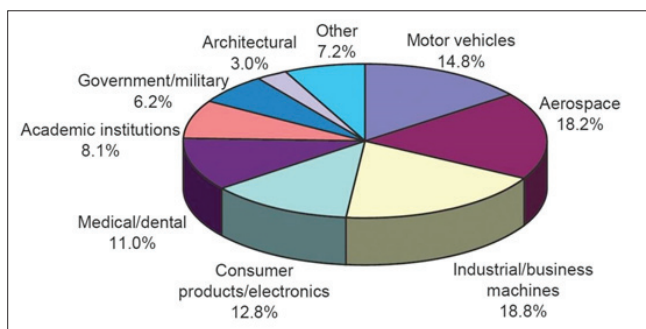


Fig. 2. Percentage share of AM technology revenues in individual types of industry [6]

Rys. 2. Procentowy udział przychodów technologii AM w poszczególnych rodzajach przemysłu [6]

Technologia przyrostowa wymaga jeszcze wielu badań i testów, jeśli ma być stosowana w lotnictwie, a więc tam, gdzie w grę wchodzi bezpieczeństwo ludzi.

Wymagania dla produkcji części do cywilnych samolotów są oparte na amerykańskich federalnych przepisach lotniczych US FAR – bez ich spełnienia nie można uzyskać certyfikatu typu samolotu. Przepisy są obszerne i szczegółowe, ale dla technologii przyrostowej najbardziej odpowiednie zapisy znajdują się w części 14 rozdziału 25, podrozdziału D, podsekcji 25,605. Wynika z nich, że stosowanie i wytrzymałość użytych materiałów części, których uszkodzenie może niekorzystnie wpływać na bezpieczeństwo, należy ustalić na podstawie doświadczeń lub testów. Ponadto należy zapewnić zgodność z zatwierdzonymi normami (przemysłowymi lub wojskowymi), które gwarantują wytrzymałość i inne właściwości w założeniach do danych projektowych, oraz uwzględnić wpływ warunków otoczenia, takich jak temperatura i wilgotność, przewidywanych w czasie eksploatacji części lotniczych. To oznacza, że wprowadzenie technologii przyrostowej do lotnictwa wymaga wykonania badań dowodowych [2, 3].

Możliwości technologii przyrostowej

Aby w pełni wykorzystać możliwości technologii przyrostowej AM, ważne jest przede wszystkim zaprojektowanie części, które dotychczas były wykonywane metodami konwencjonalnymi [1].

Optymalizację projektu można przeprowadzić w kilku kierunkach:

- zmniejszenia całkowitej liczby części (przez zamianę zespołu w jedną część),
- projektowania pod kątem funkcjonalności części – tak, by były one wielofunkcyjne,
- zmniejszenia masy części,
- optymalizacji topologicznej części,
- zaprojektowania części zapewniającej łatwość produkcji.

Technologia przyrostowa pozwala na wytworzenie jednej części, która w przypadku tradycyjnej produkcji wymagała wykonania kilkudziesięciu detali, montowanych następnie w jeden zespół, a więc eliminuje pracochłonność związaną z procesem montażu.

Korzyści, jakie można osiągnąć dzięki technologii przyrostowej, są coraz powszechniej znane. Zgodnie

z przewidywaniami AM szybko rewolucjonizuje procesy produkcyjne w wielu branżach [2, 3].

Technologia przyrostowa w przemyśle lotniczym

Obecnie przemysł lotniczy należy do czołówki innowatorów w obszarze rozwoju i wdrażania technologii przyrostowych (rys. 2). W dużej mierze wynika to z wysoko nakładowych budżetów, jakimi dysponują lotnicze jednostki naukowo-badawcze. W lotnictwie istotnym miernikiem jest masa samolotu. Przykładowo obniżenie masy samolotu o 1 kg wystarczy, aby maszyna w całym okresie eksploatacji wyemitowała o 25 ton mniej dwutlenku węgla. Producenci szukają więc lżejszych i bardziej wytrzymałych materiałów. Z pomocą przychodzą im technologie przyrostowe, z których już korzystają najwięksi producenci lotniczy, np. Airbus i Boeing.

Firma Boeing wdrożyła technologię AM w 2003 r. Obecnie tą metodą wykonuje się ok. 50 tys. części. Niektóre wsporniki, wydrukowane jako części 3D na uniwersytecie w Oksfordzie, zostały wykorzystane w systemie powietrznym i klimatyzacji wnętrza kabiny trzech Starlinerów, tj. taksówek kosmicznych Boeinga, które rozpoczęły loty testowe w 2018 r.

Nowe części wprowadził do swoich samolotów również koncern Airbus. W produkcji seryjnej samolotu A350 XWB zastosowano np. nowy wspornik tytanowy, który jest krytyczną częścią pylonu łączącego skrzydła z silnikami. Nowy samolot Airbus A350 XWB zawiera już ponad 1000 części wytworzonych w technologii przyrostowej.

Elementy wydrukowane w 3D są o ok. 50% lżejsze od tych wykonanych technikami tradycyjnymi. Dodatkowo pozwalają zmniejszyć zużycie materiału nawet o 95% [5]. To dlatego technologia przyrostowa od lat przyciąga uwagę firm z sektora lotniczego. Wielkie koncerny oraz małe firmy produkują coraz więcej części do samolotów i helikopterów, a także lżejsze i wydajniejsze jednostki napędowe, jak silniki czy turbiny.

Technologia AM oszczędza czas i obniża koszty. Co istotne, można ją także zastosować do eksploatawanych samolotów. Jej zaletą jest również to, że np. części zapasowe można zaprojektować, wykonać, a następnie przetestować w bardzo krótkim czasie.

Warto wspomnieć również o metodach bazujących na bezpośrednim dostarczaniu energii, m.in. LENS (*laser engineering net shape*) oraz EBAM (*electron beam additive manufacturing*). W tych przypadkach strumień materiału jest dostarczany przez dyszę i utwardzany za pomocą lasera lub strumienia elektronów bezpośrednio na powierzchni, na którą pada [11]. Niewątpliwymi zaletami tych technologii są: możliwość nakładania materiału na powierzchniach o dowolnym kształcie oraz bogaty wybór materiałów.

Laserowe bezpośrednie napawanie metalu LBDMD (*laser based direct metal deposition*)

W laserowym napawaniu materiałów LMD (*laser metal depositing*) wiązka laserowa topi lokalnie element powierzchni zawierający metaliczny materiał.

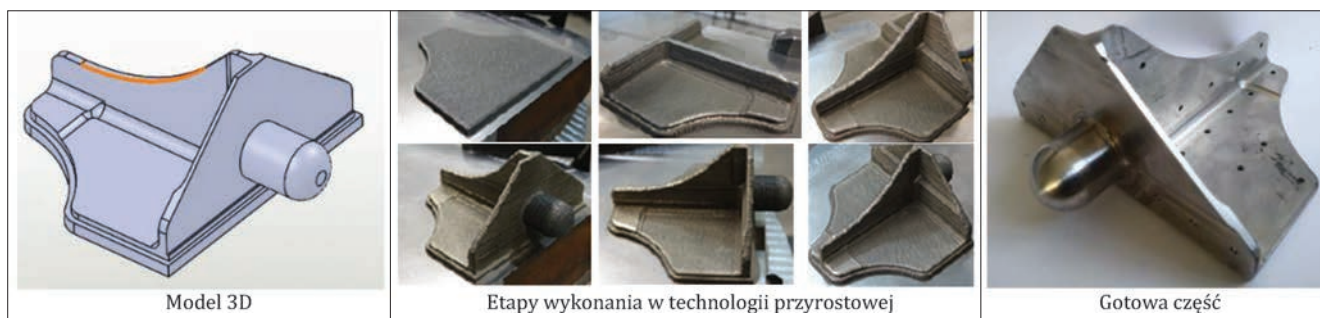


Fig. 5. Old bracket 3D model for additive manufacturing (from left): existing 3D model, one during AM production and after production on a CNC machine

Rys. 5. Stary model 3D wspornika do wytwarzania przyrostowego (od lewej): istniejący model 3D, część w trakcie produkcji AM i po zakończeniu produkcji na maszynie CNC

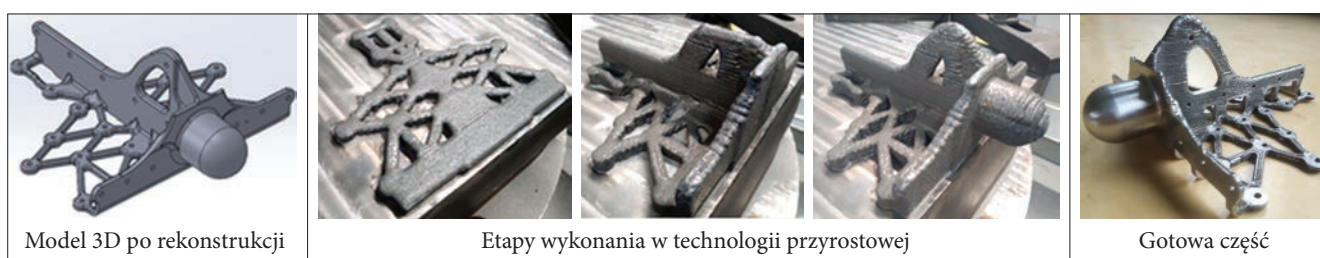


Fig. 6. Redesigned bracket for additive manufacturing with topology optimization (from left): after topology optimization, one during production and after production

Rys. 6. Przeprojektowany wspornik do wytwarzania przyrostowego z optymalizacją topologii (od lewej): po optymalizacji topologii, w trakcie produkcji i zaraz po zakończeniu produkcji

TABLE. Physical properties of the tested bracket No. 66999.09.09.00.00
TABLICA. Własności fizyczne badanego wspornika nr 66999.09.09.00.00

Część nr 66999.09.09.00.00	Objętość [cm ³]	Masa teoretyczna [g]	Masa rzeczywista [g]	Zmniejszenie masy
Stal nierdzewna (SS410) – projekt pierwotny (gęstość 7,8 g/cm ³)	87	678	688	
Stal nierdzewna – nowy projekt	39	312	362	53%
Stop tytanu (Ti-6Al-4V) – projekt pierwotny (gęstość 4,43 g/cm ³)	87	385	bd.	
Stop tytanu (Ti-6Al-4V) – nowy projekt	39	173	198	55% (teoretycznie)

W drugim kroku zaprojektowano nowy wspornik nr 66999.09.09.00.00 v2 w taki sposób, aby zmniejszyć jego masę, lecz zachować parametry wytrzymałościowe i móc w pełni wykorzystać możliwości technologii przyrostowej. Dokonano optymalizacji topologicznej wspornika (rys. 6 i 7). W tym przypadku masę zredukowano o 47%: z 688 g do 362 g (tablica).

Zmiana postaci konstrukcyjnej [1] wspornika i jego materiału pozwoliła ostatecznie zmniejszyć masę części o 71% (rys. 8).

Wykonane próbki materiałowe gotowych części były prawidłowe pod względem geometrycznym. Nie miały też żadnych pęknięć i porowatości, co wykazały późniejsze zdjęcia tomograficzne. Proces wykonania próbek w różnych kierunkach nie stanowił problemu. Próbki przeszły pozytywnie testy wytrzymałościowe i badania metalograficzne.

Podobnie postąpiono podczas badań części. Mimo że ich kształt i geometria były poprawne, to jednak wystąpiły pęknięcia widoczne podczas oceny



Fig. 7. Bracket made in AM technology of stainless steel material (SS410)

Rys. 7. Wspornik wykonany w technologii przyrostowej AM ze stali nierdzewnej (SS410)

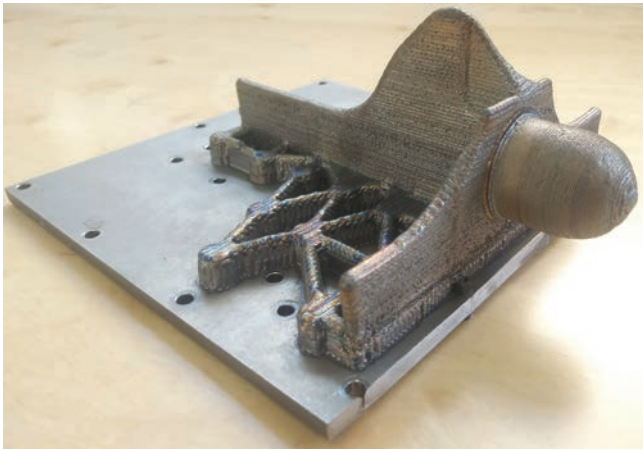


Fig. 8. Bracket made in AM technology of titanium alloy material (Ti-6Al-4V)

Rys. 8. Wspornik wykonany w technologii przyrostowej AM ze stopu tytanu (Ti-6Al-4V)

tomograficznej. Badania tomograficzne części ze stopu tytanu (rys. 11) ujawniły pęknięcia wywołane naprężeniami szczątkowymi w strukturach przestrzennych, co było spowodowane zmianą temperatury podczas procesu LMD.

Na potrzeby testów na rozciąganie przygotowano trzy różne typy próbek – z warstwami nakładanymi równoległe, prostopadle i naprzemiennie. Na podstawie badań wytrzymałościowych normatywnych próbek (rys. 9 i 10) określono wytrzymałość na rozciąganie materiału. Najlepsze parametry wytrzymałościowe uzyskano w przypadku technologii LDM naprzemiennego nakładania warstw. Kierunek nakładania warstw ma więc wyraźny wpływ na wytrzymałość (rys. 9).

Właściwości mechaniczne części wytwarzanych technologią przyrostową są zwykle lepsze w porównaniu z właściwościami części uzyskanych w procesie odlewania i nieznacznie gorsze lub bliskie właściwościom części konwencjonalnych, wykonanych w procesie obróbki plastycznej (kucia).

Według normy AMS 4928 wytrzymałość na rozciąganie stopu tytanu Ti-6Al-4V wynosi 950 MPa.

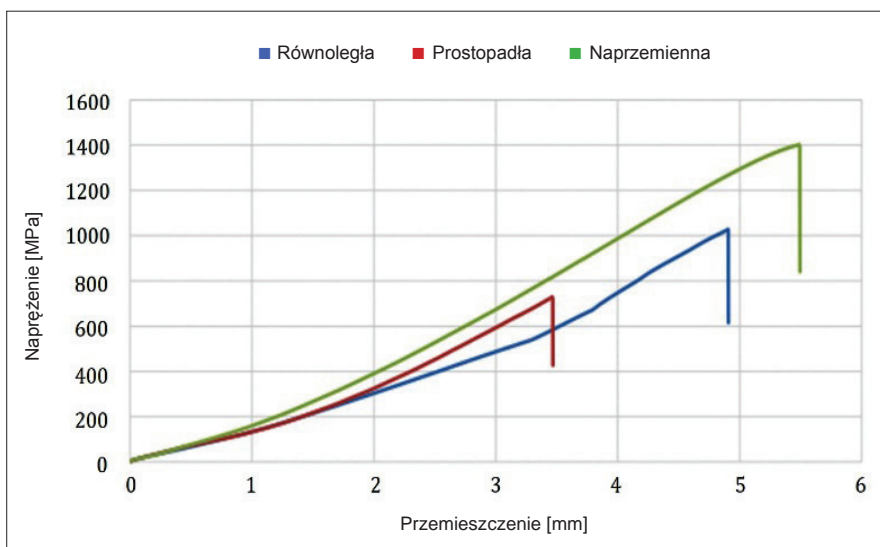


Fig. 9. Impact of the manufacturing process on the strength of test samples
Rys. 9. Wpływ procesu wykonania na wytrzymałość próbek



Fig. 10. Example of a test sample with layers applied perpendicularly

Rys. 10. Przykład próbki z warstwami nałożonymi prostopadle

Na podstawie badań przeprowadzonych przez firmę Eurotech ten parametr dla próbek ze stopu tytanu Ti-6Al-4V wyniósł: 1400 MPa – w przypadku warstw nakładanych naprzemiennie, 750 MPa – w przypadku warstw nakładanych poprzecznie, 1000 MPa w przypadku warstw nakładanych równoległe (rys. 9).

W celu znalezienia optymalnego rozwiązania i wyeliminowania wad metalurgicznych wytwarzanych części zmieniono eksperymentalnie wiele parametrów procesu, aby ostatecznie dobrać te najważniejsze. Przy przekroczeniu gęstości energii 40 J/mm^3 wewnątrz struktury i warstwa wierzchnia części praktycznie były wolne od wad [12]. W zależności od zmiany gęstości energii zmienia się nie tylko liczba porów, lecz także morfologia wad. Dokonano analizy tych wad oraz określono morfologię warstwy wierzchniej, kształtu i wielkości wtrąceń.

Przy niskiej gęstości energii, gdy prędkość skanowania jest wysoka, w próbkach występują duże ($> 100 \mu\text{m}$) i nieregularne defekty z powodu częściowego stopienia cząstek i wadliwego osadzania proszku.

Przy wysokich gęstościach energii i przy niskich prędkościach skanowania pory są kuliste i małe ($< 100 \mu\text{m}$), co jest efektem gazów uwięzionych w roztopionym materiale.

Analizę defektów i gęstości materiałów zakończono pomiarami chropowatości. Najniższe wartości chropowatości ($Ra = 10 \div 12 \mu\text{m}$), zapewniające lepszą jakość powierzchni, uzyskuje się przy niskiej gęstości energii ($< 30 \text{ J/mm}^3$). Jednakże w tych warunkach porowatość podpowierzchniowa części jest zbyt wysoka.

Przy nieznacznym zwiększaniu gęstości energii (do 30 J/mm^3) porowatość nadal jest niska, a pory w warstwie powierzchniowej są znacznie mniejsze.

Mimo że przy wyższych gęstościach energii liczba porów w warstwie wierzchniej jest minimalna, to jednak pogarsza się porowatość.

Można wywnioskować, że do uzyskania części o gęstości względnej $99,7 \div 99,9\%$ konieczna jest gęstość energii przekraczająca 40 J/mm^3 , podczas gdy gęstość energii 30 J/mm^3 jest wystarczająca do zapewnienia lepszej jakości warstwy wierzchniej i zminimalizowania defektów na powierzchni części [12].

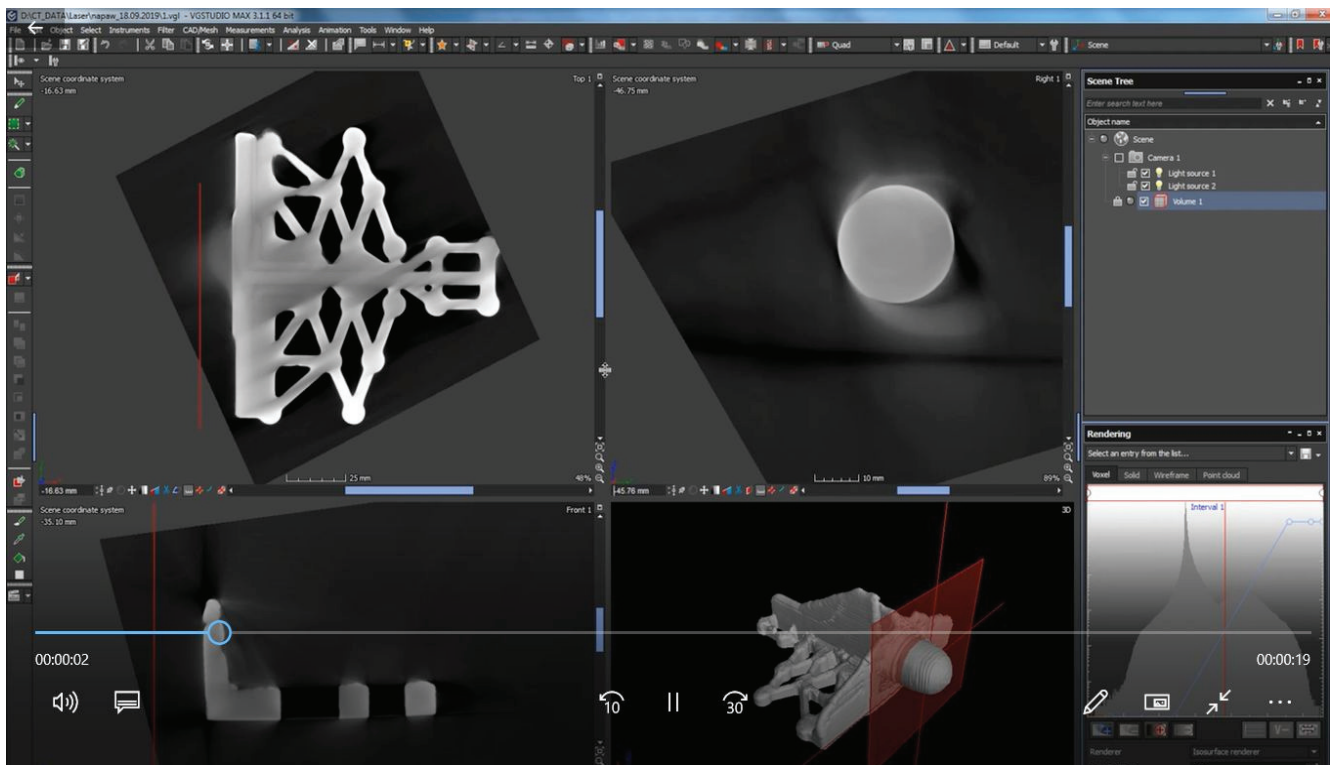


Fig. 11. Test results of titanium alloy bracket (Ti-6Al-4V) made in AM technology

Rys. 11. Wyniki badania wspornika ze stopu tytanu (Ti-6Al-4V) wykonanego w technologii przyrostowej AM

Optymalizację parametrów należy przeprowadzić zarówno dla wnętrza struktury części, jak i jej warstwy wierzchniej – chodzi o jednoczesne uzyskanie zminimalizowanych defektów i niskiej chropowatości.

Z punktu widzenia wytrzymałości mechanicznej i odpowiednich własności zmęczeniowych części musi ona mieć wysoką gęstość oraz charakteryzować się optymalną jakością warstwy wierzchniej i ograniczonymi do minimum wadami, co osiąga się przez optymalizację parametrów procesu. W ten sposób uzyskuje się pole robocze z określonym zestawem parametrów lasera, gwarantujące wysoką gęstość i niską porowatość wytworzonych części.

W procesach laserowych kluczowym czynnikiem jest wartość gęstości energii:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

gdzie: E – gęstość energii, P – moc lasera [W], v – prędkość skanowania [mm/s], h – odległość od środka jednej wiązki do środka następnej wiązki [mm], t – grubość warstwy [mm].

Do stopienia cząstek proszku warstwy przetwarzanej i poprzedniej potrzebna jest taka gęstość energii, aby zapewnić prawidłowe połączenie między kolejnymi warstwami oraz uniknąć braku stopienia i porowatości. Nadmierna energia może powodować parowanie materiału i tym samym powstawanie wad oraz zmniejszenie gęstości materiału. Kluczowym elementem jest dobór odpowiednich parametrów procesu wytwarzania części.

Podsumowanie

Dzięki technologii przyrostowej AM można produkować części lotnicze o geometrii, która jest trudna do uzyskania lub nawet nieosiągalna w przypadku innej znanej metody.

Krótki czas wykonania części prototypowych w technologii AM przekłada się na szybkie wdrożenie nowej koncepcji projektu do testowania i produkcji.

Technologia przyrostowa umożliwia produkcję części bez użycia specjalistycznego oprzyrządowania i przy znacznie mniejszym zużyciu materiału.

W przypadku opisanym w niniejszym artykule masę części udało się zredukować o 71%. Skrócono też czas cyklu wykonania części, przez uzyskano oszczędność kosztów rzędu 40% (w porównaniu z kosztami wykonania części metodami konwencjonalnymi). Było to efektem wyeliminowania wszystkich operacji łączenia i montażu – część wyprodukowano w jednym kroku (szybka produkcja). Części charakteryzowały się wysoką dokładnością wykonania i wysoką odpornością mechaniczną.

Za sprawą technologii AM proces produkcji jest bardzo elastyczny. Technologia przyrostowa jest szybsza niż metody konwencjonalne, jest bardzo wydajna i dokładna. Części wytworzone w ten sposób mają wysoką wytrzymałość.

Technologia przyrostowa AM nadaje się do produkcji części z materiałów trudnych w obróbce ubytkowej, takich jak stal nierdzewna niklowa.

Podsumowując: wytwarzanie kolejnych warstw części metodą laserowego napawania z użyciem zrobotyzowanego stanowiska jest obiecującym i bardzo dobrym sposobem produkcji seryjnej części lotniczych.



Projekt współfinansowany ze środków unijnych w ramach programu ramowego CLEAN SKY 2, More Affordable Small Aircraft Manufacturing (SAT-AM).



LITERATURA

- [1] Adamski W. „Wybrane problemy projektowania i wytwarzania CAD/CAM w przemyśle maszynowym”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2012.
- [2] Adamski W. „Wykorzystanie technologii Additive Manufacturing w przemyśle lotniczym”. *Mechanik*. 2 (2013).
- [3] Adamski W. „Wykorzystanie technologii przyrostowej w przemyśle lotniczym”. *Stal Metale & Nowe Technologie*. 3-4 (2013).
- [4] Adamski W. „Nowe technologie obniżające czas wykonania części integralnych w przemyśle lotniczym”. *Mechanik*. 2 (2015).
- [5] Adamski W. „Wpływ nowych technik wytwarzania na konstrukcję samolotu”. *Mechanik*. 12 (2015).
- [6] „Wohlers Report 2018”. Wohlers Associates, Inc., 2018.
- [7] Ding Y., Dwivedi R., Kovacevic R. “Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system. A case on building revolved part”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 44 (2017): 67-76.
- [8] Dwivedi R., Zekovic S., Kovacevic R. “A novel approach to fabricate unidirectional and branchings lender structures using laser-based direct metal deposition”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 47 (2007): 1246-1256.
- [9] Ding Y., Warton J., Kovacevic R. “Development of sensing and control system for robotized laser-based direct metal addition system”. *Additive Manufacturing*. 10 (2016): 24-35.
- [10] Munsch M. “Functional product through laser additive manufacturing of TiAl6V4, 29.02.2012”. LZN.
- [11] Leyens Ch., Brückner F., Lopez E., Riede M. “Laser Additive Manufacturing Workshop Schaumburg”. The Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS, March 2017.
- [12] “Introduction To Additive Manufacturing Technology – A guide for Designers and Engineers 2019”, www.epma.com/am, European Powder Metallurgy Association. ■