

Podstawowe wiadomości dotyczące druku 3D z metalu



NORBERT KALETA

Ekspert współpracujący z Platformą Przemysłu Przyszłości

Przemysłowy druk 3D (inaczej wytwarzanie addytywne lub technologia przyrostowa) z metalu otwiera wiele nowych możliwości w projektowaniu części. Jeżeli chcemy w pełni wykorzystać potencjał nowej technologii, powinniśmy poznać oraz stosować kilka zasad projektowania związanych z addytywnym procesem produkcji.

Niniejsze opracowanie ma jedynie charakter informacyjny i nie może stanowić podstawy do jakichkolwiek roszczeń związanych z decyzjami gospodarczymi podejmowanymi w związku z powyższymi treściami. Autor ani Fundacja Platforma Przemysłu Przyszłości nie ponosi odpowiedzialności za konsekwencje decyzji biznesowych podejmowanych przez podmioty korzystające z opracowania, a wszelkie ryzyko związane z takimi decyzjami ponosi podmiot je podejmujący.

Projektowanie elementów przeznaczonych do wytwarzania przyrostowego z metalu

Przemysłowy druk 3D (inaczej wytwarzanie addytywne lub technologia przyrostowa) z metalu otwiera wiele nowych możliwości w projektowaniu części. Jeżeli chcemy w pełni wykorzystać potencjał nowej technologii powinniśmy poznać oraz stosować kilka zasad projektowania związanych z addytywnym procesem produkcji. Nie będzie dla nas zaskoczeniem, że projektując części przeznaczone do konwencjonalnych technik wytwarzania musimy pamiętać o odpowiednich dla danej metody zasadach projektowania części. Przykładowo, jeśli stwierdzimy, że projektowana przez nas część zostanie wytworzona w procesie formowania wtryskowego czy obróbkę maszynową, już w procesie projektowania prototypu będziemy brali pod uwagę możliwości oraz ograniczenia danej technologii. Również projektując elementy przeznaczone do produkcji addytywnej powinniśmy brać pod uwagę możliwości oraz ograniczenia tej technologii. Sukces zastosowania technologii druku 3D w metalu w równym stopniu zależy od właściwego wyboru materiału, procesu, jak i właściwie przygotowanego projektu.

Zrozumienie podstawowych zasad procesu druku 3D pozwoli w pełni wykorzystać wszechstronność technologii – niezależnie od tego, czy projektujemy część przeznaczoną do szybkiego prototypowania, czy tworzymy element do produkcji seryjnej. Zasady projektowania będą się nieznacznie różniły w zależności od zastosowanej technologii druku 3D w metalu. W opracowaniu omówione zostaną zagadnienia związane z projektowaniem części przeznaczonych do wytwarzania w procesie druku 3D z metalu.

Zalety stosowania produkcji addytywnej z metalu

Wśród podstawowych zalet zastosowania druku 3D w metalu można wyróżnić trzy:

- wytwarzanie elementów o skomplikowanej geometrii,
- redukcja masy komponentów,
- skrócenie czasu produkcji.

Wytwarzanie elementów o skomplikowanej geometrii

Jedną z podstawowych cech konwencjonalnych procesów wytwarzania jest wzrost kosztów, wraz ze wzrostem złożoności projektu. Wynika to z konieczności wykorzystania większych nakładów pracy na wytworzenie części o złożonej geometrii. Zaletą technologii addytywnych jest możliwość wytwarzania elementów o skomplikowanej geometrii w krótszym czasie oraz przy użyciu mniejszych zasobów (w porównaniu do tradycyjnych technik wytwarzania, takich jak frezowanie czy toczenie). Stosując druk 3D z metalu możemy zastąpić cały zespół elementów jednym komponentem. Wytworzenie całego zespołu jako jednego elementu, jest równoznaczne ze skróceniem czasu niezbędnego do wytworzenia oraz montażu zespołu. Dodatkowo, mniejsza liczba miejsc łączenia to mniejsze ryzyko awarii, czy złego dopasowania komponentów. Ogólnie można założyć, że im bardziej skomplikowany i złożony element mamy wykonać, tym większe korzyści możemy uzyskać stosując technologie addytywne.

Na rysunku 1 przedstawiono projekt wydechu do sportów motorowych wykonany przez firmę 3D System. Na zdjęciu widoczne jest około 20 elementów z blachy wymaganych do wykonania konstrukcji spawanej. Wiele z nich wykonano technologią hydroformowania, a każdy wymagał zastosowania indywidualnego oprzyrządowania. Wszystkie elementy mogły zostać zastąpione przez jedną rurę wydechową wykonaną przy użyciu druku 3D z metalu.

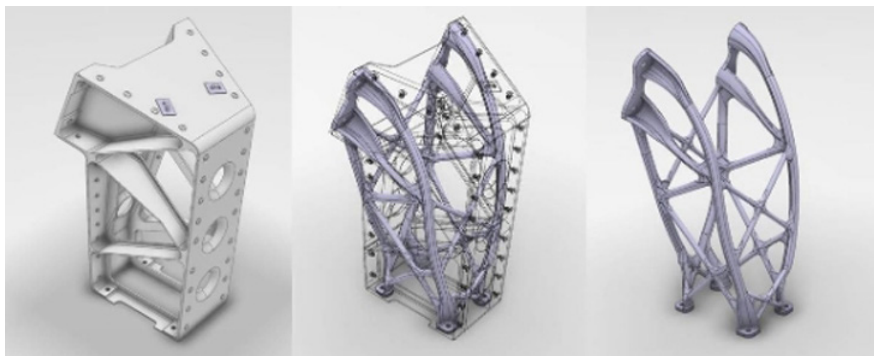


Rys. 1. Po lewej – 20 części blaszanych i hydroformowanych potrzebnych do montażu oryginalnej rury wydechowej. Po prawej – pojedyncza, monolityczna rura wydechowa, wykonana w technologii druku 3D przez firmę 3D Systems. (zdj. <https://www.3dsystems.com/>)

Redukcja masy komponentów

Ograniczenia projektowe tradycyjnych metod wytwórczych często oznaczają, że dodawany jest niepotrzebny materiał, aby uniknąć złożoności czy zapewnić możliwość produkcji. Wiemy już, że w przypadku druku 3D, złożoność nie jest problemem, a nawet jest cechą pożądaną. Dzięki temu, podczas wytwarzania addytywnego metalowych części, możliwe jest umieszczenie materiału tylko tam, gdzie jest to niezbędne. Finalnie pozwala to nie tylko na redukcję masy samej części, ale także na skrócenie procesu druku. Niższa masa części to także mniejsze ilości materiału w fazach zakupu, magazynowania czy transportu. Zmniejszenie masy wpływa nie tylko na produkcję części, ale także na jej koszty operacyjne i wydajność. To szczególnie ważne w przypadku przemysłu kosmicznego czy w lotnictwie, gdzie liczy się każdy gram.

Jako przykład może posłużyć wspornik, przeznaczony do montażu anten satelity telekomunikacyjnego E3000. Firma Airbus Defence and Space znacznie poprawiła poprzednią konstrukcję wykonaną tradycyjnymi metodami. Stosując druk 3D możliwe było przeprojektowanie wspornika składającego się z 4 głównych części i 44 nitów w pojedynczy element, który jest o 40% sztywniejszy i o 35% lżejszy niż jego poprzednik.



Rys. 2. Wspornik strukturalny satelity telekomunikacyjnego Eurostar E3000, wykonany w technologii druku 3D ze stopu aluminium. Wyprodukowany przez Airbus Defence and Space (zdj. <https://3dprintingindustry.com>)

Skrócenie czasu produkcji

Powszechnie znaną zaletą wytwarzania przyrostowego jest możliwość skrócenia czasu od projektu do wytworzenia gotowej części. Wynika ona z oszczędności czasu potrzebnego na wyprodukowanie narzędzi niezbędnych w procesie produkcyjnym. Tradycyjne technologie wymagają często licznych niestandardowych narzędzi, osprzętu lub form. W produkcji addytywnej możemy pominąć większość z tych narzędzi i produkować części na podstawie modelu 3D. W tym wypadku sumują się oszczędności wynikające ze skrócenia czasu przestojów, produkcji oraz czasu wprowadzenia nowego rozwiązania.

Skrócenie tego czasu pozwala na realizację zamówień w przeciągu kilku dni, a nie tygodni. Przykładem jest zespół InMotion, odpowiedzialny za projekt elektrycznego samochodu wyścigowego na Le Mans 2019. Był on w stanie zaprojektować i wykonać nowy lekki wahacz poprzeczny z tytanu w niecały tydzień.



Rys. 3. Wahacz poprzeczny wykonany technologią druku 3D z tytanu (zdj. Gerlach Delissen oraz InMotion Automotive, <https://3dprint.com>)

Zasady projektowania

Minimalna grubość ścianki

Zalecana minimalna grubość ścianki możliwa do wykonania wynosi zwykle 0,2 mm, ale może się różnić w zależności od maszyny, użytego proszku i materiału. Jeśli ściany modelu są zbyt cienkie lub nie są podparte, istnieje ryzyko wybożenia powierzchni. Na rysunku 4, przedstawiono przykład kolektora wykonanego ze stopu Ni718. Część została wydrukowana i posiada odpowiednią gęstość, ale ze względu na dużą średnicę wydruku, ścianki o grubości 200 mikronów uległy deformacji. W tym przypadku, ścianka musi zostać pogrubiona, aby uniknąć efektu wybożenia. W przypadku ścianek o grubości poniżej 1 mm należy zachować stosunek wysokości do grubości ściany mniejszy niż 40:1. W przeciwnym wypadku konstrukcja może ulec deformacji.

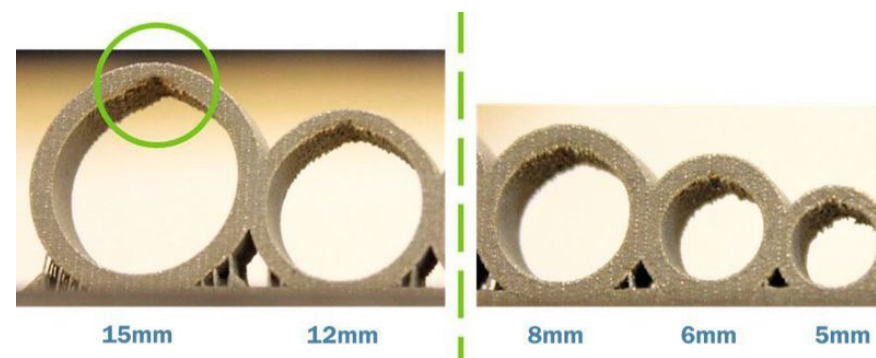


Rys. 4. Kolektor wykonany technologią druku 3D ze stopu Ni718 z efektem wybożenia przez zbyt cienkie ściany (zdj. Renishaw, <https://www.epma.com>)

Otwory i kanały wewnętrzne

Minimalna średnica otworu możliwa do wydrukowania wynosi 0,4 mm. Jednakże w przypadku kanałów o skomplikowanym kształcie, usunięcie proszku z takiego kanału może okazać się niemożliwe. Dlatego zalecana minimalna średnica

kanałów wynosi 2 mm. Zazwyczaj drukowanie otworów oraz kanałów o średnicy poniżej 10 mm nie wymaga zastosowania struktur podporowych. Natomiast dla poziomych oraz pochylonych kanałów o wartości średnicy powyżej 10 mm potrzebne są konstrukcje podporowe, które mogą być trudne do usunięcia (szczególnie w przypadku kanałów nieliniowych). W tym przypadku, aby uniknąć konstrukcji wspierających, możliwą opcją jest modyfikacja przekroju kanału (np. zastosowanie kanały o przekroju zbliżonym do kształtu kropli lub rombu). Kolejną opcją jest przeprojektowanie kanałów w taki sposób, aby podpory były ich integralną częścią. W takim wypadku usuwanie struktur podporowych nie będzie konieczne.



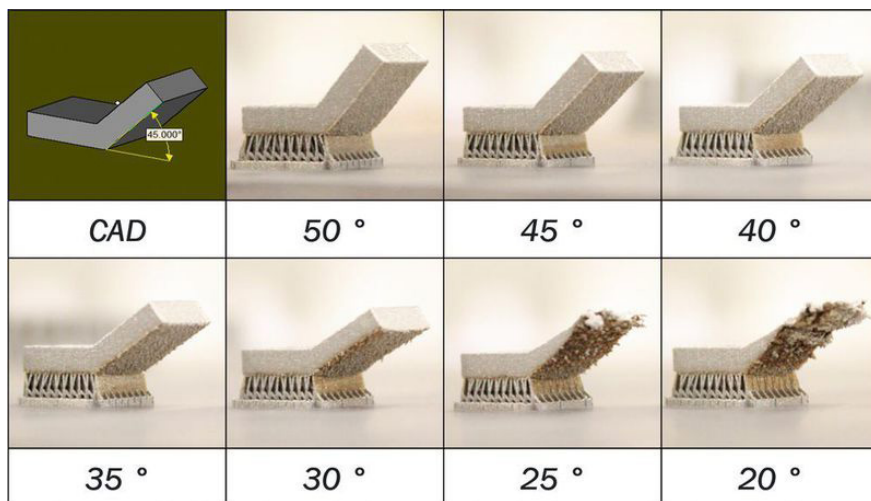
Rys. 5. Przykład drukowanych kanałów o różnych średnicach (zdj. Protolabs, <https://www.spotlightmetal.com>)

Maksymalny kąt nachylenia powierzchni

Ważną zasadą podczas produkcji części przy zastosowaniu technologii addytywnych jest unikanie zbyt dużego pochylenia drukowanych ścianek. W procesie druku 3D z metalu każda kolejna warstwa musi być podparta przynajmniej częściowo przez poprzednią warstwę stopionego proszku. Gdy kąt między powierzchnią drukowanego detalu, a platformą roboczą jest mniejszy niż 45°, wymagane jest stosowanie struktur podporowych. Taki zabieg stosowany jest w celu uniknięcia wysokiej chropowatości powierzchni, zniekształceń, a w szczególnych wypadkach uszkodzenia drukowanego elementu. Wpływ wartości kąta nachylenia powierzchni na chropowatość wydruku przedstawiono na rysunku 6. Wysoka chropowatość

powierzchni jest wynikiem nakładania kolejnych warstw bezpośrednio na luźnym proszku bez stosowania konstrukcji wsporczej. W tym przypadku obszar stopiony w punkcie ogniskowym bardzo szybko się ochładza, a powstające naprężenie „zawija” materiał w górę. Stosując podpory łączące elementy z platformą roboczą, uniemożliwiamy deformację powierzchni. Dolna powierzchnia jest zbudowana ze stopionego i częściowo spiekane proszku, ponieważ laser przenika przez złożone proszku i zaczyna gromadzić luźne cząstki proszku otaczające ognisko lasera.

Jeśli istnieje taka możliwość w etapie projektowania powinniśmy unikać płaskich powierzchni nachylonych do płyty budowy pod kątem mniejszym niż 45°



Rys. 6. Wpływ kąta nachylenia ścianki na jakość wydruku (zdj. Protolabs, <https://www.spotlightmetal.com>)

Otwory pozwalające na usunięcie niespieczonego proszku

Dzięki zastosowaniu technologii druku 3D w celu redukcji masy, możliwe jest produkowanie części pustych w środku lub wypełnionych, przez struktury siatkowe. Po procesie wydruku wewnątrz tych przestrzeni będzie znajdował się niespieczony proszek. Dlatego, aby umożliwić usunięcie nieroztopionego proszku, konieczne jest zaprojektowanie otworów, które pozwolą na jego usunięcie.

Zalecana średnica otworu wynosi 2-5 mm. Zastosowanie kilku otworów znacznie ułatwi proces usuwania proszku.



Rys. 7. Przykład wirnika wypełnionego strukturą podporową w celu zmniejszenia wagi (zdj. Star Rapid, <https://makezine.com>)

Jednym z największych nieporozumień dotyczących druku 3D z metalu jest to, że wszystkie aplikacje zaprojektowane w zakresie konwencjonalnych technologii produkcji można przekształcić w rozwiązania wykonane przyrostowo. Jeśli część była pierwotnie zaprojektowana do konwencjonalnej technologii produkcji, to z wielu powodów prawdopodobnie nie jest najlepszym kandydatem do druku 3D. Jeśli rozważamy wydrukowanie części o niskim poziomie skomplikowania lub dużej masie, wówczas czas produkcji takiej części jest stosunkowo długi. A zastosowanie technologii druku 3D nie generuje wartości dodanej czy ulepszonej funkcjonalności. Dlatego, aby wykorzystać potencjał wytwarzania przyrostowego, najlepszą drogą jest przeprojektowanie części. Stosując zalecenia opisane w powyższym artykule, mamy szansę nie tylko uzyskać nowe funkcjonalności, ale również ograniczyć koszty związane z procesem wydruku.

Zasady wyboru druku 3D w metalu jako technologii wytwarzania

Technologie druku 3D stają się coraz bardziej popularne i coraz częściej są traktowane jako metody alternatywne w porównaniu do tradycyjnych technologii wytwarzania (jak np. obróbka ubytkowa lub odlewanie). W opracowaniu zostaną przybliżone zasady, jakimi powinniśmy się kierować, aby wytypować elementy, w przypadku których zastosowanie technologii druku 3D w metalu może być konkurencyjne.

Większości osób hasło druku 3D kojarzy się z technologią FDM (ang. *Fused Deposition Modelling*), w której detale powstają w wyniku nanoszenia (warstwa po warstwie) termoplastycznego materiału. Materiał w formie żyłki (filament) jest podgrzewany, a następnie nakładany za pomocą głowicy.

W przypadku druku 3D z metalu mamy pewne podobieństwa – również nakładamy materiał warstwa po warstwie, aż do uzyskania finalnego wyrobu. Główne różnice to stosowany materiał (proszek metalu) oraz sposób jego łączenia. W procesie wytwarzania proszku metalu musi zostać przetopiony za pomocą wiązki lasera lub wiązki elektronów. Te dwie kwestie generują jednak drastyczne różnice, jeżeli chodzi o budowę urządzeń oraz koszty ich eksploatacji.

O ile drukarki oraz materiały w technologii FDM są stosunkowo tanie i na posiadanie takiego urządzenia mogą pozwolić sobie nawet hobbyści (którzy często instalują takie urządzenia we własnych domach), o tyle drukarki pozwalające na wytwarzanie detali z metalu zarezerwowane są jedynie dla firm lub jednostek naukowych. Koszt zakupu samej drukarki do metalu waha się w zakresie od kilkuset tysięcy do kilku milionów złotych.

Urządzenia te do pracy wymagają specjalnie przygotowanego pomieszczenia oraz szeregu urządzeń pomocniczych, takich jak: urządzenia do obróbki cieplnej oraz mechanicznej, sita do odzyskiwania proszku czy stanowiska do oczyszczania wydruków. Ze względu na wysokie koszty, musimy ze starannością wybierać aplikacje, w których chcemy zastosować druk 3D jako technologię wytwarzania.

Najważniejszym aspektem będzie zrozumienie samego procesu wytwarzania. Dla ułatwienia skupimy się tu tylko na technologiach druku w złożu proszkowym

LPBF (ang. *Laser Powder Bed Fusion*). W zależności od producenta maszyny i stosowanych patentów, możemy spotkać się z różnymi nazwami technologii, m.in.:

- SLM (ang. *Selective Laser Melting*),
- DMLM (ang. *Direct Metal Laser Melting*),
- DMLS (ang. *Direct Metal Laser Sintering*).

W przypadku wymienionych technologii możemy znaleźć cechy wspólne. Elementy są wytwarzane na podstawie modelu 3D, który musi zostać odpowiednio przygotowany przed procesem produkcyjnym. Dla każdego modelu należy zaprojektować struktury podporowe (tzw. *supporty*). Pozwalają one na przytwierdzenie wydruku do platformy roboczej, zapobiegają deformacji detali w trakcie wydruku, wspierają powierzchnie o zbyt dużym kącie nachylenia oraz zapewniają odprowadzenie ciepła z wydruku. Proces wydruku realizowany jest w zamkniętej komorze drukarki wypełnionej gazem obojętnym, azotem lub argonem.

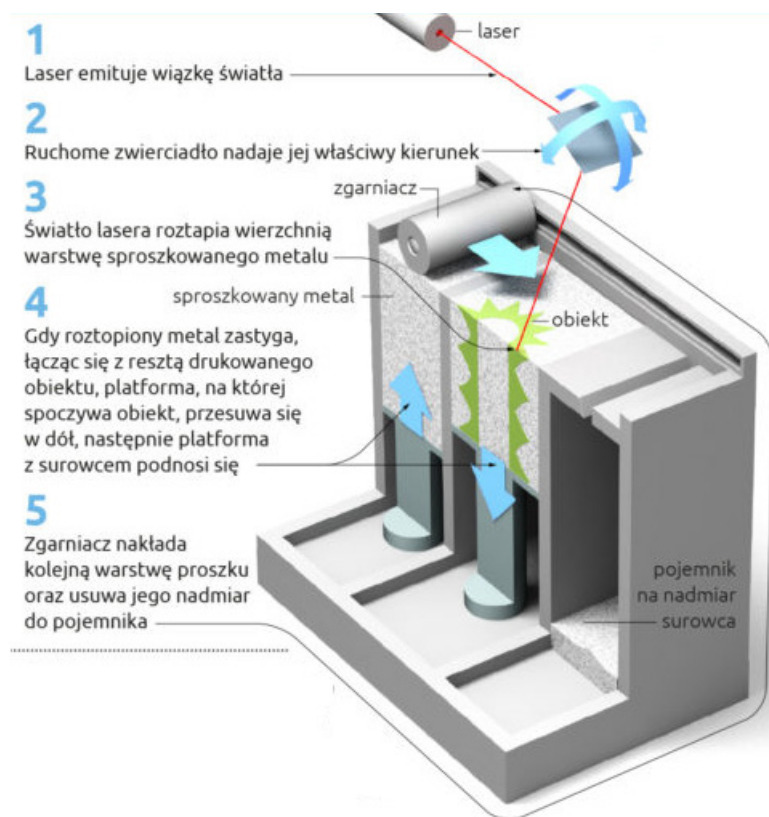
Do podstawowych i najważniejszych etapów procesu można zaliczyć:

- naniesienie cienkiej warstwy proszku metalu,
- selektywne stopienie proszku metalu za pomocą wiązki lasera,
- obniżenie komory z wydrukiem,
- naniesienie kolejnej warstwy proszku.

Sekwencja ta jest powtarzana aż do uzyskania finalnego wyrobu. Po zakończeniu procesu druku detale należy oczyścić z niespieczonego proszku, który po procesie przesiewania może być wykorzystany do wytwarzania kolejnych części. Przeważnie udaje się odzyskać ponad 90% niespieczonego proszku.

Następnie, wydruk należy poddać obróbce cieplnej, w celu usunięcia naprężeń powstałych podczas wydruku. W etapie tym można również poprawić własności mechaniczne wydruku. Zakres zmian własności mechanicznych zależy od zastosowanego materiału. Bardzo ważne jest, aby przeprowadzić proces obróbki cieplnej przed odcięciem wydruku od płyty bazowej. W przeciwnym razie naprężenia powstałe podczas procesu wytwarzania mogą spowodować deformacje wydruku lub w skrajnych wypadkach nawet jego uszkodzenie. Po odcięciu wydruk należy oczyścić ze struktur podporowych. Następnie, wydruki poddaje się

obróbce wykańczającej. W zależności od potrzeb może to być poprawa powierzchni elementu (np. piaskowanie, szlifowanie, polerowanie, dodawanie powłok) lub obróbka mechaniczna (np. CNC), w celu uzyskania pożądanej dokładności wymiarowej.



Rys. 1. Etapy procesu druku 3D w metalu (graf. Lech Mazurczyk, <https://przemyslprzyszlosci.gov.pl>)

Proces wytwarzania w technologii druku 3D z metalu nie kończy się na wyjęciu detalu z drukarki. Rozważając druk 3D z metalu jako proces produkcyjny, w pierwszej kolejności powinniśmy rozstrzygnąć kilka podstawowych kwestii dotyczących możliwości zastosowania wytwarzania addytywnego z metalu.

Wybór materiału

Wytwarzanie przyrostowe metalowych elementów wymaga zastosowania odpowiedniego materiału jakim jest proszek metaliczny. Nie możemy tu zastosować dowolnego proszku.

Proszek stosowany w procesie druku 3D z metalu powinien posiadać odpowiednie cechy, takie jak sferyczny kształt, brak porowatości wewnętrznej oraz odpowiednią gradację (tj. wielkość cząstek). W zależności od technologii druku stosuje się proszki o różnej gradacji.

W przypadku technologii *Laser Powder Bed Fusion* będą to najczęściej proszki o wielkości cząstek do 45 μm . Z powodu tego ograniczenia w procesie druku stosuje się proszki wytwarzane w procesie atomizacji gazowej lub plazmowej, które następnie muszą zostać przesiane. Ze względu na skomplikowany proces produkcyjny, liczba dostępnych materiałów produkcyjnych jest ograniczona. Dlatego też, w pierwszej kolejności należy sprawdzić, czy dostępny jest odpowiedni proszek dla naszej aplikacji. W procesie druku 3D z metalu możemy wybierać spośród materiałów, takich jak:

- stale narzędziowe,
- stale nierdzewne,
- stopy aluminium,
- stopy tytanu,
- stopy niklu,
- stopy kobaltu i chromu,
- stopy miedzi.

W tabelicy 1 (na następnej stronie) przedstawiono zestawienie przykładowych materiałów dostępnych obecnie na rynku, wraz z ich własności mechanicznymi. Lista ta nie wyczerpuje jednak wszystkich materiałów dostępnych w sprzedaży, a uzyskiwane własności mogą być różne w zależności od zastosowanej drukarki 3D.

Tab. 1. Zestawienie wybranych proszków przeznaczonych do procesu druku 3D z metalu, wraz z możliwymi do uzyskania własnościami mechanicznymi wydruków

GRUPA	MATERIAŁ	PO WYDRUKU				PO OBRÓBCE CIEPLNEJ			
		Wytrzymałość na rozciąganie	Granica plastyczności	Wydłużenie	Twardość	Wytrzymałość na rozciąganie	Granica plastyczności	Wydłużenie	Twardość
		R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	[%]	[HV ₁₀]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	[%]	[HV ₁₀]
Stal nierdzewna	316L (1.4404)	620	505	43	210	575	345	52	170
	15-5PH (1.4545)	1190	805	9	360	1410	1265	8	-
	17-4PH (1.4542)	830	570	31	220	1350	1250	5	43-46 HRC
Stal narzędziowa	1.2709	1155	960	11	350	2020	1935	5	580
	H13	1375	1245	2	-	1775	1590	7	-
Stopy tytanu	TiAl ₆ V ₄ ELI (Grade 23)	1280	1135	8	360	965	880	14	305
	Ti (Grade 2)	700	585	25	225	-	-	-	-
Stopy niklu	HX	720	545	18	245	-	-	-	-
	IN625	925	665	31	280	-	-	-	-
	IN718	995	695	27	300	-	-	-	-
Stopy aluminium	AlSi ₁₀ Mg	450	275	5	125	260	145	11	80
	AlSi ₇ Mg _{0.6}	365	255	6		330	265	11	
Kobalt - chrom	CoCr ₂₈ Mo ₆	1070	715	10	375	-	-	-	-
Stopy miedzi	CuSn ₁₀	505	380	19	160	-	-	-	-

Dobór systemu wytwarzania pod kątem wymiaru elementu

Pierwszym aspektem, jaki należy rozważyć jest to, czy istnieje system o odpowiednich wymiarach gabarytowych komory roboczej mieszczącej naszą część. Odpowiedź na to pytanie będzie pewnie twierdząca, gdyż na rynku można obecnie znaleźć systemy drukujące w metalu o naprawdę dużych gabarytach komór roboczych np. 400×400×400 mm, 500×280×850 mm czy 800×400×500 mm. Jeżeli te komory okażą się za małe zawsze możemy rozważyć drukarki pracujące w technologii DED (ang. *Directed Energy Deposition*), gdzie możliwe jest znalezienie systemów o przestrzeni roboczej powyżej 1 metra.

Systemy dostępne na rynku będą się jednak różniły oferowaną dokładnością wydruku, możliwą do wykonania minimalną grubością ścianki czy szybkością wydruku. Można przyjąć zasadę, że wraz ze wzrostem szybkości wytwarzania, jaką oferuje drukarka, wzrasta również możliwa do wydrukowania minimalna grubość ścianki. Wiąże się to z faktem, że większa szybkość wytwarzania wymaga przetapiania większej ilości materiału w tym samym czasie, a więc stosowania wyższej mocy lasera oraz nakładania grubszych warstw materiału. Dlatego oprócz wymiarów komory roboczej powinniśmy sprawdzić, czy w przypadku wytypowanego systemu możliwe będzie wykonanie wszystkich elementów naszego modelu.

Obecny rozwój technologii druku 3D w metalu pozwala na wykonanie detali z dokładnością do dziesiątych części milimetra. Każdy szczegół naszego wydruku, który wymaga wysokiej precyzji wykonania (np. powierzchnie współpracujące z innymi elementami) musi zostać poddany obróbce CNC.

Zastosowanie druku 3D w metalu może konkurować z obróbką maszynową, jedynie w następujących przypadkach:

- części, których obróbka jest bardzo skomplikowana,
- braku możliwości wykonania detalu innymi metodami,
- istnieje możliwość zastąpienia zespołu detali jednym drukowanym elementem.

Jeżeli daną część można w łatwy sposób wykonać np. przy zastosowaniu obróbki skrawaniem, właśnie tę technologię powinniśmy wybrać.

Wydajność procesu druku 3D jest wyraźnie niższa od wydajności obróbki maszynowej. Dla najbardziej wydajnych systemów możemy znaleźć informacje o maksymalnej szybkości wydruku do 170 cm³/h. Natomiast szybkości te możemy uzyskać jedynie dla określonych materiałów oraz geometrii modelu. Przeważnie, szybkość produkcji będzie znacząco niższa od tej wartości. Dlatego też, jeżeli mamy do wykonania serię wyrobów, które bez większego trudu możemy wykonać, przy zastosowaniu innej tradycyjnej technologii, zapewne ta technologia powinna być naszym wyborem.

Ograniczenia technologii druku 3D

Technologia druku 3D, jak każda inna technologia posiada zalety, ale nie jest pozbawiona pewnych ograniczeń oraz wad. Mając na uwadze te ograniczenia, można przyjąć, że druk 3D z metalu może przynieść korzyści, gdy:

- wykonanie elementu jakąkolwiek inną metodą jest niemożliwe ze względów technologicznych,
- wykonanie elementu wymaga dużego nakładu pracy lub jest bardzo skomplikowane, np. wykonanie prototypowego odlewu, w przypadku którego trzeba wykonać skomplikowane oprzyrządowanie produkcyjne,
- do wyprodukowania są elementy cienkościenne,
- wykonywane są bardzo małe oraz skomplikowane wyroby,
- wykonywane są elementy o skomplikowanej strukturze wewnętrznej lub elementy puste w środku,
- za pomocą technologii addytywnych możemy wykonać jeden element, zamiast całego zespołu detali,
- dzięki zastosowaniu technologii druku 3D w metalu możemy przeprojektować detal tak, aby zredukować jego masę.

Potencjał zastosowania technologii druku 3D w metalu wzrasta wraz ze wzrostem złożoności części, którą chcemy wytwarzać.

Jednym z najbardziej spektakularnych przykładów wykorzystania druku 3D w metalu jest silnik odrzutowy do samolotów komercyjnych GE9X przeznaczony do nowego odrzutowca Boeing 777X, którego pierwszy lot testowy miał miejsce

25 stycznia 2020 roku. Dzięki zastosowaniu drukowanych elementów możliwe było opracowanie silnika, który jest o 10% bardziej oszczędny niż jego poprzednik GE90.

Przy projekcie i produkcji tego silnika wykorzystano w pełni potencjał, jaki daje technologia druku 3D w metalu, dzięki której realne było zaprojektowanie i wykonanie elementów niemożliwych do wykonania żadną inną technologią. Pozwoliło to na zastąpienie 300 części przez 7 drukowanych komponentów.



Rys. 2. Dysza paliwowa wykonana w technologii druku 3D w metalu (zdj. GE Additive)

Jedną z tych części jest końcówka dyszy paliwowej, która jest stosowana również w innym silniku odrzutowym LEAP-1B. Drukowana dysza paliwowa jest elementem, który wszedł już do seryjnej produkcji, a firma GE Aviation Auburn wyprodukowała już ponad 30 000 drukowanych komponentów. Dzięki zastosowaniu

technologii druku 3D w metalu możliwe było zastąpienie 20 części wytwarzanych w tradycyjny sposób, a następnie spawanych, przez jeden drukowany komponent. Pozwoliło to również na redukcję masy dyszy paliwowej o 25% oraz pięciokrotne zwiększenie jej wytrzymałości.

Dysza paliwowa nie jest jedynym elementem drukowanym z metalu zastosowanym w silniku GE9X. W silniku użyto również drukowane łopatki turbiny niskiego ciśnienia, obudowę czujnika a także wymiennik ciepła.

Kolejnym przykładem przemysłowego zastosowania drukowanych elementów z metalu jest firma Siemens, która zaprojektowała, wytworzyła oraz przeprowadziła testy łopatki turbiny gazowej. Łopátka została wydrukowana przez firmę Material Solutions, a następnie przetestowana w 13-megawattowej przemysłowej turbinie gazowej SGT-400. Dzięki zastosowaniu procesu druku możliwe było skrócenie cyklu opracowywania nowej łopatki o 75% oraz zredukowanie czasu wytworzenia łopatki o 50%. Zastosowanie technologii druku 3D w metalu pozwoliło również na zaprojektowanie unikalnego systemu chłodzenia wewnątrz łopatki.



Rys. 3. Łopátka turbiny gazowej w technologii druku 3D w metalu (zdj. Siemens)

Czy przedstawione przykłady oznaczają, że druk 3D w metalu może być stosowany tylko przez duże korporacje? Oczywiście, że nie. Skoro elementy wykonane w technologii druku 3D z metalu mogą z powodzeniem być stosowane jako elementy silnika lotniczego czy turbiny gazowej, to trudno sobie wyobrazić gałąź przemysłu, której wymaganiom nie mógłby sprostać druk 3D w metalu.

Przytoczone przykłady pokazują, że pełne wykorzystanie potencjału drzemącego w technologii druku 3D z metalu, wymaga zerwania z przyzwyczajeniami odnośnie projektowania. Omawiane detale były projektowane i optymalizowane z myślą o nowej technologii wytwarzania, jaką jest druk 3D z metalu. Kluczem do sukcesu przy zastosowaniu druku 3D z metalu jest zrozumienie przez konstruktorów

nowych możliwości, jakie daje druk przestrzenny z metalu oraz wykorzystanie tej szansy.

Reasumując, jeśli decydujemy się na wytworzenie elementu przy zastosowaniu technologii addytywnych powinniśmy pamiętać o kilku zasadach:

- zrezygnujmy z produkcji części, które w łatwy sposób można wykonać w tradycyjny sposób np. poprzez obróbkę CNC,
- wybierajmy części, dla których możemy poprawić istniejące rozwiązania,
- przeprojektujmy części z myślą o technologii druku 3D, aby w pełni wykorzystać jej potencjał.

Na co zwrócić uwagę przy wyborze drukarki 3D do metalu?

Wprowadzenie

Techniki addytywne nazywane również drukiem 3D przeżywają obecnie dynamiczny rozwój zarówno pod względem możliwości technologicznych jak i ilości instalowanych systemów. W tym poradniku postaram się przybliżyć zagadnienia, na które warto zwrócić uwagę jeżeli chcielibyśmy wdrożyć drukarkę 3D do metalu w naszej organizacji.

Poniżej przedstawimy przykładowy plan działania który pozwoli na wybór systemu do wytwarzania przyrostowego z metalu:

1. Definicja potrzeb produkcyjnych.
2. Ocena gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia wybranej technologii wytwarzania przyrostowego z metalu.
3. Wybór metody druku 3D z metalu.
4. Weryfikacja możliwości wybranej metody.
5. Wybór systemu do wytwarzania przyrostowego.

1. Definicja potrzeb produkcyjnych

Rozważmy uruchomienie w naszej organizacji proces wytwarzania przyrostowe z metalu. Prawidłowe zdefiniowanie naszych potrzeb oraz skonfrontowanie ich z możliwościami technologii będzie najważniejszy etap całego procesu.

W pierwszej kolejności powinniśmy w możliwej jednoznaczny sposób określić nasze wymagania w stosunku do technologii addytywnych. W etapie tym powinniśmy odpowiedzieć na poniższe pytania:

- Jakie mamy wymagania odnośnie jakości wydruków?
Powinniśmy tu określić takie aspekty jak:
 - wymagania odnośnie własności mechanicznych oraz porowatości wydruków,
 - temperatury pracy,
 - odporności na korozję,
 - wymagania odnośnie geometrii wydruków ich rozmiar oraz oczekiwanego odwzorowania szczegółów,
 - wymagania specjalne np. biogodność.
- Do jakich celów chcieli byśmy wykorzystać techniki druku 3D z metalu?
 - czy drukarka będzie wykorzystana do produkcji prototypów, gotowych wyrobów czy może oba te aspekty są dla nas interesujące,
 - jakiej skali produkcji oczekujemy.

Druk 3D w metalu jest potężnym narzędziem, które ma wiele unikalnych zalet. Jednak jego obecne ograniczenia sprawiają, że nie zawsze jest to opcja najlepsza, jeśli chodzi o wytwarzanie metalowych elementów. Poniżej przedstawiono najważniejsze zalety i ograniczenia druku 3D w metalu. Zapoznanie się z nimi pozwoli zrozumieć, na jakim etapie znajdują się techniki wytwarzania przyrostowego z metalu.

ZALETY DRUKU 3D W METALU

Złożoność geometryczna nie generuje dodatkowych kosztów	Porównując druk 3D z tradycyjnymi technikami wytwarzania, jedną z największych zalet wytwarzania przyrostowego jest wyjątkowa elastyczność podczas projektowania elementów. Ponieważ nie potrzebujemy specjalnego oprzyrządowania (na przykład forma lub narzędzie skrawających), geometrie, których wykonanie w tradycyjny sposób jest niemożliwe, można łatwo wydrukować w 3D, a zwiększenie złożoności geometrycznej części niejednokrotnie nie ma wpływu na koszty produkcji.
Wytwarzanie elementów zoptymalizowanych pod względem masy	Duża elastyczność projektowa druku 3D w metalu pozwala na tworzenie lekkich konstrukcji. Stosowanie dobrych praktyk projektowych dotyczących drukowania 3D z metalu zazwyczaj skutkuje uzyskaniem lekkich rozwiązań. Zwykle do tego celu stosuje się zaawansowane techniki CAD, takie jak optymalizacja topologii lub projektowanie generatywne. W rezultacie uzyskuje się części o mniejszej wadze zwykle o 25% do 50% oraz większej sztywności.
Wzrost funkcjonalności części	Ponieważ dostęp dla narzędzi wytwórczych nie stanowi problemu, możliwe jest wytwarzanie przyrostowe części posiadających skomplikowaną strukturę wewnętrzną. Przykładowo chłodzenie konformalne (system kanałów chłodzących o skomplikowanym przebiegu) to świetny sposób na zwiększenie wydajności procesu produkcyjnego. Elementy form wtryskowych z chłodzeniem konformalnym pozwalają zredukować cykl wtrysku nawet o 50%.
Scalanie zespołów w jedną część	Kolejną zaletą druku 3D z metalu jest możliwość zastąpienie zespołu elementów wytwarzanych konwencjonalnie jednym drukowanym elementem. Eliminuje to potrzebę wykorzystania elementów złącznych oraz stosowania dodatkowych technik łączenia np. spawania. Koszty pracy i czas realizacji są zminimalizowane, ograniczony jest również czas konserwacji i serwisu takich elementów. Dodatkową korzyścią zmniejszenia całkowitej liczby części to tworzenie lepszych konstrukcji.
Skrócenie procesu produkcyjnego	Wytworzenie części o złożonej geometrii przy wykorzystaniu tradycyjnych metod produkcyjnych może wymagać wielu etapów produkcyjnych oraz wytworzenia specjalnych narzędzi produkcyjnych. Stosując druk 3D w metalu możemy zredukować lub nawet wyeliminować narzędzia specjalne oraz ograniczyć operacje obróbcze do niezbędnego minimum. W takich przypadkach wytwarzanie addytywne z metalu może pozwolić na znaczne skrócenie czasu produkcji.

OGRANICZENIA DRUKU 3D W METALU

<i>Wyższy koszt w porównaniu do tradycyjnej produkcji</i>	W porównaniu z tradycyjnymi metodami produkcji koszt druku 3D z metalu jest obecnie znaczny. Jest to związane z wysokimi kosztami samych urządzeń (do kilku milionów złotych), materiałów eksploatacyjnych oraz surowców (minimalny koszt kilogram proszku metalowego przeznaczonego do wytwarzania przyrostowego to kilkaset złotych). Należy więc pamiętać, że zastosowanie druku 3D z metalu ma sens ekonomiczny tylko wtedy, gdy wiąże się ze znaczną poprawą wydajności lub pozwala na uzyskanie elementów o cechach niemożliwych do uzyskania innymi metodami produkcyjnymi.
<i>Znikome korzyści ekonomiczne przy zwiększaniu skali produkcji</i>	Kolejnym ograniczeniem druku 3D w metalu jest to, że nie może on jeszcze konkurować z tradycyjną produkcją, jeśli chodzi o predykcję seryjną. Brak niestandardowego oprzyrządowania oznacza, że koszty uruchomienia są niskie, ale także, że wielkość produkcji nie wpływa znacząco na całkowite koszty produkcji. Cena jednostkowa jest prawie niezmienną przy większych ilościach produkowanych elementów i nie można odnieść korzyści skali. Jednak branża pracuje nad rozwiązaniami, które mają usprawnić produkcję.
<i>Specyficzny zestaw zasad projektowania</i>	Projektowanie części do druku 3D z metalu podlega innym regułom niż produkcja „tradycyjna”. Często oznacza to konieczność przeprojektowania istniejących wyrobów. Co więcej, nie wszystkie systemy CAD dostarczają narzędzia pozwalające w pełni wykorzystać zalety druku 3D w metalu.
<i>Dodatkowa obróbka wykończeniowa jest prawie zawsze wymagana</i>	Niemalże każda metalowa część wydrukowana w 3D zanim będzie gotowa do użycia będzie wymagała dodatkowej obróbki. Niezależnie od wybranej technologii, prawie zawsze wymagana jest kombinacja obróbki termicznej, obróbki skrawaniem, polerowania i innych metod wykańczania, aby wyprodukować finalną część. Zwiększa to całkowity koszt i czas dostawy.

Jak pokazano powyżej technologie addytywne pomimo rozlicznych zalet posiadają również pewne ograniczenia, które zawsze należy rozważyć indywidualnie. Firma planująca wykorzystać druk 3D z metalu w dziale badań i rozwoju będzie miała zupełnie inne oczekiwania w stosunku do techniki addytywnej od firmy planującej uruchomić produkcję konkretnego wyrobu. Dlatego tak ważne jest, aby już na samym początku procesu wyboru urządzenia jasno określić nasze wymagania, a następnie porównać je z dzisiejszymi możliwościami technik wytwarzania przyrostowego z metalu. W razie wątpliwości warto jest zasięgnąć opinii eksperta.

2. Ocena gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia wybranej technologii wytwarzania przyrostowego z metalu

Najważniejszym aspektem będzie tu posiadanie kadry o odpowiednich kwalifikacjach oraz wiedzy. Obsługa drukarki wbrew temu co często można usłyszeć jest zajęciem czasochłonnym, oprócz czynności czysto operatorskich takich jak przygotowywanie drukarki, obserwacja procesu wydruku, wyjęcia wydruków oraz przesiewanie proszku. Niezbędne będzie również przygotowanie programów sterujących oraz modelu 3D do druku, czasami może to wymagać wprowadzenia zmian w modelu CAD. Aby w pełni wykorzystać czas produkcyjny koniecznym może okazać się posiadanie więcej niż jednego operatora. Podsumowując do obsługi drukarki 3D będziemy potrzebowali pracownika lub pracowników, którzy będą potrafili:

- przygotować oraz zmodyfikować model 3D w oprogramowaniu CAD,
- przygotować program sterujący drukarką oraz
- obsłużyć urządzenie.

Pomimo tego, że wszyscy producenci sprzętu oferują szkolenia operatorskie, pomocne będzie, jeżeli pracownik miał już wcześniej styczność z systemami CAD oraz posiada przynajmniej podstawową wiedzę z zakresu mechaniki. Dobrze jest także, jeżeli osoba ta posiada również wiedzę z zakresu technologii przyrostowych.

Jeśli chcemy rozpocząć wytwarzanie elementów z zastosowaniem technologii druku 3D z metalu, oprócz samej drukarki będziemy potrzebowali dodatkowych urządzeń do obróbki wykańczającej. Będą to:

- **piła** lub **elektro drążarka drutowa** – do odcinania wydruków od powierzchni stołu roboczego,
- **maszyny do obróbki ubytkowej** (np. frezarka) – do obróbki wykańczającej drukowanych elementów oraz przygotowania płyt, na których powstaje wydruk,
- **piec do obróbki cieplnej** – w zależności od stosowanego materiału może się okazać konieczne posiadanie pieca do obróbki cieplnej w próżni,
- **piaskarka** – do przygotowania płyt, na których powstaje wydruk, oraz poprawy jakości powierzchni wydruków,
- **sita** – do przesiewania proszku po procesie produkcyjnym,
- **wytwornica gazu osłonowego** lub instalacja do jego dystrybucji.

Dodatkowo przygotowanie modeli do druku będzie wymagało posiadania odpowiedniego oprogramowania CAD oraz komputera o odpowiedniej mocy obliczeniowej.

Jak widać wdrożenie technologii druku 3D w metalu może wiązać się z zakupem dodatkowych urządzeń oraz uruchomieniem dodatkowych technik obróbczych. Ewentualne koszty z tym związane należy wziąć pod uwagę już w etapie planowania inwestycji.

Kolejnym bardzo ważnym aspektem jest bezpieczeństwo procesu produkcyjnego. W porównaniu do maszyn do obróbki ubytkowej maszyny do wytwarzania przyrostowego mogą dawać poczucie bezpieczeństwa. Drukarki 3D do metalu są zwykle całkowicie zamknięte i ciche, pozbawione szybko wirujących elementów oraz nie generują wiórów i opiłków. Jednak wytwarzanie przyrostowe – zwłaszcza w przypadku proszków metali – stwarza własne, wyjątkowe ryzyko dla pracowników. Poniżej przedstawiono kilka potencjalnych zagrożeń i kroki, które można podjąć, aby ich uniknąć.

Proszki metali mogą powodować uszkodzenie oczu, płuc i układu oddechowego oraz mogą być rakotwórcze. Pracownicy powinni nosić środki ochrony indywidualnej, takie jak rękawice, maski i gogle, aby zapobiec wdychaniu i bezpośredniemu

kontaktowi z proszkami metali. Dodatkowa drukarka powinna być zainstalowana w oddzielnym pomieszczeniu posiadającym odpowiedni system wentylacji i oczyszczania powietrza.

Wyładowania elektrostatyczne mogą spowodować zapłon mieszanin reaktywnych proszków i tlenu. Z tego powodu reaktywne proszki powinny być przechowywane i przetwarzane w zamkniętych komorach wypełnionych gazem obojętnym. Technicy powinni nosić osobiste antystatyczne opaski uziemiające a maszyny powinny być uziemione, aby ograniczyć ryzyko pojawienia się iskry.

Promieniowanie laserowe może poparzyć skórę i uszkodzić siatkówkę. Dlatego też drukarki 3D stosujące źródło ciepła w postaci lasera są wyposażone w okna i drzwi, które blokują promieniowanie. Pracownicy mogą dodatkowo nosić gogle dla dodatkowej ochrony.

Dymy spawalnicze powstające podczas procesu topienia laserowego są wysoce reaktywne, nawet jeśli w procesie druku wykorzystywane jest nie reaktywny materiał, a powstająca sadza może ulec samoczynnemu zapłonowi. Aby uniknąć gromadzenia się sadzy, zalecane jest czyszczenie komory po każdym wydruku.

Oczywiście możliwe jest bezpieczne prowadzenie procesu wytwarzania przyrostowego z metalu wymaga to jednak podjęcia odpowiednich kroków. Zakupu odpowiedniego wyposażenia ochronnego oraz opracowanie procedur bezpieczeństwa. Potencjalne zagrożenia warto włączyć pod uwagę już w fazie wyboru systemu do druku 3D z metalu.

3. Wybór metody druku 3D z metalu

Na rynku dostępnych jest obecnie kilka technik druku, które posiadają specyficzny dla siebie zestaw zalet i ograniczeń. W wyborze właściwej technologii pomogą nam wymagania opracowane w pierwszej części tego opracowania. To na ich podstawie oraz w oparciu o posiadany budżet powinniśmy dokonać wyboru metody druku 3D z metalu. Poniżej w skrócony sposób opisano metody druku 3D z metalu, bardziej szczegółowy opis każdej z metod można znaleźć w nawigatorze druku 3D.

- **Laser Powder Bed Fusion (LPBF)** – to najlepsze rozwiązanie dla części o dużej złożoności geometrycznej. Produkcja elementów o strukturze organicznej

oraz struktur po optymalizacji topologicznej. Produkcja elementy które wymagają doskonałych właściwości materiału oraz wysokiego odwzorowania szczegółów.

- **Electron Beam Melting (EBM)** – Podobnie ja technologia LPBF oferuje wydruki o bardzo wysokich właściwości materiałowych. W porównaniu do technologii laserowej oferuje wyższą wydajność kosztem dokładności wydruków.
- **Directed Energy Deposition (DED)** – jest idealnym rozwiązaniem, jeżeli chcemy produkować elementy o dużych rozmiarach lub gdy zależy nam na dodrukowywaniu dodatkowych szczegółów do już istniejących części. Pozwala na produkcję elementów o bardzo wysokich własnościach materiałowych.
- **Binder Jetting (BJ)** – jest najlepszym rozwiązaniem do produkcji małych i średnich partii, które nie mogą uzasadniać dużych inwestycji ekonomicznych w metodę formowania oraz w przypadku części o geometriach, których nie można wydajnie wytworzyć metodami ubytkowymi. Kosztem za wysoką wydajność procesu jest pogorszenie własności wytrzymałościowych elementów.
- **Metal Extrusion (ME)** – to najlepsze rozwiązanie dla metalowych prototypów i jednorazowych części o geometrii, które w innym przypadku wymagałyby do produkcji 5-osiowej maszyny CNC. Metoda ta wymaga długiego procesu wykańczającego oraz oferuje wydruki o niższych własnościach mechanicznych.

4. Weryfikacja możliwości wybranej metody

Niezwykle ważne jest, aby zweryfikować nasze oczekiwania z rzeczywistymi możliwościami wybranej techniki wytwarzania przyrostowego z metalu. Najlepszą metodą będzie tu zamówienie wydruki interesującej nas części u dostawcy drukarek 3D. Koszt wydruku testowego jest nieznaczny w porównaniu do kosztu całego systemu a może nas uchronić przed złym wyborem. W etapie tym powinniśmy ocenić jakość otrzymanego wydruku za równo pod kątem zgodności geometrycznej jak i jakości materiału. Powinniśmy również zadbać o informacje na temat samego procesu wydruku, a więc czasu wydruku, ilości zużytego materiału, czasu obróbki wykańczającej. Pozwoli to nam w pełni ocenić zarówno sam wydruk jaki i wydajność oraz koszty procesu. Dla właściwej oceny możliwości wybranej metody druku 3D z metalu koniecznym może okazać się zamówienie wydruków testowych od więcej niż jednego dostawcy technologii.

5. Wybór systemu do wytwarzania przyrostowego

Na tym etapie mamy już dokładnie opracowane wymagania stawiane technologii, które zweryfikowaliśmy w testach produkcyjnych. Wiemy również jakie zmiany należy wprowadzić w naszej organizacji, aby rozpocząć proces produkcji addytywnej. Wybór systemu do wytwarzania przyrostowego może wydawać się czystą formalnością. Ważne jest, aby na tym etapie oprócz ceny samego systemu wziąć pod uwagę kilka dodatkowych wymagań:

- długość okresu gwarancji,
- ilość przeglądów serwisowych w trakcie gwarancji,
- koszty serwisowania maszyn po okresie gwarancyjnym,
- koszt naprawy oraz czas reakcji serwisu,
- koszty materiałów eksploatacyjnych oraz części zamiennych,
- koszty surowców,
- możliwość edycji oraz optymalizacji parametrów produkcyjnych.

Proces wyboru odpowiedniej metody oraz drukarki 3D z metalu zwłaszcza dla osób posiadających jedynie podstawową wiedzę z dziedziny wytwarzania przyrostowego w metalu może wydawać się skomplikowany. Dlatego na samym wstępie warto poszerzyć swoją wiedzę w tym zakresie, pomocny może się tu okazać przewodnik po druku 3D, przygotowywany przez Platformę Przemysłu Przyszłości.

Proszki metaliczne stosowane w procesach wytwarzania przyrostowego

Wprowadzenie

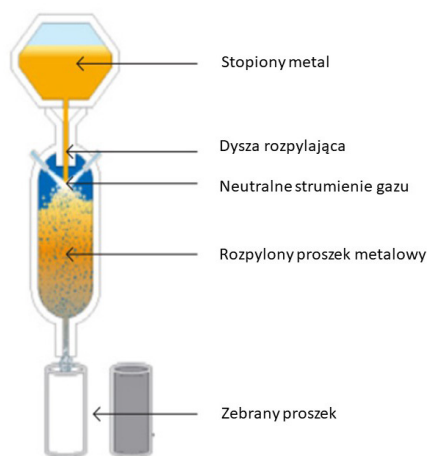
Proszki metaliczne stanowią grupę najczęściej stosowanym materiałem w procesach wytwarzania przyrostowego z metalu. Jakość zastosowanego materiału będzie miała wpływ na:

- własności mechaniczne wydruku,
- powtarzalność pomiędzy kolejnymi wydrukami,
- ilość defektów.

Proszki metali do wytwarzania przyrostowego są zwykle wytwarzane w procesie rozpylania gazowego. W procesie tym strumień stopionego metalu jest rozpylany przez strumień gazu obojętnego (argonu lub azotu) na małe kropelki metalu. Które następnie schładzają się i krzepną spadając na dno wierzy rozpylającej. Następnie, proszki są zbierane do pojemników.

Rozpylanie gazu jest najpowszechniejszym procesem wytwarzania proszków dla technologii przyrostowych z metalu, ponieważ zapewnia:

- kulisty kształt proszku,
- wysoką gęstość proszku,
- powtarzalność rozkładu wielkości cząstek,
- w procesie rozpylania gazowego można stosować bardzo szeroką gamę stopów.



Charakterystyka proszków metali do wytwarzania przyrostowego

Główne cechy proszku metalicznego do wytwarzania przyrostowego można podzielić na cztery główne kategorie:

- skład chemiczny,
- rozkład wielkości proszku (ang. *Powder size distribution PSD*),
- kształt cząstek proszku.

Skład chemiczny

Skład chemiczny jest podstawowym parametrem proszku, ponieważ określa on gatunek materiału oraz wpływa na własności mechaniczne oraz fizyczne. Większość proszków metalicznych stosowanych w procesach wytwarzania przyrostowego z metalu posiada skład odpowiadający standardowym odlewanym lub kutym stopom metali.

Bardzo ważne jest aby dokładnie kontrolować zawartość nie tylko podstawowych składników stopowych, ale również zawartość pierwiastków śladowych i zanieczyszczeń (np. S, O, N itp.). Ponieważ również mogą mieć znaczący wpływ na właściwości, takie jak wrażliwość na pęknięcia oraz udarność.

W procesie rozpylania gazowego wszystkie cząstki proszku mają skład chemiczny odpowiedni dla danego stopu, natomiast drobniejsze cząsteczki mają zwykle wyższą zawartość tlenu ze względu na większą powierzchnię właściwą.

Skład chemiczny wpłynie w szczególności na:

- temperatura topnienia,
- właściwości mechaniczne,
- spawalność,
- właściwości termiczne (przewodność cieplna, pojemność cieplna itp.).

Skład chemiczny proszku może również ulec nieznacznej zmianie po wielokrotnym zastosowaniu w maszynach do wytwarzania przyrostowego.

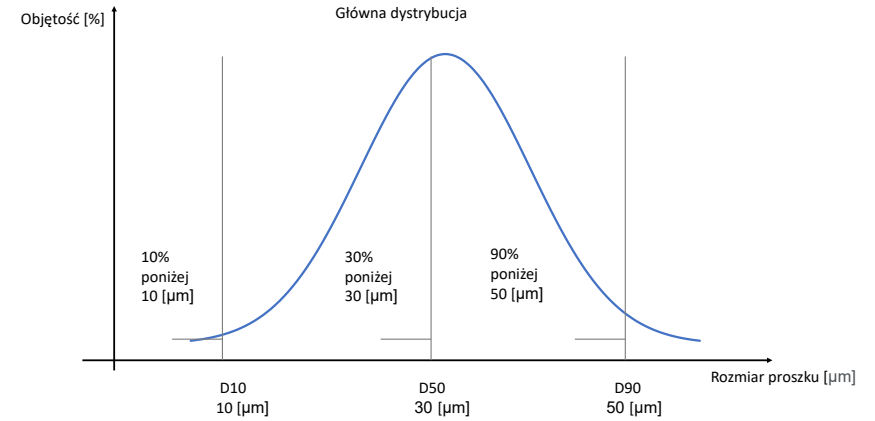
Rozkład wielkości proszku (ang. *Powder Size Distribution, PSD*)

W zależności od technologii wytwarzania przyrostowego oraz stosowanych urządzeń stosuje się proszku o różnej wielkości cząstek:

- Binder Jetting (BJ): 0–31 μm ,
- Laser Powder Bed Fusion (LPBF): 15–45 μm lub 22–53 μm ,
- Electron Beam Melting (EBM): 44–105 μm ,
- Directed Energy Deposition (DED): 44–150 μm lub 44–180 μm .

Rozkład wielkości cząstek (PSD) jest wskaźnikiem określającym jaki procent próbki proszku stanowią cząstki o określonej wielkości. Rozkład frakcji wskazuje w procentach ilości cząstek występujących w odpowiednich przedziałach wielkości cząstek, podczas gdy skumulowany rozkład wyraża procent ilości cząstek o określonej lub mniejszej wielkości. Często stosowanym podejściem do określenia rozkładu wielkości proszku jest odniesienie się do trzech wartości procentowej zawartości proszku:

- D10 – wielkość cząstek, dla której 10% populacji znajduje się poniżej wartości D10,
- D50 – wielkość cząstek, dla której 50% populacji znajduje się poniżej wartości D50,
- D90 – wielkość cząstek, dla której 90% populacji znajduje się poniżej wartości D90.



Przykład krzywej PSD dla proszku 10–50 μm

Rozkład wielkości cząstek ma wpływ na takie parametry jak:

- sypkosć proszku oraz jego równomierne rozprzodzenie,
- gęstość złoża proszku,
- energię potrzebną do stopienia ziaren proszku,
- chropowatość powierzchni.

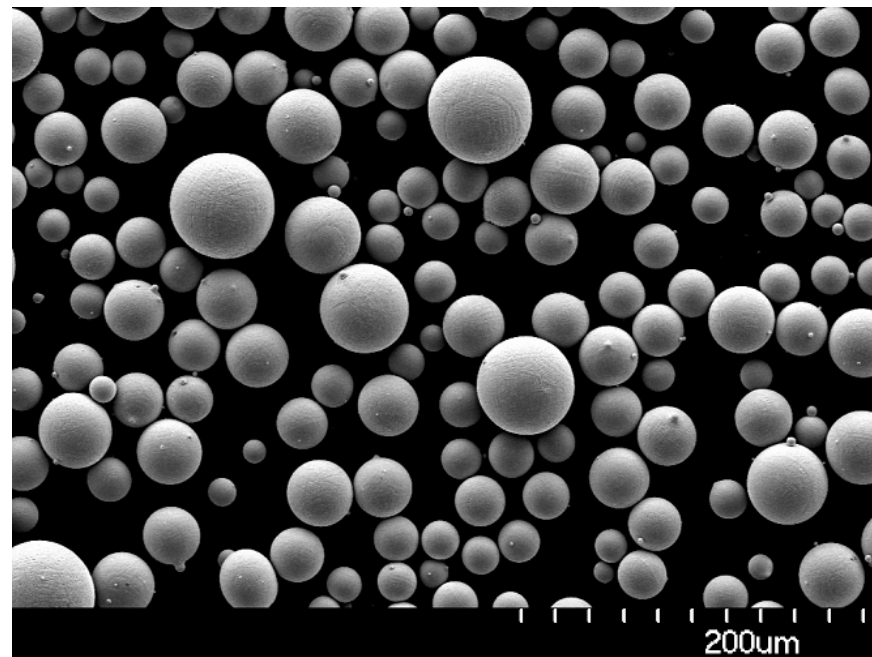
Kształt cząstek proszku

Dla technik wytwarzania przyrostowego z metalu zalecany kształt cząstek proszku jest kształt kulisty. Zapewnia on dobrą sypkość proszku, co pozwala uzyskać równomierny strumień proszku w technologiach DED. Kształt ten pozwala również na nakładanie jednolitych warstw proszku w procesach prowadzonych w złożu proszkowym.

Morfologię proszku można obserwować za pomocą SEM (ang. *Scanning Electron Microscope*). Typowe wady proszku, które należy kontrolować oraz minimalizować to:

- nieregularne kształty proszku, np. wydłużone cząstki,
- satelity, które są małymi ziarnkami proszku przyklejonymi do powierzchni większych ziaren,
- cząstki proszku o otwartej lub zamkniętej porowatości.

Wysoka porowatość proszku może mieć negatywny wpływ na właściwości materiału.



Przykład sferycznego proszku Ni Alloy 625 15–45 μm

Źródło: <https://www.advancedpowders.com/powders/nickel/625>

Tabela: Proszki metaliczne stosowane w procesach wytwarzania przyrostowego

Stal	Stal nierdzewna 316L (1.4404)	Stal nierdzewna 316L może być wykorzystywana do produkcji części odpornych na korozję oraz działanie kwasów. Przykładowe dziedziny zastosowania: instalacje chemiczne, przemysł motoryzacyjny, medycyna, biżuteria oraz komponenty do form.
	Stal nierdzewna 15-5PH	Martensytyczna stal nierdzewna, utwardzana wydzieleniowo może być zastosowana w aplikacjach wymagających wysokiej wytrzymałości i twardości w połączeniu z umiarkowaną odpornością na korozję. Znajduje zastosowanie w lotnictwie, medycynie, przemyśle chemicznym oraz metalowym.
	Stal nierdzewna 17-4PH	Stal nierdzewna charakteryzująca się bardzo wysoką odpornością na korozję w połączeniu z wysoką wytrzymałością. Może być wykorzystana do produkcji elementów funkcjonalnych, elementów instalacji chemicznych lub medycznych instrumentów.
	Stal narzędziowa M300 (1.2709)	Stal narzędziowa typu maraging, która może być używana do wytwarzania elementów narzędzi z chłodzeniem konformalnym stosowanych w formach wtryskowych, a także do odlewania ciśnieniowego oraz elementów funkcjonalnych. Po obróbce cieplnej możliwe jest uzyskanie wysokiej wytrzymałości ponad 2000 MPa oraz twardości około 55 HRC. Zachowuje dobre własności mechaniczne do 400°C.
	Stal narzędziowa H13 (1.2344)	Martensytyczna stal narzędziowa zawierająca chrom. Materiał ten jest używany w zastosowaniach narzędziowych, które wymagają wysokiej wytrzymałości oraz udarności. Stal ta oferuje umiarkowaną odporność na korozję oraz dobrą odporność na zmęczenie termiczne. Typowe obszary zastosowań to formy wtryskowe oraz narzędzia.
Stopy niklu	Inconel 625	Charakteryzuje się wysoką wytrzymałością na rozciąganie oraz pełzanie, posiada on również bardzo dobrą odporność cieplną i korozyjną. Może być zastosowany w przemyśle motoryzacyjnym, lotnictwie, do produkcji turbin gazowych oraz w przemyśle energetycznym.
	Inconel 718	Wykazuje znakomitą odporność termiczną do 700°C, doskonale sprawdza się do zastosowań, w których występują skrajne temperatury, takich jak turbiny czy instalacje kriogeniczne. Sprawdza się również w lotnictwie, przemyśle energetycznym oraz motoryzacji.
	Stop niklu HX	Posiada wysoką wytrzymałością na rozciąganie oraz odporność na utlenianie, może być stosowany do produkcji części, których temperatura pracy sięga 1200°C. Doskonale sprawdza się w produkcji turbin gazowych, lotnictwie oraz przemyśle energetycznym
Stopy tytanu	Ti6Al4V Grade 5	Główną zaletą tego stopu jest połączenie doskonałych właściwości mechanicznych z bardzo niską masą własną. Posiada on również bardzo dobrą odporność na korozję. Znajduje zastosowanie np. w lotnictwie czy motoryzacji. Wykorzystania obejmują prototypy, części finalne oraz elementy wymagające połączenia niskiej masy z wysokimi własnościami mechanicznymi.
	Ti6Al4V Grade 23	Stop charakteryzujący się doskonałymi właściwościami mechanicznymi, niską masą, odpornością na korozję oraz biokompatybilnością. Dzięki spełnieniu wymogów dla gatunku może być zastosowany do produkcji komponentów medycznych oraz implantów.
	TiCP Grade 2	Komercyjnie czysty tytan charakteryzuje się wysoką odpornością na korozję, ciągliwością oraz dobrym stosunkiem wytrzymałości do masy. Może być zastosowany w przemyśle, gdy wymagana jest niska waga eluentów w połączeniu z ich wysoką wytrzymałością.
Stopy aluminium	AlSi ₁₀ Mg	Stop na bazie aluminium, który jest szeroko stosowany do produkcji części funkcjonalnych oraz prototypów, które wymagają dobrych właściwości mechanicznych w połączeniu z niską wagą. Dodatkowo stop ten oferuje bardzo dobrą odporność na korozję oraz dobrą przewodność cieplną oraz elektryczną. Jest często stosowany w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym oraz do produkcji wymienników ciepła.
	AlSi ₇ Mg _{0,6}	Stop na bazie aluminium, który jest często wykorzystywany do produkcji elementów wymagających doskonałej przewodności cieplnej, dobrej odporności na korozję. Jest często stosowany w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, do produkcji wymienników ciepła oraz produkcji prototypów.

Tabela: Proszki metaliczne stosowane w procesach wytwarzania przyrostowego (cd.)

Stopy kobalt-chrom	$\text{CoCr}_{28}\text{Mo}_6$	Stop kobaltu, chromu i molibdenu o wszechstronnych zastosowaniach. Ze względu na wyjątkową biokompatybilność jest stosowany w przemyśle medycznym do produkcji implantów i protez. Materiał jest również używany do produkcji komponentów mających zastosowanie w środowisku o wysokiej temperaturze, takich jak silniki odrzutowe.
Stopy miedzi	CuCP	Komercyjnie czysta miedź zapewnia doskonałą przewodność cieplną i elektryczną co sprawia że jest idealna do produkcji cewek indukcyjnych, silników elektrycznych czy wymienników ciepła. Wytwarzanie wydruków z czystej miedzi w technologiach wykorzystujących laser podczerwone (większość urządzeń dostępnych na rynku) jest problematyczne ze względu na duży współczynnik odpicia.
	$\text{CoCr}_{28}\text{Mo}_6$	Niskostopowy stop miedzi, jest stopem utwardzalnym termicznie o dużej sztywności nawet w podwyższonych temperaturach. Niska zawartość dodatków stopowych pozwala na znaczną poprawę wytrzymałości w porównaniu do czystej miedzi, przy czym inne właściwości (takie, jak przewodnictwo elektryczne, przewodnictwo cieplne, odporność na korozję) pozostają zbliżone do czystej miedzi. Typowe obszary zastosowań to: produkcja narzędzi, styki przewodzące w elektrotechnice oraz zawory.
	CoSn_{10}	Brąz CuSn_{10} jest stopem miedzi i cyny o wysokim wydłużeniu i średniej twardości. Brąz charakteryzuje się dobrymi właściwościami ściernymi oraz odpornością na korozję atmosferyczną oraz korozję w wodzie morskiej. Typowe zastosowania obejmują komponenty i obudowy urządzeń pracujących w środowisku morskim oraz wymienniki ciepła.

Niniejsze opracowanie ma jedynie charakter informacyjny i nie może stanowić podstawy do jakichkolwiek roszczeń związanych z decyzjami gospodarczymi podejmowanymi w związku z powyższymi treściami. Autor ani Fundacja Platforma Przemysłu Przyszłości nie ponosi odpowiedzialności za konsekwencje decyzji biznesowych podejmowanych przez podmioty korzystające z opracowania, a wszelkie ryzyko związane z takimi decyzjami ponosi podmiot je podejmujący.