



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
Im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

mgr inż. Piotr Bąk

PRACA DOKTORSKA

Badania porównawcze własności stali 1.2709 z gatunku maraging uzyskanej w technologii przyrostowej DMLS z uwzględnieniem wpływu parametrów procesu AM i degradacji złoza w odniesieniu do właściwości rodzimych tejże stali

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik

Promotor pomocniczy:

dr inż. Małgorzata Zaborniak

Wrzesień 2022

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WPROWADZENIE.....	8
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA.....	13
3. TEZA, CEL, ZAKRES PRACY	31
3.1. Teza pracy.....	31
3.2. Cel pracy	31
3.2. Zakres pracy	32
4. OBIEKT BADAWCZY I METODYKA BADAŃ	33
4.1. Obiekty badawcze	33
4.2. Metodyka badawcza	43
4.2.1. Analiza procesu przyrostowego SLM	43
• Badania porowatości	43
• Badania wytrzymałości w próbie statycznego rozciągania	48
• Badania zmęczeniowe	49
• Badania trybologiczne	50
4.2.2. Metodyka badań próbek dla procesu DMLS	55
• Procedura I: badanie morfologii złoża proszkowego	57
• Procedura II, badanie zmęczeniowe próbek obciążonych cyklicznie zmiennym obciążeniem ciśnieniowym	59
• Procedura III, badanie zmęczeniowe próbek obciążonych cyklicznym obrotowym momentem zginającym	64
5. REALIZACJA BADAŃ I WYNIKI BADAŃ	67
5.1. Wyniki badań z analizy procesy przyrostowego SLM	67
5.1.1. Badania porowatości	67
5.1.2. Badania wytrzymałości	77
5.1.3. Badania zmęczeniowe	79
5.1.4. Badania trybologiczne	80
5.1.5. Badania twardości.....	82
5.2. Wyniki badań próbek dla procesu DMLS	83
5.2.1. Badanie morfologii złoża proszkowego	83
5.2.2. Badanie porowatości próbek otrzymanych ze złoż Z1, Z2, Z3, Z4	88

5.2.3. Badanie próbek otrzymanych ze złóż Z1, Z2, Z3, Z4, obciążonych cyklicznie zmiennym obciążeniem ciśnieniowym.....	92
5.2.4. Badanie próbek otrzymanych ze złóż Z1, Z2, Z3, Z4, obciążonych cyklicznie zmiennym momentem obrotowym	97
6. Podsumowanie i wnioski	101
6.1. Wnioski z badań z analizy procesy przyrostowego SLM	102
• Badania porowatości	102
• Badania wytrzymałości w statycznej próbie rozciągania	103
• Badania zmęczeniowe	104
• Badania trybologiczne	104
• Badania twardości	104
6.2. Wnioski z badań z analizy procesy przyrostowego DMLS.....	105
• Badania morfologii złóż proszkowych Z1, Z2, Z3, Z4.....	105
• Badania porowatości próbek uzyskanych ze złóż Z1, Z2, Z3, Z4	105
• Badanie próbek otrzymanych ze złoża Z1, Z2, Z3, Z4, obciążonych cyklicznie zmiennym obciążeniem ciśnieniowym	106
• Badanie próbek otrzymanych ze złoża Z1, Z2, Z3, Z4, obciążonych cyklicznie zmiennym momentem obrotowym	107
6.3. Założenia metodyki wytwarzania korpusu serwozaworu.....	107
Literatura.....	110

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

3D	Three Dimensional (trójwymiarowy)
3D-CAD	Three Dimensional– Computer Aided Design (Komputerowe wspomaganie projektowania w trzech wymiarach)
A	względne wydłużenie próbki przy zerwaniu
A, B, P, T	Oznaczenie portów serwozaworu
AM	Additive Manufacturing (wytwarzanie przyrostowe)
DMD	Direct Metal Deposition (bezpośrednie osadzanie metali)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (bezpośrednie spiekanie laserowe metali)
DPM	Digital Part Materialization (materializacja obiektów cyfrowych)
EBM	Electron Beam Melting (stapianie wiązką elektronów)
FBW	Fligh By Wire (elektroniczny system sterowania statkiem powietrznym)
FDM	Fused Deposition Modeling (wytaczanie materia u)
FFF	Fused Filament Fabrication (wytaczanie materia u)
HPU	Hydraulic Pressue Unit (ciśnieniowe stanowisko hydrauliczne)
HRC	Hardness Rockwell scale C (twardość w stopniach rockvella dla skali C)
HV	HardnessVickers (twardość vickersa)
Hz	Herc jednostka miary częstotliwości
IFF	Ion Fusion Formation (formowanie poprzez stapianie przy użyciu plazmy)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania)
LC	Laser Consolidation (przyrostowa konsolidacja metali przy użyciu lasera)
LENS	Laser Engineered Net Shaping (kształtowanie laserowe)
LMD	Laser Metal Deposition (laserowe osadzanie metalu)

LPF	Laser Powder Forming formowanie poprzez bezpośrednie stapianie proszków przy użyciu lasera
MEM	Melted and Extruded Manufacturing (topienie i wytłaczanie materiału)
MEX	Material Extrusion (wytłaczanie materiału)
MPa	Mega Pascal jednostka naprężenia, ciśnienia
MS1	Nazwa własna proszku stali 1.2709
N	Liczba cykli w badaniach zmęczeniowych
NG6	Standard oznaczania specyfikacji portów serwoworów
PBF	Powder Bed Fusion (złóże proszkowe)
R _{0,2}	Umowna granica plastyczności
Ra	Średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej chropowatości
Rm	wytrzymałość doraźna na rozciąganie
S	Naprężenia średnie
S ₀	Naprężenie przy małej liczbie cykli
S _{inf}	Naprężenie przy nieskończonej liczbie cykli
SLM	Selective Laser Melting (selektywne stapianie laserowe)
STL	Stereolithography Language (stereolitograficzny format plików)
TKF	Thermal Kinetic Fusion (technologia przyrostowa)
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing (ultradźwiękowe spajanie metalu)
W	Jednostka Mocy
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining (drutowa obróbka elektroerozyjna)
Z	Względne przewężenie próbki przy zerwaniu
ΔP	spadek wartości ciśnienia
f	częstotliwość

kN	jednostka siły - kiloniuton
l/min	jednostka przepływu oleju w litrach na minutę
μm	mikrometr
m/s	metrów na sekundę
min	minuta
mld	miliard
nm	nanometr
obr	obrót
s	sekunda

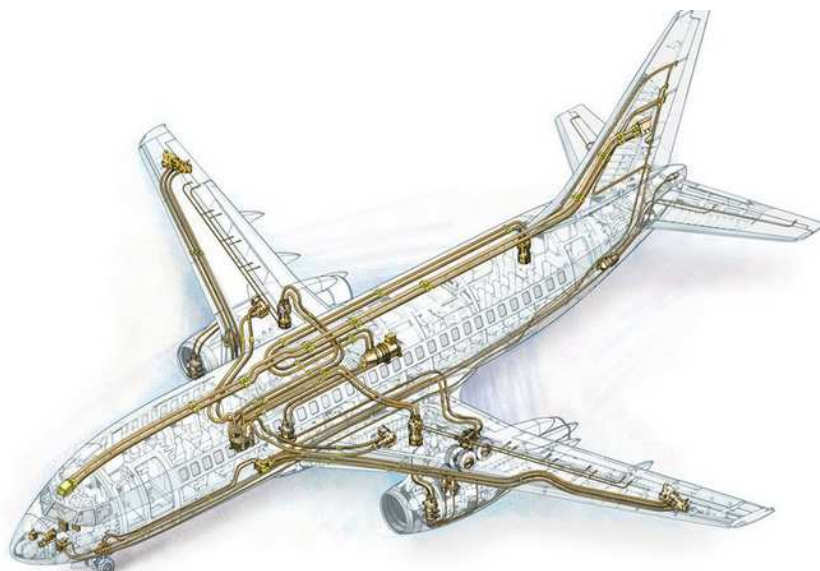
1. WPROWADZENIE

Technologie przyrostowego wytwarzania wyrobów ze względu na swoją uniwersalność i potencjał mają zastosowanie w coraz większej liczbie dziedzin nauki i przemysłu. W pierwszych latach rozwoju druku 3D był głównie wykorzystywany w badaniach naukowych. W kolejnych latach rozwoju wkroczył do przemysłu przeważnie jako narzędzie do wytwarzania prototypów wizualnych i technologicznych. Obecnie metody addytywne pozwalają na wytwarzanie produktów dla wielu gałęzi przemysłu oraz są szeroko stosowane przez indywidualnych użytkowników [8, 9, 28, 29].

W ostatnich latach można zauważyć dynamiczny rozwój technologii przyrostowych w obszarze wytwarzania pełnowartościowych wyrobów z proszków stopów metali, które mają swoje zastosowanie w przemyśle lotniczym samochodowym energetycznym czy obronnym [6, 9, 18, 29, 124,]. Druk 3D umożliwia produkowanie wyrobów o znacznie niższej masie w odniesieniu do technologii konwencjonalnych przy zachowaniu pełnej funkcjonalności i wytrzymałości. Ma to szczególne znaczenie dla przemysłu lotniczego czy kosmicznego. Zmniejszenie masy jest uzyskiwane nie tylko przez stosowanie technologii addytywnej ale poprzez połączenie jej możliwości wytwarzania obiektów o złożonych kształtach z nowoczesnymi metodami projektowania opartymi m.in. o modelowanie oparte na optymalizacji topologicznej [6, 8, 12, 13, 18, 23]. Dzięki temu możliwe jest projektowanie i wytwarzanie elementów nośnych stosowanych w lotnictwie czy elementów układów hydrauliki siłowej stosowanych w systemach sterowania samolotem [1, 2, 123,]. Wytwarzanie przyrostowe elementów hydrauliki siłowej daje szczególne możliwości zmniejszenia masy statków powietrznych. Należy w tym przypadku brać pod uwagę wiele czynników związanych z projektowaniem, wytrzymałością konstrukcji oraz właściwościami materiałów, na co w przypadku technologii przyrostowych istotnie mogą wpływać parametry technologiczne procesu spajania proszku oraz jakość proszku znajdującego się w złożu drukarki 3D pracującej w oparciu o proces PBF (Powder Bed Fusion) czyli spajania warstwowego materiału w postaci proszku skoncentrowaną wiązką energii [19, 20, 22].

Rozpoczynając prace projektowania elementów wykonawczych systemów sterowania przeznaczonych do wytwarzania w procesie druku 3D należy wyjść od podstaw samej hydrauliki, która jest nauką zajmującą się przepływem cieczy w określonych warunkach. Rozwój tej nauki na przestrzeni dziejów ściśle był związany z praktycznym zastosowaniem przepływu medium jakim najczęściej była woda. W kolejnych wiekach dzięki wybitnym odkrywcom nauka ta zyskała podłoże na gruncie analizy matematycznej. Równania Bernoulliego pozwoliły sformułować założenia do analiz przepływu cieczy i gazów dla różnych stanów przepływu. Wszelkie założenia konstrukcyjne i analityczne wpływające na ciecz w ruchu i mające przynieść zamierzone skutki opierają się na kształtowaniu drogi przepływu [4, 10, 19, 22, 26].

Jednym z obszarów poruszanych w niniejszej pracy w ramach prowadzonych badań jest właśnie hydraulika odnosząca się do warunków pracy obiektu badawczego jakim jest rozdzielacz serwomechanizmu [10]. Jest to obszar hydrauliki siłowej wykorzystywanej do szeroko pojętego oddziaływania na obiekty konstrukcji mechanicznej, której elementy wykonują pewną pracę pod wpływem oddziaływania zespołów hydraulicznych takich jak pompy zawory, serwozawory, siłowniki, silniki hydrauliczne [42, 43, 46, 61, 106]. Generalnie charakter konstrukcji też ma znaczenie i jeśli spojrzeć ogólnie, to konstrukcje wykorzystujące elementy hydrauliki siłowej stanowią liczną rodzinę. Zatem mamy maszyny budowlane, leśne, maszyny przemysłowe, urządzenia badawcze, układy wspomagające i wykonawcze na okrętach i w statkach powietrznych czy wozach bojowych. Wszędzie tam gdzie istnieje potrzeba uzyskania dużych sił, momentów, przyspieszeń z powodzeniem znajduje zastosowanie hydraulika siłowa [8, 20, 46, 61, 73, 80]. Elementy układu hydrauliki siłowej zasadniczo składają się z zamkniętego zbioru komponentów. Ciecz robocza, najczęściej olej hydrauliczny o odpowiedniej specyfikacji, przechowywana jest w zbiornikach. Aby ciecz robocza posiadała odpowiednią energię potrzebne są pompy hydrauliczne. Do transportu medium wykorzystuje się przewody sztywne i elastyczne. Wielkość przepływu oleju regulują zawory, zawory dławiące, serwozawory, zawory przelewowe itp. Moc przekazywana jest do odbiorników jakimi najczęściej są siłowniki i silniki hydrauliczne [43, 46]. Przekształcają one energię cieczy na ruch liniowy (siłowniki) i obrotowy (silniki hydrauliczne). Istnieją jeszcze komponenty dodatkowe jak filtry oleju, chłodnice oleju, układy odpowietrzające. Przykładowy schemat układu hydraulicznego samolotu przedstawia rysunek (rys.1.1) [7]. Analizując udział elementów hydrauliki siłowej w konstrukcji statku powietrznego można stwierdzić, że stanowi on duży potencjał w kierunku zmniejszenia masy elementów wykonawczych z wykorzystaniem technologii przyrostowych.



Rys.1.1. Szkic poglądowy przebiegu instalacji hydraulicznej w 737-800 [7]

Z uwagi na ilość komponentów w jednostkowym układzie hydraulicznym, poziom zaawansowania technologicznego przy ich wytwarzaniu oraz skomplikowany proces serwisowy, nasuwa się pytanie czy to jedyna dostępna technologia? W dobie rozwoju elektrycznych urządzeń istnieją kompaktowe elementy typu siłowniki elektryczne serwonapędy elektryczne silniki na magnesy stałe itp. [96, 98, 107], mogą zastąpić hydrauliczne układy sterowania. Tu jednak rodzi się kolejne pytanie o zasadność rozwoju technologii już mocno „dojrzałej” jaką jest hydraulika siłowa gdy w perspektywie pojawia się technika oparta o napęd elektryczny. Pytanie jest tym zasadne, że w przypadku samego sterowania elektrycznymi elementami mamy ogromną swobodę w oddziaływaniu. W przypadku hydrauliki siłowej sterowanie odbywa się poprzez serwozawory. Serwozawory, które najczęściej wykorzystują sygnały elektryczne do oddziaływania na elementy rozdzielające moc zgromadzoną w czynniku roboczym jakim jest olej hydrauliczny. Konstrukcje wykorzystujące napęd elektryczny mają swoje zalety. Są mniej skomplikowane pod kątem samej konstrukcji napędu ponieważ zazwyczaj jest to pewna forma maszyny elektrycznej. Jednak niewątpliwie mają też i swoje wady, chociażby stosunek uzyskiwanej mocy do masy. W przypadku układów hydrauliki siłowej mamy istotną różnicę, potrzebną moc możemy przygotować w miejscu do tego odpowiednim, nie jak to ma miejsce w siłownikach elektrycznych w samym elemencie, gdzie potrzebne będą odpowiednio duże gabarytowo zespoły siłowe jak na przykład zespół cewki i rdzenia. Dla przykładu elektro-siłowniki osiągają siły rzędu 5000N natomiast siłowniki hydrauliczne o podobnych rozmiarach i wadze uzyskują siły na poziomie 38 000N. W tym momencie docieramy do miejsca gdzie rodzi się kolejne pytanie czy rozmiar, waga mają istotne znaczenie. Na to pytanie odpowiedź brzmi: zależy od miejsca gdzie zamierzamy użyć dane rozwiązanie. W układach ciężkich maszyn masa nie jest czynnikiem najistotniejszym. W układach hydrauliki siłowej stosowanej w pojazdach, lekkich robotach, samolotach masa, rozmiary mają znaczenie [10, 32, 97, 103, 127, 128]. Istnieje zatem potencjał do stosowania rozwiązań hydraulicznych.

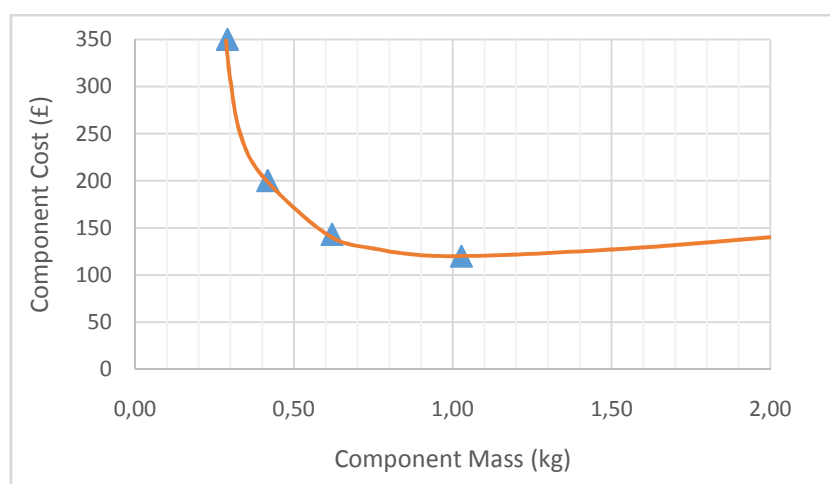
Dokonując analizy technicznej rozwiązań i technologii które wpływają na zmniejszenie masy elementów hydrauliki siłowej można zauważyć wzrost zainteresowania technologiami addytywnymi. Obecnie wiele ośrodków pracuje nad różnego rodzaju adaptacjami technologii PBF (Powder Bed Fusion) jak SLM (Selective Laser Melting) czy DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Są to technologie selektywnego spiekania, przetopu proszków metali według określonego modelu 3D - CAD komponentu w celu uzyskania pełno wartościowej struktury wyrobu. Spiekanie laserowe proszków metali umożliwiło zastosowanie tej technologii do wytwarzania wytrzymałych części o skomplikowanej geometrii, wyróżniających się niespotykanym dotąd współczynnikiem wytrzymałości w przeliczeniu na gram zużytego materiału. Lotnictwo wydaje się być idealną gałęzią przemysłu do zastosowań części wytwarzanych za pomocą technik przyrostowych (AM – Additive Manufacturing). Rysunek 1.2 przedstawia tytanowy wspornik zbudowany w technice AM, wykorzystywany w budowie samolotów firmy Airbus [24].



Rys. 1.2. Wspornik zawiasu Airbus A320 wykonany metodą przyrostową na tle wspornika klasycznego [24]

Elementy prostych konstrukcji wykonanych metodami AM mogą szybciej znaleźć swoje miejsce w budowie samolotów niż bardziej skomplikowane komponenty hydrauliki siłowej wytwarzane klasycznie. Dzięki ciągłemu doskonaleniu technologii SLM, DMLS, badaniu uzyskanych konstrukcji, rozwój systemów AM pozwala wydatnie podnieść czynnik ekonomiczny i jakościowy. Przykładem mogą być systemy przyrostowe drukujące 3D wieloma wiązkami lasera. Wszystko wskazuje na to, że początkowe bariery wynikające z czasu jaki potrzeba na wykonanie pojedynczych komponentów będą się zmniejszały[11, 51].

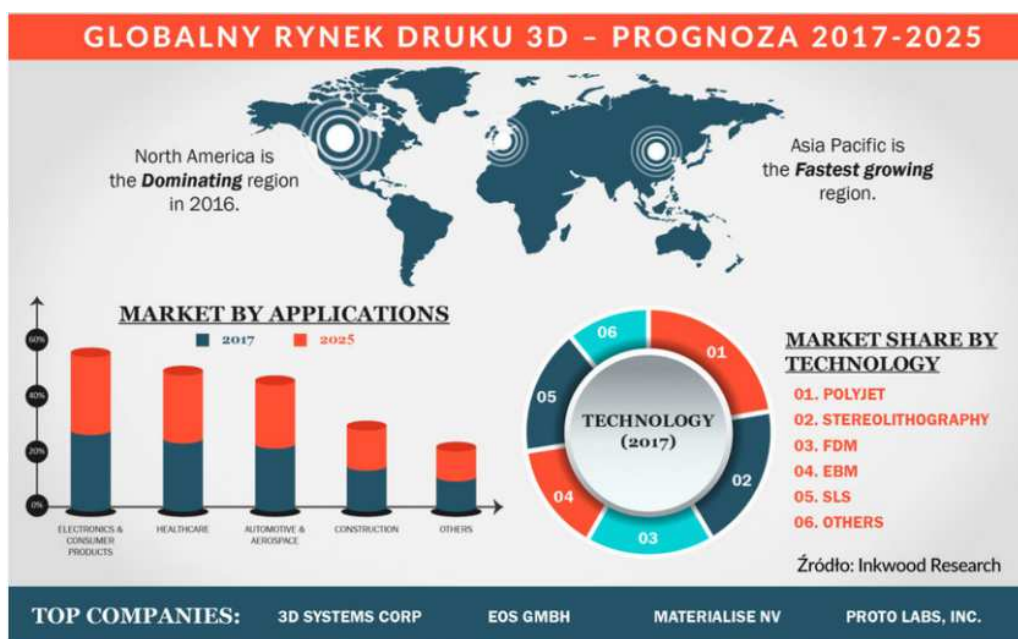
Obiekty hydrauliki siłowej wykorzystywane do sterowania statków powietrznych w technologii FBW (Fly By Wire) stanowią znaczny udział masy w całej konstrukcji. Zatem zasadnym jest poszukiwanie rozwiązań zmniejszających udział masy własnej konstrukcji. Rysunek 1.3 przedstawia wykres zależności kosztów produkcji w stosunku do masy komponentu, odniesieniu do wytwarzania rozdzielaczy serwowzorów hydraulicznych[36].



Rys.1.3. Koszt komponentu drukowanego 3D w odniesieniu do jego masy [36]

Z wykresu wynika, że jest ekonomicznie uzasadnione, a także możliwe zastosowanie technik druku 3D do wytwarzania części hydraulicznych. Z wykresu wynika również, że koszty produkcji części hydraulicznych o masie do 1 kg są najwyższe z tego względu zastosowanie technologii AM jest w stanie znacząco te koszty obniżyć.

Części wykonywane w technice addytywnej mogą odnieść sukces również w innych branżach przemysłu w zakresie produkcji układów hydraulicznych co pokazuje prognoza Inkwood Research [72] przedstawiona na rysunku (rys.1.4.).



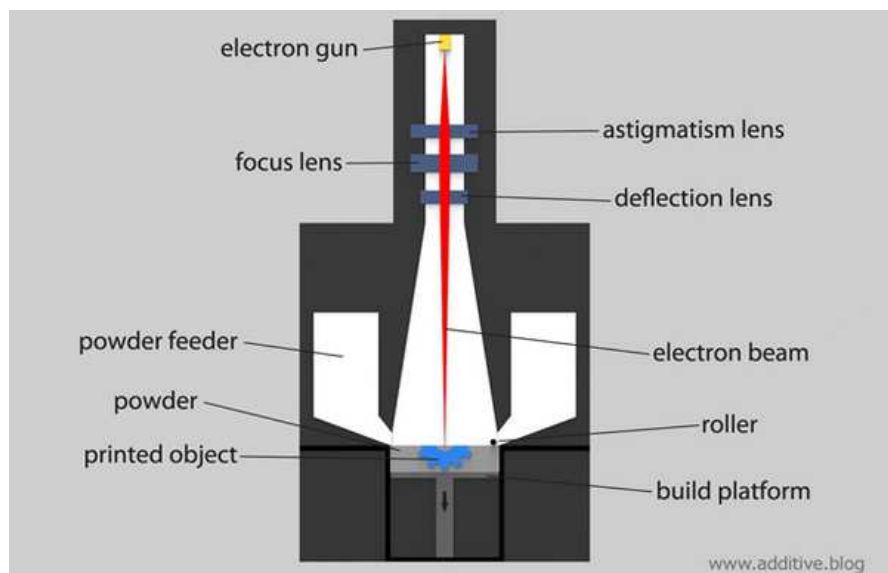
Rys. 1.4. Prognoza rozwoju rynku druku 3D [72]

Analizując przedstawiony na rysunku (rys.1.4.) wykres widać wartość sprzedaży maszyn i urządzeń wykorzystywanych do produkcji części w technologii AM w 2017 roku, która wynosiła około 4 mld dolarów, obecnie szacuje się, że rynek jest wart ponad 5 mld dolarów. Światowymi liderami w zakresie badań nad technologią druku 3D są USA, Niemcy, Australia, Belgia, Hiszpania, Holandia, Wielka Brytania, Szwecja, Chiny i Japonia. Obecnie najszerze badania w zakresie procesów przyrostowych dotyczą m.in.: poprawy wydajności procesu AM, poprawy powtarzalności i jakości procesu produkcyjnego, redukcji kosztów produkcji, zwiększenia możliwości produkcyjnych. Aktualnie technologie oparte o proces PBF umożliwią przemysłowe wytwarzanie części z następujących materiałów: stopów aluminium, stopy kobaltowo-chromowe, stopy niklu, stali nierdzewnej, stali maraging, stopy tytanu. Biorąc pod uwagę wysokie koszty przygotowania materiału wyjściowego w postaci proszku stopu metali, istotne jest prowadzenie badań nad jakością wyrobów wytwarzanych w złożach o różnym stopniu zużycia procesowego [29, 107, 115].

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

Techniki wytwarzania przyrostowego w których stosowany jest materiał w postaci proszku metalu są obecnie jednymi z wiodących w pracach rozwojowych dla zastosowania na skalę przemysłową [1]. Pozwalają na wykonywanie unikatowych pod względem geometrii w pełni funkcjonalnych prototypów i już w wielu przypadkach serii produkcyjnych wyrobów [2]. Dostawcy technologii przyrostowych oferują rozwiązania oparte na złożu proszkowym, których zasadniczą wspólną cechą jest wyjście od sproszkowanego materiału do uzyskania funkcjonalnej części z wykorzystaniem różnych sposobów oddziaływania energetycznego. Sam proces polega na odwzorowaniu kształtu modelu geometrycznego poprzez selektywne, uporządkowane skanowanie wiązką energii, kolejnych warstw modelu. Model jest najczęściej pozyskiwany w procesie modelowania 3D lub za pomocą skanowania przestrzennego obiektu rzeczywistego [2, 12, 18, 21, 35, 63].

Istnieje wiele odmian procesów addytywnych opartych na wykorzystaniu proszku jako materiału wyjściowego w postaci złoża proszkowego podawanego bezpośrednio do obszaru roboczego maszyny przyrostowej. Jednym z procesów przyrostowych opartych na złożu proszkowym jest proces, który jako energii oddziaływania używa się wiązki elektronów (rys. 2.1), EBM – Electron Beam Melting [26].



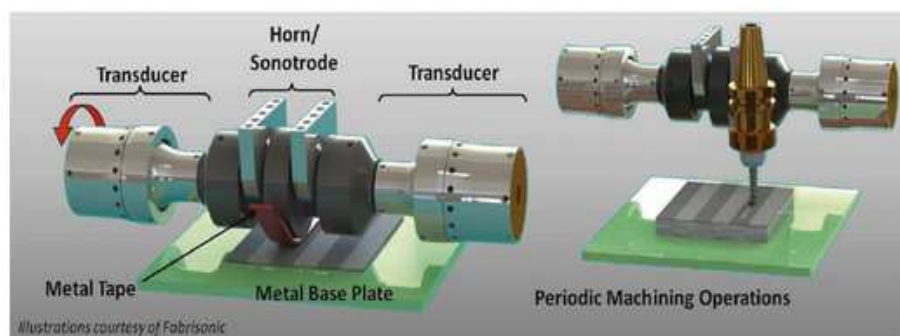
Rys. 2.1. Schemat systemu EBM[26]

W procesie Electron Beam Melting wiązka elektronów uzyskiwana za pomocą działa elektronowego prowadzona w środowisku wysokiej próżni oddziałuje na sproszkowany metal powodując jego przetop. Metoda ta opiera się na możliwości sterowania odchyleniem wiązki elektronów poprzez użycie układów odchylenia

zbudowanych w oparciu o elektromagnesy. Kolejne warstwy proszku nanoszone są po obniżeniu platformy roboczej. Tak warstwa po warstwie, skan po skanie, powstaje obiekt przestrzenny. W metodzie tej proszek, który nie uległ przemianie fazowej można ponownie wykorzystać w następnych procesach. Metoda EBM bazując na dobrze rozwiniętej technologii kontroli wiązki elektronów pozwoliła wypracować kolejne jej odmiany jednak największym profitem było rozwijanie metod dystrybucji proszku poprzez opracowywanie różnego rodzaju systemów dozowania i rozprowadzania kolejnych warstw proszku metalu. Ograniczeniem może być zapewnienie próżni w obszarze roboczym. Uzyskiwane struktury stanowią w budowie maszyn najczęściej elementy prototypowe, krótkie serie oraz w inżynierii medycznej implanty. Właściwości fizyczne otrzymywanych modeli i wyrobów są porównywalne do właściwości elementów uzyskiwanych technologiami ubytkowymi. Metoda ta nadal jest rozwijana i wykorzystywana w nauce i przemyśle. Z uwagi na wykorzystanie próżni, metoda ta jest odpowiednia do stosowania z proszkami metali o dużym powinowactwie do tlenu np. tytan. Inercja układu odchylenia wiązki elektronów nie istnieje co sprawia, że prędkości skanowania są od 5 do 10 razy wyższe niż w przypadku układów z systemami zwierciadeł odchylanych galwanometrycznie powszechnie wykorzystywane w procesach SLM i DMLS do prowadzenia wiązki lasera.

Technika IFF (Ion Fusion Formation) to z kolei rozwiązanie firmy Honeywell Aerospace. Różnicą od prezentowanej poprzednio jest użyte źródło energii. Proszek lub drut podawany jest w obszar oddziaływania palnika do spawania elektrochemicznego. Metoda pozwala na wykonywanie elementów o dużych rozmiarach, jednak nie jest dedykowana do wykonywania skomplikowanych i złożonych geometrycznie modeli [26].

Kolejną techniką przyrostową jest UAM – Ultrasonic Additive Manufacturing, która polega na ultradźwiękowym spajaniu warstw metalu pod dociskiem. Nie zachodzi tu przemiana fazowa gdyż nie dochodzi do przetopu (rys. 2.2). Paski cienkiej metalicznej folii pod wpływem docisku i ultradźwięków spajają się ze sobą tworząc strukturę warstwową którą następnie w procesach ubytkowych formułuje się do pożądanego kształtu. Metoda jest precyzyjna, a co więcej pozwala tworzyć struktury z różnych rodzajów materiałów [26, 109, 110, 112].



Rys. 2.2. Ultrasonic Additive Manufacturing [26]

Dzięki zastosowaniu odpowiednich schematów przejścia od materiału do materiału można uzyskiwać różne właściwości fizyczne modeli. Technologia ta pozwala spajać ze sobą warstwy folii o grubości do 200 μ m. Dzięki możliwości wprowadzania różnych rodzajów materiałów w trakcie procesu można tworzyć struktury o miejscowo programowalnych właściwościach takich jak opór elektryczny, przewodnictwo światła itp. Tak otrzymane struktury są nazywane „strukturami inteligentnymi”.

Proces TKF – Titomic Kinetic Fusion oraz SPEED3D, to dwie bliźniacze metody oparte na tej samej zasadzie jednak opatentowane przez dwa różne ośrodki. Bazują one na procesie spajania proszków poprzez nadanie im odpowiednio wysokiej prędkości od 500-1000 m/s przez co uzyskują one wysoką energię kinetyczną. Tak rozpędzone ziarna proszku bombardują powierzchnię bazową ulegając stopieniu (cold spray). Metoda ta nie wykorzystuje osłony gazów obojętnych a cały proces zachodzi w warunkach otoczenia. Niestety dostępność źródeł odnoszących się do właściwości fizycznych otrzymywanych tą metodą struktur jest bardzo ograniczona [18, 26].

Ciekawym rozwiązaniem jest DPM – Digital Part Materialization. Opiera on się na patencie należącym do MIT – Massachusetts Institute of Technology, który dedykowany jest do produkcji seryjnej wyrobów metalowych i narzędzi. Z rozwiązania tego korzysta firma ExOne, która jako wyłączny właściciel technologii DPM na potrzeby rynku nazwała ją PROMETAL. Proces polega na nanoszeniu kolejnych warstw proszku, a następnie za pomocą głowicy podobnej do tych stosowanych w druku atramentowym, podawany jest materiał wiążący. Warstwy aktywowane materiałem wiążącym tworzą strukturę przestrzenną. Tak powstały wydruk trafia do suszarki gdzie lepiszczce jest wygrzewane. Następnie przychodzi czas na oczyszczenie komory roboczej z niezwiązanego proszku. W kolejnym etapie dochodzi do zespolenia proszku w wysokiej temperaturze z dodatkową infiltracją fazą ciekłą metalu. Powstałe w tym procesie elementy ulegają skurczowi przetwórczemu w zakresie od 5% do 10%. Prototyp posiada docelowo wszystkie cechy funkcjonalnej części. Dzięki rozdzieleniu części budowy 3D struktury od części przetopu wyeliminowano problemy z powstawaniem mikronaprężeń wewnątrz struktury oraz skrócono czas operacji wydruku. Dodatkowo przy odpowiedniej logistyce procesowej, do pieca wygrzewającego można w tym samym czasie ładować wiele wsadów co nie wpływa na właściwości a wydatnie skraca czas procesu[114, 116, 117, 118, 119].

Procesy addytywne bazujące na sproszkowanym metalu jako materiale budulcowym nie koniecznie wymagają styczności z proszkiem metalicznym w dosłownym tego słowa rozumieniu. Technologia ekstruzji materiału MEX – Metriarrial Extrusion i zastosowanie filamentów z osnową proszków metalicznych to kolejny przykład zastosowania proszków metali w druku 3D. Metoda ta nie różni się od klasycznej FDM/FFF/MEM gdzie ekstruder rozprowadza nitkę uplastycznionego polimeru termoplastycznego tworząc model trójwymiarowy. Wykorzystanie filamentów na osnowie sproszkowanych metali pozwala zbudować wymagany kształt w oparciu o model 3D-CAD. Powstała struktura ma podobne właściwości do tych

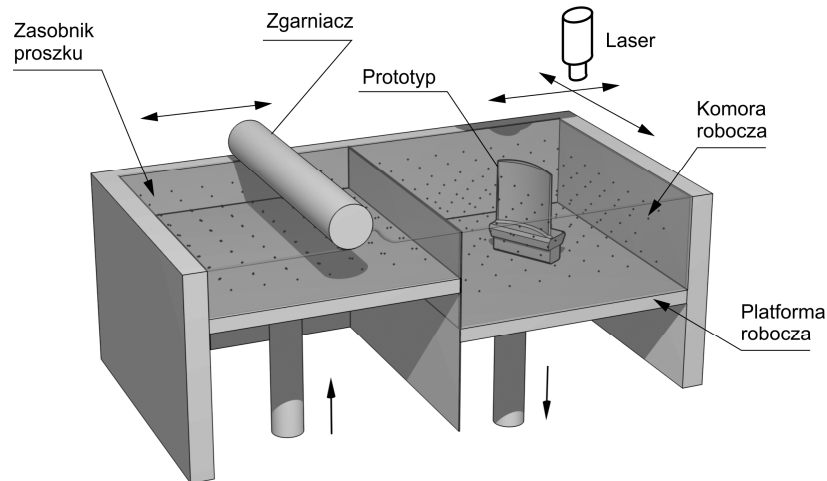
otrzymywanych w klasycznym procesie MEX, jednak dodatkowy zabieg obróbki termicznej pozwala uwolnić strukturę z materiału nośnego jakim jest tworzywo polimerowe [15]. Po tym zabiegu model ulega zmniejszeniu z uwagi na skurcz przetwórczy, jednak zyskuje właściwości jakie ma metal osnowy. Z dostępnych filamentów oferowanych na rynku można spotkać wiele rodzajów od metali szlachetnych do materiałów magnetycznych. Daje to olbrzymie możliwości w konstruowaniu tak geometrii jak i właściwości fizycznych uzyskiwanych struktur wyrobów [18, 26].

Rozwój źródeł energii opartych o laser to kolejny przykład możliwości zastosowania w technologii addytywnej. Słowo LASER po rozwinięciu to *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* co oznacza wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Źródło energii tego typu cechuje się wysokim potencjałem mocy, szybkością dystrybucji, przełączania, jest mniej wrażliwe na środowisko w którym oddziałuje, posiada spójną, koherentną wiązkę promieniowania o pożądanym właściwościach skupienia. Te cechy spowodowały, że laser stał się wiodącym typem energii w systemach druku 3D [56, 111, 113, 115, 118, 120].

Do zbioru technik LPF – Laser Powder Forming, gdzie wykorzystywana jest wiązka światła laserowego należą LC – Laser Consolidation, DMD – Direct Metal Deposition), LMD – Laser Metal Deposition i LENS – Laser Engineered Net Shaping. Metoda ta polega na topieniu powierzchni docelowej laserem o dużej mocy wraz z jednoczesnym dostarczaniem proszku metalu za pomocą strumienia gazu osłonowego lub procesowego. Jest to metoda, która pozwala na regenerację uszkodzeń oraz tworzenie struktur od podstaw. Uzyskiwane struktury cechują dobre właściwości mechaniczne. Jest to technologia w której proszek nie wypełnia całej przestrzeni roboczej pozwala to na wykonywanie stosunkowo dużych geometrii. Niestety minusem tej technologii jest ograniczenie do wykonywania bardziej delikatnych i precyzyjnych struktur [13, 23, 65, 120].

Metoda oparta na przetwarzaniu warstwowym proszku w jego złożu PBF – Powder Bed Fusion, to jedna z najbardziej rozpowszechnionych addytywnych technik wytwarzania wykorzystywana do wykonywania elementów metalowych. Schemat metody PBF przedstawia rysunek 2.3. W metodzie PBF występuje złożo proszkowe, które jest zasilane z odpowiedniego zasobnika [8, 25, 26]. Przed spajaniem kolejnego przekroju powierzchnia złoża jest wyrównywana za pomocą specjalnego zgarniacza. Proces skanowania spajanego przekroju jest realizowany za pomocą wiązki lasera sterowanej przez odpowiedni układ optyczny. Nowoczesne rozwiązania maszyn PBF mogą być wyposażone w kilka lub kilkanaście laserów, co znaczenie przyspiesza proces spiekania. Zasadnicze podobieństwa procesu zostały zagospodarowane przez kilku głównych graczy na rynku druku 3D z metali. Wprowadzone patenty opisują subtelne różnice pomiędzy dostawcami technologii. Zasadniczą właściwością procesu jest selektywne spiekanie, przetop, obszarów poddawanych oddziaływaniu energii pochodzącej z lasera. Obszary te są uzyskiwane w oparciu o model przestrzenny struktury. Model 3D obiektu zostaje przekonwertowany na model powierzchniowy

oparty na siatce trójkątów (STL). Dokładność dyskretyzacji jest określana na etapie konwersji. Im bardziej zależy nam na dokładności tym siatka powinna być gęstsza. Oczywiście istnieje granica wynikająca z możliwości samego procesu PBF. W kolejnym etapie model trafia do dedykowanego oprogramowania procesowego w celu przygotowania plików wykonawczych.



Rys. 2.3. Schemat procesu PBF[8]

Przykładem takiego może być MAGICS firmy Materialise [25]. To rozbudowane narzędzie stanowi kolejny krok w procesie przygotowania struktury do druku. Model STL zostaje „pokrojony” na warstwy płaszczyzn równoległych do powierzchni roboczej. Następnie oprogramowanie obrabia każdą warstwę wypełniając powierzchnie dedykowane do zestalenia (tzw. z ang. hatching). Wcześniej dodawane są struktury wsporcze wymagane w krytycznych punktach konstrukcji. Całość przekształcona zostaje w kod maszynowy. Proces przebiega warstwa po warstwie. Kolejne warstwy proszku nanoszone są poprzez układy ekspozycji. Po zakończeniu wydruku konstrukcję należy oczyścić z niezwiązanego proszku a otrzymany element z niepotrzebnych struktur wsporczych. W zależności od zastosowanego rodzaju sproszkowanego metalu możliwe są obróbki post-procesowe takie jak obróbka wibrościerna, obróbka cieplna, obróbki powierzchniowe. Komponent otrzymany w tej technologii ma wszystkie cechy funkcjonalne i fizyczne jakie można wymagać od konstrukcji z danego materiału.

Na rynku można napotkać kilka nazw urządzeń producentów wykorzystujących technologię przyrostowego wytwarzania. Prawa patentowe do nazwy SLM ma firma SLM Solutions oraz Realizer, który obecnie jest częścią firmy DMG MORI. *Selective Laser Melting* (SLM) to technologia wywodząca się od twórcy technologii DMLS firmy EOS. Producenci urządzeń SLM korzystając z praw patentowych do samego procesu wprowadzają pewne zmiany, tak by odróżnić się od twórcy patentu. Dla przykładu zmiany mogą polegać na zastosowaniu gumowego zgarniacza. Sama konstrukcja układu nanoszenia proszku w rozwiązaniu DMG MORI też jest inna ponieważ wykorzystuje układ z ślimakowymi podajnikami do strefy pracy zgarniaczy. Samo złożo proszku znajduje się w odseparowanej przestrzeni maszyny [26] .

Urządzenie firmy EOS wykorzystuje technologię DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*). Jest to opatentowana już ponad 20 lat temu technika do produkcji prototypów oraz wyrobów seryjnych. Proces DMLS dzięki swoim właściwościom jest dzisiaj wiodącym w obszarach jakości i możliwości jakie dają techniki Additive Manufacturing oparte na złożu proszkowym PBF. Główną cechą odróżniającą ją od pozostałych jest zastosowanie ceramicznego ostrza zgarniającego. Pozwala ono niwelować drobne nierówności powstające na skanowanej przez laser powierzchni co wydatnie wpływa na obniżenie porowatości otrzymywanych struktur. Założenia procesu są podobne jak w wersji SLM. Źródło wysokoskoncentrowanej energii w postaci wiązki światła laserowego przetapia kolejne fragmenty drukowanego modelu powodując ich zestalenie. Wszystko odbywa się w komorze procesowej wypełnionej gazem procesowym najczęściej azotem. Komora jest ciągle przepływana gazem a jego strumień jest tak uformowany aby wychwycić pewne frakcje odprysków powstałe w trakcie skanowania. Źródło energii to laser włóknowy pompowany diodami. W zależności od modelu stosowane są źródła laserowe o mocach 50-2000W. Znane są konstrukcje wieloźródłowe z kilkoma rezonatorami laserowymi wydatnie obniżające czas obróbki. Sama wiązka odchylana jest wg algorytmu pochodzącego z kodu źródłowego za pomocą mikro zwierciadeł zawieszonych na osiach galwanometrów. Pozwala to uzyskać zadawalające szybkości wiązki. Aby uzyskać jednorodną moc plamki lasera w każdym płożeniu platformy roboczej układ prowadzenia wyposażony jest w soczewkę skupiającą i moduł kalibrujący moc. Zastosowane rozwiązania pozwalają na drukowanie skomplikowanych, często delikatnych struktur[115].

Oprócz wymienionych powyżej dostawców technologii SLM/DMLS można wymienić jeszcze kilka innych których rozwiązania oparte są na tej samej zasadzie. Firma GE oferuje proces Laser CUSING natomiast firma TRUMPF, wiodący lider przemysłowej technologii laserowej oprócz licznych rozwiązań do cięcia i spawania za pomocą wiązki lasera ma w swym port folio proces LMF. *Laser Metal Fusion* jest kolejną odmianą procesu SLM/DMLS.

Przedstawiona analiza pokazuje wysoki potencjał technologiczny i aplikacyjny w obszarze spajania przyrostowego proszków metali, należy jednak dodać, że producenci urządzeń i materiałów eksploatacyjnych udostępniają najczęściej swoim odbiorcom gotowe zestawy parametrów procesowych dla określonych materiałów np. w formie licencji czasowych. Zmiany właściwości stosowanych proszków w obrębie określonych materiałów nie są uwzględniane w standardowych parametrach procesu, ze względu na konieczność prowadzenia dodatkowych badań i kosztów tych badań. Należy jednak pamiętać, że parametry złoża mogą ulegać zmianie w zależności od jego eksploatacji, mieszania proszków post-procesowych, a nawet warunków przechowywania proszków. Biorąc powyższe pod uwagę, zmieniają się docelowo właściwości wytrzymałościowe wyrobów wytwarzanych w procesie przyrostowym z określonego złoża. W prawdzie istnieją obecnie normy ISO związane ściśle z procesem PBF, które określają wytyczne do projektowania wyrobów wytwarzanych przyrostowo [36], generalne założenia związane z procesami przyrostowym [37],

terminologię dedykowaną do druku 3D [38], formaty danych stosowane w procesach przyrostowych [39] oraz inne obszary związane otoczeniem techniczno-produkcyjnym dla procesów addytywnych, jednak należy zauważyć, że obszar jakości i degradacji złoza jest w dalszym ciągu mało rozpoznany, szczególnie w kontekście wytrzymałości zmęczeniowej obiektów cienkościennych.

Badanie wytrzymałości wyrobów, a szczególnie próbek o geometrii zgodnej z wytycznymi odpowiednich norm wymaga dużych nakładów czasu i pracy, często jest realizowane przez producentów urządzeń i związane z nimi jednostki badawcze. Badania takie pozwalają na dobór odpowiednich parametrów procesów przyrostowych, gdzie szczególnie istotny jest związek korelacji pomiędzy mocą wiązki lasera, prędkością skanowania przekroju spiekane go oraz samej drogi skanowania z uwzględnieniem średnicy plamki wiązki lasera [3, 13, 56, 73]. Budowa układu optycznego powoduje, że w zależności od wielkości przestrzeni roboczej maszyny, układ ten znajduje się na określonej wysokości od płaszczyzny skanowania, co powoduje dodatkowe zmiany w kształcie plamki lasera, co należy uwzględnić nie tylko w planowaniu samego procesu addytywnego ale również w projektowaniu wyrobu wytwarzanego w procesie druku 3D, stanowi to jednak odrębne zagadnienie projektowo badawcze, którego pewne elementy zostały poddane badaniom i analizie w kontekście złoza proszkowego będącego wiodącym tematem dysertacji.

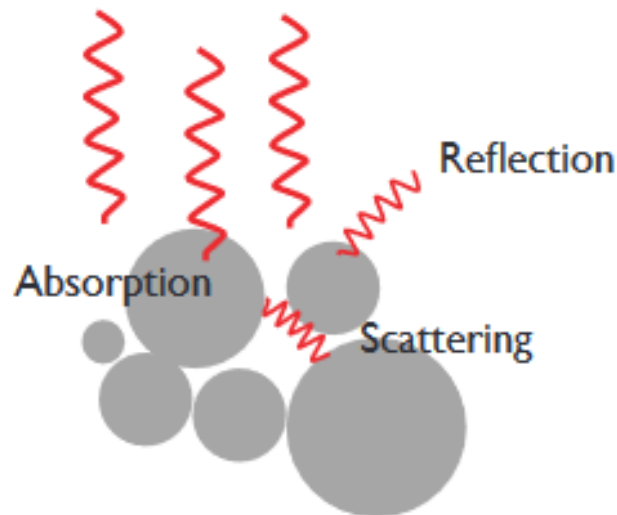
W literaturze można spotkać również szereg opracowań o charakterze ogólnym związanym z procesami szybkiego prototypowania ich miejsca w procesach produkcyjnych [47], przepływem danych dla procesów wytwórczych [58], dokładnością geometryczną wyrobów wytwarzanych przyrostowo [62] czy obróbki wykończeniowej wyrobów ze stopów metali [71], ze szczególnym uwzględnieniem struktury geometrycznej powierzchni [72], co w przypadku serwozaworów jest bardzo istotne [103]. Wiele informacji dotyczących istoty procesów addytywnych oraz ich aplikacji udostępniają producenci maszyn do druku 3D i materiałów eksploatacyjnych, biorąc pod uwagę nowoczesne środki dystrybucji informacji wiele z nich znajduje się na witrynach internetowych w formie ogólnodostępnej lub z ograniczonym dostępem dla użytkowników i partnerów biznesowych [26, 28, 30, 59, 62].

Z punktu widzenia tematyki dysertacji, można zauważyć również prace o charakterze szczegółowym związane z wybranymi parametrami procesów PBF, można tu wyróżnić prace nad mechanizmami powstawania porowatości, wpływu skanowania i dostarczania energii do strefy przetopu, kontroli szybkości zjawiska przetopu i krystalizacji [121, 122]. W pracy „Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties” [16] zebrano i opisano procesy zachodzące na wielu płaszczyznach procesu przetopu sproszkowanego materiału. Przeanalizowano dynamikę oddziaływania wiązki lasera na proszek, dokonano analizy absorpcji energii, określono wartości gęstości energii dla wielu wariantów prowadzenia wiązki. Jak wynika z analizy zagadnienia bardzo istotny wpływ na uzyskiwaną strukturę ma gęstość energii wyrażanej w J/mm^3 (rys.2.4.). Można zauważyć, że dla różnych stopów inna jest jej wartość dla zachowania wysokiej

gęstości. Kolejnym spostrzeżeniem jakie się nasuwa jest związek porowatości z uzyskiwanymi wartościami wytrzymałości zmęczeniowej. W przeanalizowanych źródłach autorzy skupiają się na wpływie orientacji druku części [59, 93], kierunku oddziaływania siły zmęczeniowej [60], propagacji pęknięcia w drukowanej próbce z karbem [88]. Poszukując opracowań dotyczących wpływu morfologii złoza PBF na jakość otrzymywanej struktury nie natrafiono na opracowanie dotyczące wpływu degradacji złoza proszkowego na wytrzymałość mechaniczną i zmęczeniową. Analizie poddano zatem źródła traktujące o podobnym problemie. W artykule „A Comparative Study on Laser Powder Bed Fusion of Differently Atomized 316L Stainless Steel” [30], gdzie można znaleźć kilka ciekawych obserwacji dotyczących wpływu wielkości ziaren proszku na właściwości porowatości i uzyskiwane wyniki w próbie statycznego rozciągania. W pracy tej, opisano sposób dystrybucji energii w procesie DMLS za pomocą średniej gęstości energii przypadającej na jednostkę objętości proszku. Obiekt badawczy, w przywoływanym źródle [30] dotyczył proszku stali 316 o odmiennych właściwościach fizycznych i chemicznych jak przedmiotowa stal 1.2709 (MS1). W odniesieniu do tematu rozprawy, którym było porównanie uzyskanych właściwości otrzymanych próbek z procesu DMLS do stali rodzimej 1.2709 w aspekcie degradacji złoza PBF nie znaleziono podobnego opracowania.

W aspekcie samego materiału proszkowego stali maraging 1.2709 (EOS MS1) przeanalizowano dostępne informacje związane z jakością uzyskiwanych wydruków przy zachowaniu świeżości złoza czyli morfologii w stanie dostawy [44, 49, 50, 57]. W celu określenia metod pozwalających na weryfikację jakości uzyskiwanych wyników dokonano analizy metodyk badawczych w aspekcie zmęczeniowym [33, 34, 42, 59, 90, 93, 94]. Na ich podstawie określono techniki i potrzebne wyposażenie do przeprowadzenia badań zmęczeniowych elementów cienkościennych.

W odniesieniu do strategii procesu skanowania i zjawisk zachodzących w obszarze przetopu przeanalizowano dane z opisu absorpcji promieniowania laserowego dla obiektów sferoidalnych, gdzie propagacja wiązki lasera napotyka na zmienne środowisko różnych obiektów sferycznych i globularnych tworząc efekt pochłaniania i odbicia fotonów.

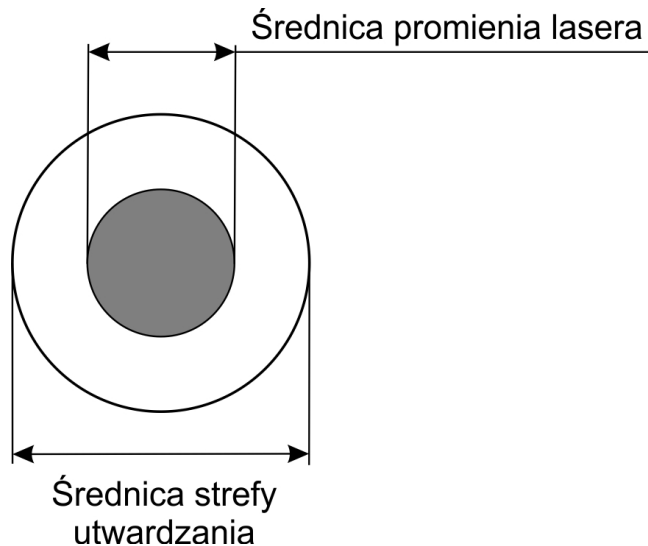


Rys. 2.4. Proces absorpcji energii lasera w złożu PBF[26]

Procesy absorpcji lokalnej (rys.2.4.) są związane z warunkami panującymi w bliskim sąsiedztwie oddziaływania wiązki lasera dlatego przeanalizowano strategię skanowania mające wpływ na transmisję ciepła, jego wytracania w czasie krystalizacji oraz wpływ na gęstości otrzymywanych struktur [31, 51, 54, 74, 75, 76, 77, 78, 84].

W odniesieniu do możliwości jakie daje technologia addytywna oparta na złożu PBF przeanalizowano jej możliwości w odniesieniu do cienkościennych elementów korpusów serwowatorów. W istniejących opisach prowadzonych badań i ich wyników autorzy prezentują różne obserwacje wynikające ze sposobu dystrybucji energii lasera i efektu oddziaływania na proszek o różnych rozmiarach [104].

Analizując informacje o strategiach skanowania należy zwrócić uwagę na sam charakter geometryczny wiązki lasera. Wiązka laserowa wykorzystywana w przypadku proszków metali wymaga stosowania laserów o mocy kilkuset Watt, np. dla systemu EOSINT M270 zastosowany został laser światłowodowy o mocy znamionowej 200W, który posiada moc w polu skanowania 190W, długość fali w zakresie 1060 – 1100nm. Źródło promieniowania laserowego oparte jest na rezonatorze włóknowym. Lasery włóknowe są niezwykle kompaktowe. Przekształcają energię diod półprzewodnikowych we właściwą wiązkę laserową. W systemach DMLS wiązka ta charakteryzuje się kołowym rozkładem koncentracji energii (rys.2.5).



Rys. 2.5. Strefa oddziaływania wiązki lasera[92]

Układ optyczny sterujący wiązką dla płaskiego pola spiekania warstwy charakteryzuje się ogniskową T-Theta równą 410mm. Średnica zogniskowanego promienia jest równa ok. 0,1mm. Sterowanie promieniem laserowym odbywa się w oparciu o system szybkiego odchylenia wiązki układem najczęściej dwóch lusterek. Lustra poprzez realizację obrotu pokrywają zasięgiem całą płytę startową maszyny w osiach X i Y. Obrót realizowany jest przez napędy galwanometryczne cechujące się minimalną masą a przez to również minimalną inercją. Skaner galwanometryczny stanowi odseparowany układ z kompensacją temperatury. W skład systemu wchodzi zintegrowana elektronika Servo i interfejsowa, z cyfrowym przekazywaniem danych z komputera sterującego i z cyfrowym procesorem sygnałowym. Taki układ zapewnia prędkość naświetlania do 7000 mm/s. Regulacja rozmiaru plamki lasera na powierzchni ekspozycji osiągnięta jest poprzez funkcję ogniskowania.

Równie istotny jest stabilny układ mechaniczny maszyny, np. dla urządzenia EOSINT M270 dokładność pozycjonowania platformy roboczej wzdłuż osi pionowej nie przekracza +/-0,005mm a minimalna grubość warstwy nanoszonego proszku to 0,02mm.

Prawidłowa struktura modelu w technologii druku 3D opartej o selektywne spiekanie proszków metali w procesie DMLS jest zależna od wielu czynników bezpośrednich i pośrednich. Do czynników pośrednich można zaliczyć te, które dotyczą prac przygotowawczych przed rozpoczęciem procesu tzw. pre-processing (warunki przechowywania proszku, warunki oraz proporcje mieszania proszku nowego i po procesowego, przygotowanie platformy roboczej i jej właściwe pozycjonowanie). Do czynników bezpośrednich można zaliczyć te, które odnoszą się bezpośrednio do realizacji procesu spiekania (przygotowanie danych warstwowych modelu, rozmieszczenie modeli na platformie roboczej, kalibracja laserowego układu skanującego, ustawienie parametrów spiekania).

Z punktu widzenia poprawności wyrobu/prototypu, szczególnie korpusu serwozaworu lotniczego narażonego na zmienne obciążenia mechaniczne każda składowa procesy wytwarzania jest istotna i powinna być realizowana zgodnie z procedurami i być poddawana kontroli stanowiskowej i innym elementom kontroli jakości.

Idąc od początku czyli przygotowania procesu, producent dostarcza użytkownikowi materiał w postaci sproszkowanej w opakowaniach szczelnie zamkniętych. Z tego względu należy na wstępie skontrolować opakowania i plomby na opakowaniach. Szczególnie jest to istotne dla materiałów, które w postaci sproszkowanej mają właściwości wybuchowe (stopy tytanu i stopy aluminium). Proszki powinny się przechowywać również w specjalnych komorach, których atmosfera zabezpiecza je przed degradacją. W przypadku pierwszego zasypu, czystego urządzenia, nowym proszkiem przebiega on zgodnie z procedurą pierwszego uruchomienia maszyny. W przypadku użycia proszków, które przeszły już proces wytwórczy należy proszki używane przesiać przez odpowiednie sita i wymieszać w zalecanych przez producenta proporcjach z proszkiem nowym. Zbyt duże ilości używanego proszku mogą powodować wady prototypu o charakterze zaburzeń struktury wewnętrznej modelu lub zwiększeniem niedokładności wymiarowo-kształtowej. Jest to obszar szczególnej uwagi dla prowadzonej dysertacji.

Przygotowanie platformy roboczej powinno być realizowane również zgodnie z instrukcją producenta urządzenia. Górna powierzchnia platformy roboczej stanowi podstawę mocowania (uchwyt) dla budowanych prototypów, a jednocześnie powierzchnię wymiany ciepła od modelu i konstrukcji podpierającej. Z tego względu po każdym procesie powierzchnia platformy roboczej musi być regenerowana poprzez zabieg planowania powierzchni. Może to odbywać się poprzez zastosowanie frezowania lub szlifowania płaszczyznowego. Mocowanie i poziomowanie platformy roboczej musi być realizowane zgodnie z procedurą określoną przez producenta.

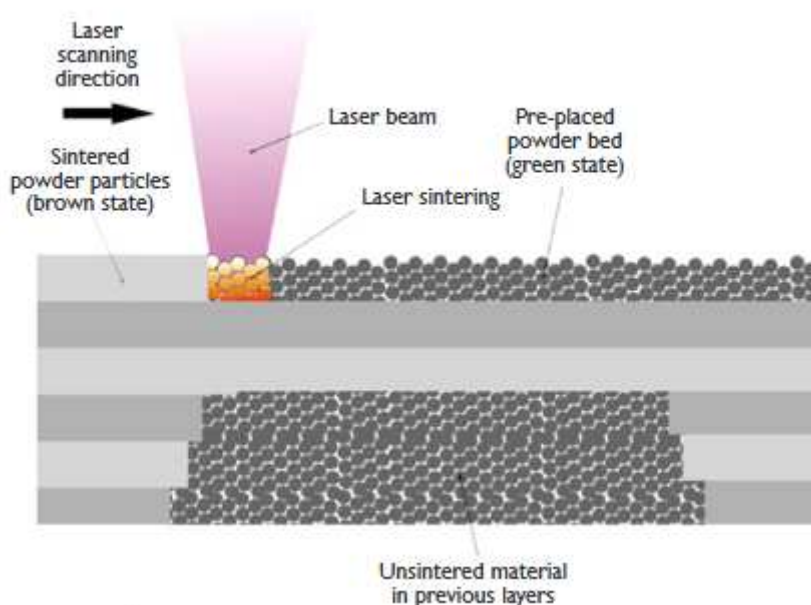
Z punktu widzenia konstruktora informacje te mogą się wydawać pomijalne, jednak znajomość procesu wytwarzania pozwala w wielu przypadkach na zaprojektowanie modelu w taki sposób aby zminimalizować możliwości powstawania wad w prototypie charakterystyczne dla procesu spiekania proszków metali. Ma to szczególne znaczenie w przypadku projektowania modeli cienkościennych przeznaczonych do wytwarzania metodą DMLS.

Proces budowania modelu oparty o spiekanie warstwowe proszku i składa się z powtarzających się pięciopunktowych cykli w skład których wchodzi:

- Obniżenie platformy roboczej o zadana grubość warstwy,
- Przejazd systemu nanoszącego do pozycji gotowości,
- Przygotowania sproszkowanego materiału za pomocą systemu nanoszącego z komory zasobnikowej, której platforma dozująca podnosi się o zadana wysokość w celu dostarczenia proszku do przesypu na platformę roboczą,

- Naniesienie warstwy proszku za pomocą systemu nanoszenia opartego na ceramicznym zgarniaczu, zapewniającego wygładzenie warstwy wcześniej stopionej i jednocześnie równomierne rozłożenie proszku na całej powierzchni roboczej. Nadmiar proszku jest przesypywany do zbiornika przesypowego,
- Spiekanie warstwy proszku przez skanowanie wiązką lasera sterowanej układem optycznym.

Cykle powtarzane są od pierwszej warstwy do zakończenia procesu budowania prototypu. Sam proces naświetlania wiązką lasera w każdej warstwie przebiega w oparciu o zakodowaną dla danej warstwy ścieżkę. Wiązka lasera dostarcza energię do proszku, która jest przez niego absorbowana a początkowo sypki proszek jest spajany w danej warstwie jednocześnie warstwa ta zostaje przyłączona z warstwami leżącymi poniżej stanowiącymi litą strukturę prototypu (rys. 2.6.).

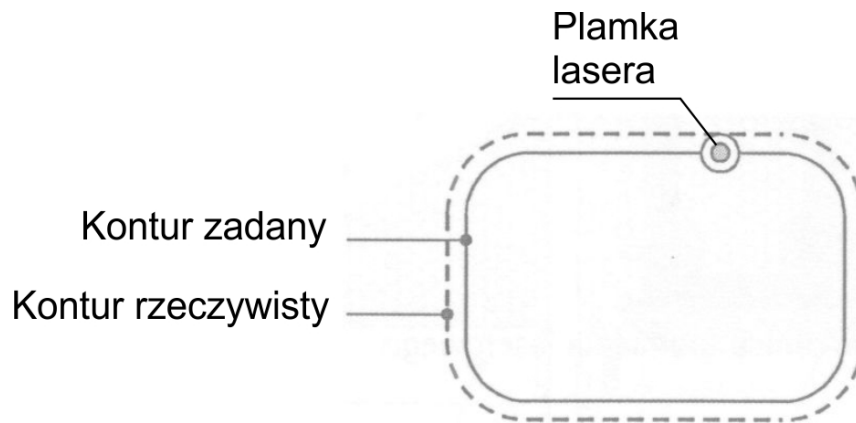


Rys. 2.6. Oddziaływanie wiązki lasera na warstwę proszku[26]

Spajanie warstwy składa się z dwóch etapów: naświetlania konturów przekroju i naświetlania wypełnienia warstwy. Naświetlanie konturów ma na celu określenie formy geometrycznej zadanego przekroju. Promień lasera pracuje w ustawieniu dedykowanym do realizacji precyzyjnych kształtów z dokładnym odzwierciedleniem szczegółów oraz uzyskaniem powierzchni modelu o możliwie najwyższej jakości. Kontur przekroju budowanego modelu w każdej warstwie zdefiniowany jest poprzez ciągi poligonowe[66,67].

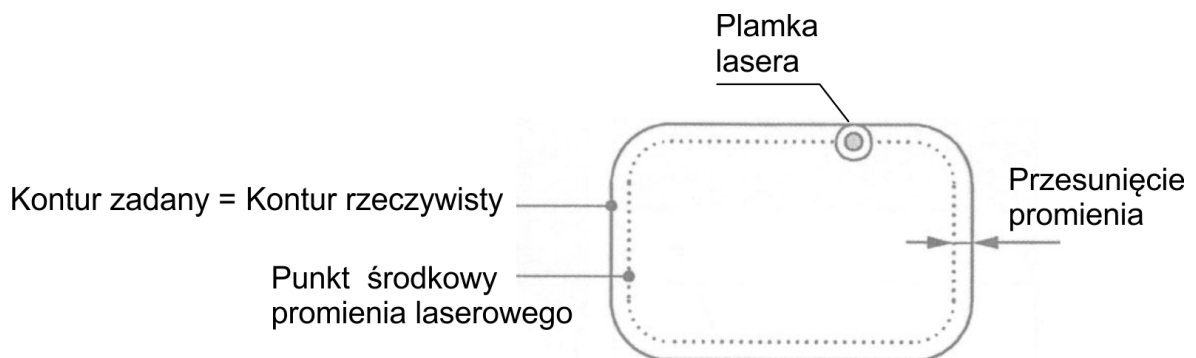
Zapewnienie założonej dokładności wymiarowo – kształtowej modelu wymaga wzięcia pod uwagę wielkości strefy utwardzania. Strefa ta jest zależna od materiału stosowanego do procesu oraz od wybranego sposobu naświetlania. W celu kompensacji odchyłań wymiarowych, można wprowadzić w różnych miejscach programu procesowego współczynniki kompensacyjne dla przesunięcia promienia.

W przypadku kiedy promień lasera podąża podczas naświetlania swoją ścieżką będącą środkiem promienia wzdłuż zadanego konturu, kontur spajanej warstwy ulega powiększeniu o połowę średnicy strefy utwardzania promienia laserowego (rys.2.7.).



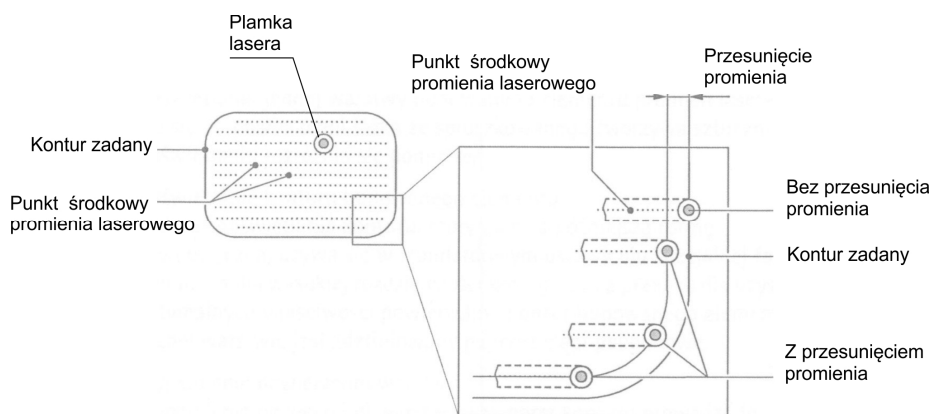
Rys. 2.7. Wiązka lasera podczas naświetlania konturu warstwy [115]

Przesunięcie promienia będzie kompensowane przez powiększenie konturu. Tor ruchu środka promienia laserowego przesuwa się do wewnątrz (rys.2.8.).



Rys. 2.8. Przesunięcie i kompensacja wiązki lasera podczas naświetlania konturu warstwy [115]

Przesunięcie promienia podczas naświetlania warstwy ogranicza przy skanowaniu tor ruchu środka promienia wychodząc od zadanego konturu o wartość podaną w kierunku do wewnątrz (rys.2.9.).

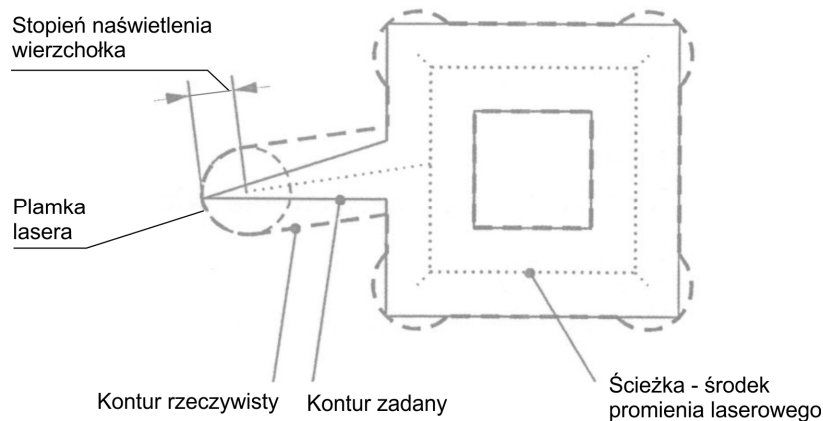


Rys. 2.9. Przesunięcie podczas naświetlania konturu warstwy [115]

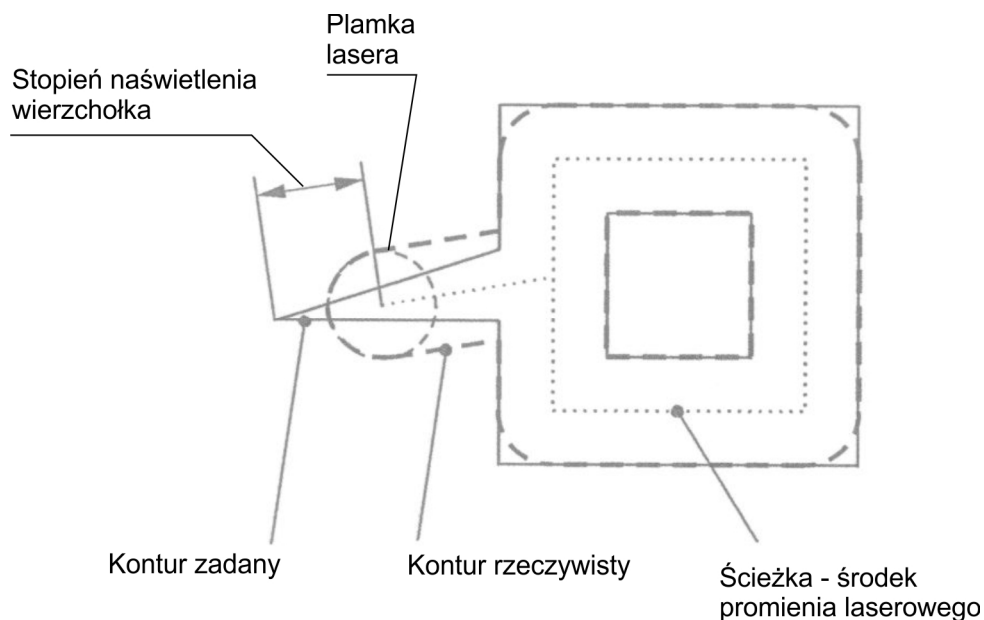
Wpływ przesunięcia promienia na dokładność wymiarowo-kształtową spiekane go modelu jest zależny od średnicy strefy utwardzania. Dla każdego materiału dedykowane są określone wartości przesunięcia promienia, które są związane z danym urządzeniem i ustalane przez producenta urządzenia i dzięki temu możliwe jest korygowanie przesunięcia odpowiednio do zastosowanego materiału modelowego.

W przypadku budowania modelu, o podwyższonych wymaganiach wymiarowo – kształtowych, dla którego planowane jest określenie dodatnich lub ujemnych pól tolerancji można wprowadzać korygowanie przesunięcia promienia dla specyficznej geometrii. Domyślna wartość współczynnika korekcji ma wartość zerową. W przypadku dodatniej korekcji geometrii modelu kontur ulega przesunięciu do wnętrza modelu. Wprowadzenie wartości ujemnej powoduje powstanie nad-wymiaru dla modelu ponieważ kontur ulega przesunięciu na zewnątrz.

Istotny wpływ na dokładność wymiarowo kształtową modeli, szczególnie których geometria składa się z ostrych krawędzi lub krawędzi o małych promieniach (np. krawędzie otworów strefy rozdzielacza serwozaworu) ma stopień naświetlenia wierzchołków (Edge Factor EF). Parametr ten określa najdalej odległy punkt ścieżki dla której kontur jest węższy niż średnica strefy utwardzania. Można wyprowadzić zależność w której naświetlenie wierzchołków (NW) jest równe iloczynowi współczynnika stopnia naświetlenia wierzchołków (EF) oraz przesunięcia promienia (PR). Zależność ta jest zobrazowana na rysunku przekroju warstwy z występującą ostrą krawędzią (rys.2.10 i rys.2.11).



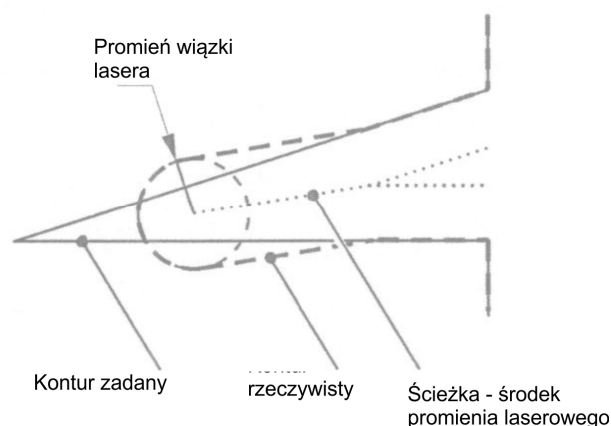
Rys. 2.10. Wizualizacja współczynnika stopnia naświetlenia wierzchołków dla wartości równej 1 [115]



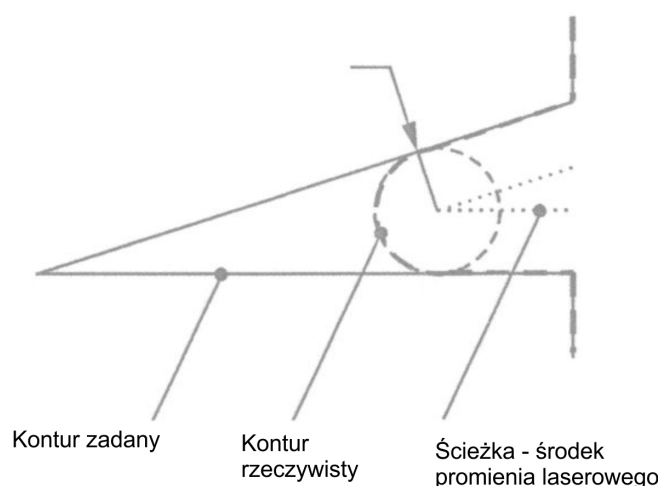
Rys. 2.11. Wizualizacja współczynnika stopnia naświetlenia wierzchołków dla wartości równej 2 [115]

Analizując rysunki (rys.2.10 i rys.2.111) można wnioskować, że jeżeli odstęp od konturu rzeczywistego względem konturu zadanego w wierzchołku na przekroju warstwowym przekracza iloczyn wartości progowej oraz przesunięcia promienia, wierzchołek ten zostaje naświetlany do wartości współczynnika stopnia naświetlenia wierzchołków równej 1,45.

W przypadku ostrych krawędzi oraz przekrojów w których występują promienie o małej wartości możliwe jest również korygowanie kształtu przekroju i docelowo całego modelu przy zastosowaniu współczynnika przesunięcia promienia. Wizualizacja wpływu tego współczynnika na kształt spiekanej warstwy przedstawiają rysunki 2.12 i 2.13.



Rys.2.12. Wizualizacja współczynnika przesunięcia promienia dla wartości równej 0,5 [115]

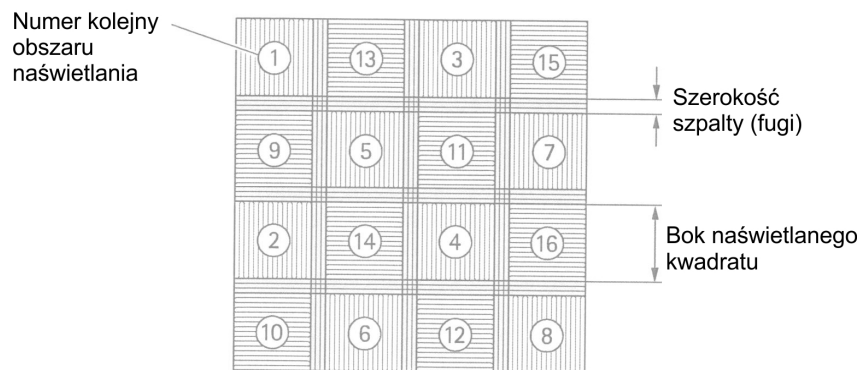


Rys.2.13. Wizualizacja współczynnika przesunięcia promienia dla wartości równej 1 [115]

Przedstawione powyżej parametry mają istotny wpływ na dokładność wymiarowo – kształtową prototypów wytwarzanych metodą spiekania warstwowego proszków metali, dotyczą one głównie spiekania konturów w zadanych przekrojach. Wielu producentów wprowadza dla swoich urządzeń możliwość optymalizacji procesu spiekania np. ze względu na szybkość budowania modelu lub jakość powierzchni prototypu.

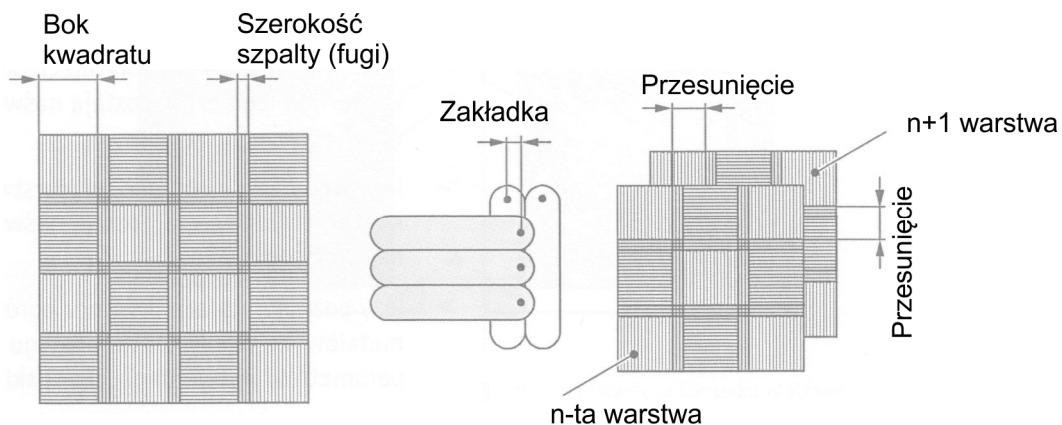
Równie istotne dla dokładności wymiarowo kształtowej jak również otrzymania prawidłowej struktury wewnętrznej prototypu są parametry spiekania wnętrza warstwy modeli w konfiguracji ścieżki płaskiej i budowy wzdłuż osie pionowej. Dla przykładu firma EOS opracowała system naświetlania, w którym naświetlanie odbywa

się w układzie matrycy kwadratów (jeżeli kształt przekroju na to pozwala) połączonych pasami (fugami czy szpaltami). Kwadraty spiekane są w pierwszej kolejności zgodnie z założonym porządkiem spiekania. Najpierw spiekane są kwadraty o takim samym kierunku ścieżek spieku z założonej programowo kolejności (rys.2.14). Następnie spiekane są kwadraty których kierunek spiekania ułożony je prostopadłe do pierwszego. Na końcu procesu spajania warstwy naświetlane są pasy łączące (tzw. szpalty czy fugi). O naświetleniu całej powierzchni warstwy w której jest możliwe wyróżnienie kwadratów i fug następuje naświetlenie pozostałej części powierzchni przekroju warstwy.

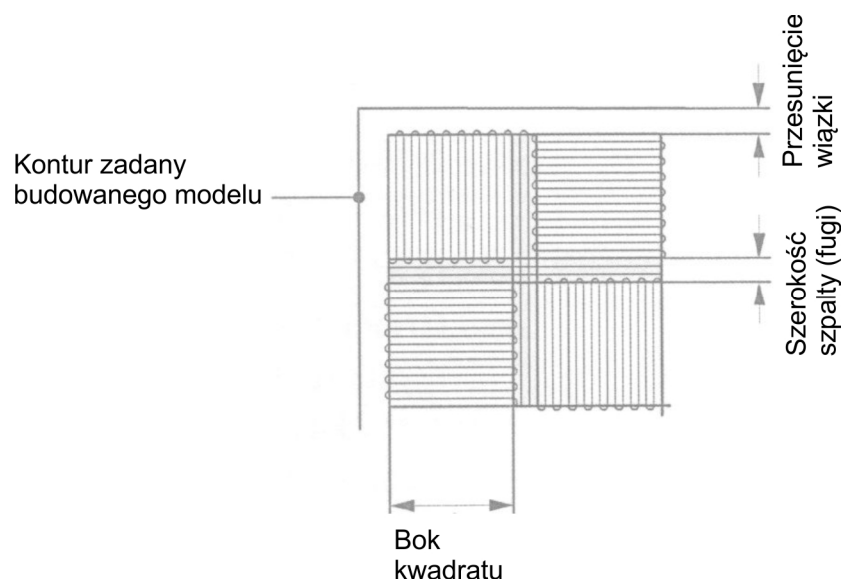


Rys.2.14. Struktura naświetlania warstwy podzielona na kwadraty i szpalty [44,115]

W celu uzyskania jednolitej struktury wewnętrznej prototypu skanowanie warstwy realizowane jest z odpowiednimi zakładkami pomiędzy kwadratami i szpaltami. Szerokość zakładki jest ustawiana za pomocą opcji programu sterującego procesem spiekania. Możliwe jest również wprowadzenie ustawień zakładki z przesunięciem od warstwy do warstwy w kierunkach osi X oraz osi Y urządzenia drukującego (rys.2.15). Ścieżka przejścia wiązki lasera jest realizowana zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku (rys.2.16).



Rys.2.15. Struktura naświetlania zakładki w kolejnych warstwach [44, 115]



Rys.2.16. Widok ścieżki naświetlania wnętrza spiekanej przekroju [44, 115]

Przedstawione tu zostały przykładowe i reprezentatywne opcje procesu spiekania warstw w kontekście wykonania modeli o prawidłowej strukturze i dokładności wymiarowo kształtowej. W zależności od urządzenia i oprogramowania drukarki 3D, liczba opcji może ulegać zmianie, jednak istota procesu spiekania dla większości systemów jest podobna [44].

Naświetlanie wypełnienia powierzchni warstwy ma na celu uzyskanie spójnej warstwy z całym przekroju. W procesie naświetlania wypełnienia system najczęściej dąży do najszybszego spojenia proszku, stąd proces skanowania ścieżki wiązki lasera realizowany jest przy najwyższych prędkościach. Promień lasera przemieszcza się w trybie ciągłego dostarczania energii do budowanej warstwy wewnątrz przekroju wzdłuż równoległych ścieżek.

Biorąc pod uwagę całokształt przeanalizowanych źródeł literaturowych, danych producentów urządzeń pracujących w procesie PBF, norm dotyczących technologii addytywnych oraz katalogów, źródeł internetowych i materiałów branżowych z obszaru lotniczych układów sterowania, pozwala sformułować wniosek, że badania i analizy związane z jakością i degradacją proszków złoża dla procesu PBF w kontekście wytrzymałości elementów cienkościennych poddawanych obciążeniom cyklicznym nie są na obecnym stanie wiedzy rozpoznane w sposób szeroki i wyczerpujący, co może uzasadniać podjęcie tematu badawczego przedstawionego w dysertacji.

3. TEZA, CEL, ZAKRES PRACY

3.1. Teza pracy

Technologie przyrostowe oparte o przetwarzania proszków stopów metali pozwalają na wytwarzanie złożonych geometrycznie obiektów stosowanych w wielu gałęziach przemysłu, a ze względu na możliwości opracowania konstrukcji, dla których dzięki zastosowaniu druku 3D uzyskuje się zmniejszenie masy, potencjał tych technologii jest szczególnie zauważalny w przypadku konstrukcji lotniczych w tym elementów rozdzielaczy hydraulicznych w układach sterowania.

Wstępne analizy dotyczące możliwości zastosowania technologii Powder Bed Fusion (PBF) do wytwarzania korpusów hydrauliki siłowej zwróciły uwagę na pojawiające się różnice we właściwościach wytrzymałościowych elementów wytwarzanych przyrostowo powodowane zmianą udziału porów w strukturze materiału. Analizując czynniki przewidywalne, których charakter został określony jako w pełni kontrolowany, skupiono się na czynnikach obdarzonych przypadkowością. Do czynników przewidywalnych i w pełni kontrolowanych zalicza się: źródło energii w postaci wiązki światła lasera, charakter prowadzenia skanowania kolejnych warstw, warunki panujące w komorze (zawartość tlenu, temperatura, czystość atmosfery ochronnej), sposób ekspozycji kolejnych warstw proszku (recoater ceramiczny). Do czynników nieprzewidywalnych zakwalifikowano morfologię proszku a ściślej ujmując jego degradację. Degradacja złoża proszkowego została sklasyfikowana jako główny czynnik powstawania porów w otrzymywanych strukturach.

Biorąc to pod uwagę można sformułować tezę pracy, która mówi, że parametry procesu przyrostowego oraz degradacja po procesowa złoża proszku stali 1.2709 dla spajania tego proszku metodą Direct Metal Laser Sintering (DMLS) wpływają istotnie na wytrzymałość elementów cienkościennych, szczególnie w obszarze wytrzymałości zmęczeniowej obiektów poddawanych obciążeniom zmiennym pochodzącym od wymuszenia hydraulicznego.

3.2. Cel pracy

Celem pracy jest znalezienie zależności pomiędzy parametrami procesu przyrostowego DMLS w tym degradacji złoża a wytrzymałością elementów cienkościennych, w odniesieniu do modelu stosowanego w elementach lotniczej hydrauliki siłowej. Realizacja badań doświadczalnych pozwoli na opracowanie założeń metodyki badawczej próbek wytrzymałościowych oraz w końcowej fazie realizacji prac badawczych metodyki wytwarzania prototypów rozdzielaczy hydraulicznych przeznaczonych od samolotowych systemów sterowania. Metodyka ta planowana jest docelowo jako element wdrożenia przemysłowego, ze względu na realizację prac badawczych w ramach projektu „doktorat wdrożeniowy”.

3.2. Zakres pracy

Zakres pracy związany jest z realizacją jej celów i obejmuje kolejno:

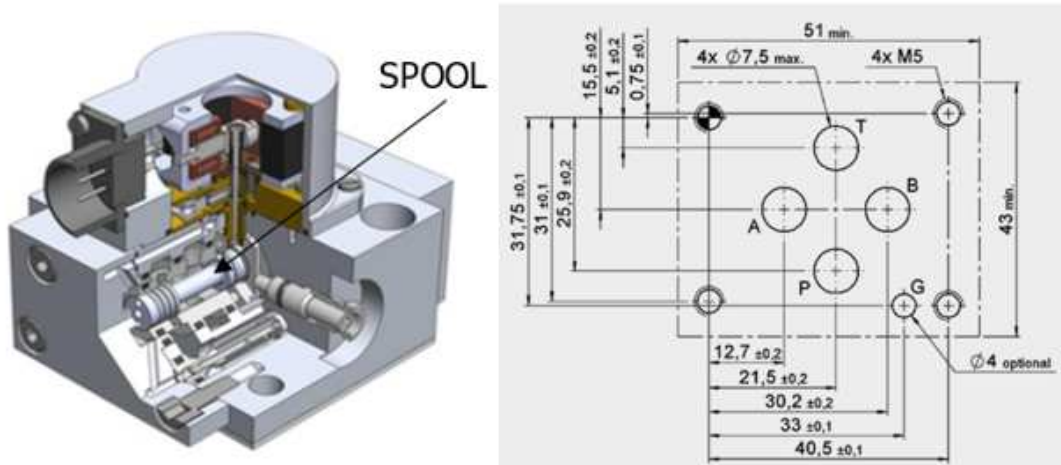
1. Analizę stanu zagadnienia w tym przedstawienie dostępnych technologii przyrostowego spajania proszków metali,
2. Charakterystykę materiałów stosowanych w procesach PBF, ze szczególnym uwzględnieniem stali 1.2709 z rodziny stali maraging,
3. Sformułowanie problemu badawczego w postaci tezy na podstawie analizy stanu zagadnienia,
4. Opracowanie metodyki badawczej oraz zaprojektowanie i wykonanie próbek badawczych,
5. Przeprowadzenie badań porowatości, wytrzymałości statycznej, wytrzymałości zmęczeniowej próbek badawczych wykonanych w procesie DMLS,
6. Badania próbek w cyklu obrotowo-giętym oraz badania próbek cylindrycznych obciążanych zmiennym ciśnieniem o charakterze zmęczeniowym,
7. Badania morfologii proszku złoża użytego do wydruku pojedynczej platformy roboczej,
8. Opracowanie analizy otrzymanych wyników z prób z badań zmęczeniowych do odpowiadających im badań morfologii proszku,
9. Opracowanie założeń metodyki wytwarzania elementów cienkościennych pracujących w warunkach zmiennych obciążeń ciśnienia czynnika roboczego z zastosowaniem procesu DMLS przy uwzględnieniu procesów degradacji złoża proszkowego,
10. Sformułowanie wniosków o charakterze naukowym i użytkowym.

4. OBIEKT BADAWCZY I METODYKA BADAŃ

4.1. Obiekty badawcze

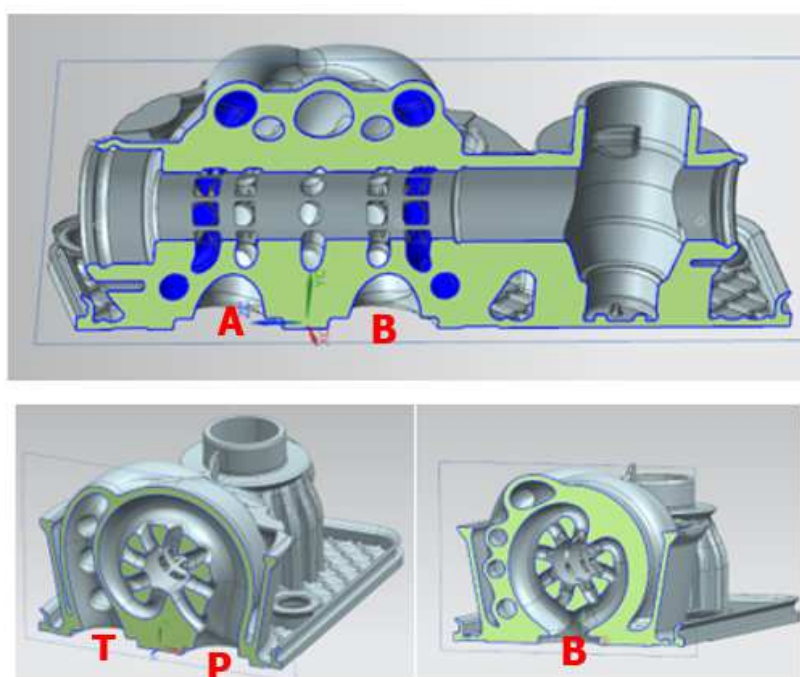
Przedmiotem badań jest korpus serwowaloru hydraulicznego wykonany z zastosowaniem technologii Powder Bed Fusion (PBF) oraz wykonane równolegle na wspólnej platformie startowej zestawu próbek badawczych. Obiekt badań sam w sobie jest etapem prototypowania i realizacji procesu wdrażania do produkcji korpusów serwowalorów uzyskiwanych w technologii Direct Metal Laser Sintering (DMLS) w firmie YASA. W ramach realizacji badań określono, że właściwości otrzymanych prototypów w procesie DMLS można oceniać wskaźnikami zmęczeniowymi i wytrzymałościowymi. Aby określić ich wartości należy zwrócić uwagę na zespół czynników wpływających na ich kształtowanie. Pomijając czynniki niezmiennie w trakcie procesu produkcyjnego takie jak skład chemiczny stopu sproszkowanej stali 1.2709, geometrię modelu, sposób przygotowania struktury do druku, struktury wsparcze, proces DMLS oraz zabiegi post procesowe, badaniom i analizie poddano wpływ właściwości złoża proszkowego w aspekcie morfologii na uzyskiwane metodą druku 3D modele badawcze [17].

Korpus serwowaloru został wykonany na podstawie modelu numerycznego 3D-CAD. Opracowanie modelu numerycznego do symulacji z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych – MES zostało wykonane w ramach prac zespołu badawczego firmy YASA. Model numeryczny jest wynikiem przeprowadzonej analizy przepływów czynnika roboczego (olej hydrauliczny o klasie lepkości HLP32) poprzez sekcje robocze serwowaloru oznaczone jako porty przyłączeniowe wg oznaczeń jak na rysunku (rys.4.1. i rys.4.2.)w konfiguracji przepływu czynnika roboczego od portu P do portu A; od portu P do portu B; od portu A do portu T i od portu B do portu T, przy zachowaniu cech geometrycznych istniejącego już na rynku serwowaloru hydraulicznego wykonanego w technologii klasycznej, ubytkowej. Modelem wyjściowym z zachowaniem wartości przepływów i spadku ciśnienia oraz rozmiaru zastosowanych przyłączy był zawór firmy MOOG typ G771 (rys.4.1.). Serwowalory wykonane technikami ubytkowymi poprzez frezowanie i wiercenie to najczęściej bloki stali odpowiednio nawiercone tak by ukształtować pożądany przepływ czynnika roboczego. Głównym elementem konstrukcji jest otwór w którym pracuje element o nazwie rozdzielacz (ang. Spool). Jego zadaniem jest otwieranie i zamykanie przepływu czynnika roboczego (oleju) w oczekiwany i zadany sposób. Kanały doprowadzające, czyli wiercone otwory, przecinają się najczęściej pod kątem prostym tworząc labirynt tuneli odpowiednio zaślepianych i doprowadzających olej z ustandaryzowanej powierzchni płyty przyłączeniowej. Sama płyta stanowi rodzaj interfejsu będącego elementem architektury instalacji układu hydraulicznego. Pozwala na szybką wymianę samego serwowaloru bez ingerencji w instalację.



Rys. 4.1. Klasyczny serwowawór wraz z rysunkiem płyty przyłączeniowej i oznaczeniem portów [86]

Badany korpus serwowaworu hydraulicznego jest wykonany w rozmiarze standardu ISO4041-03-02 NG6 [61], jednak dzięki możliwościom jakie oferuje technologia PBF został w toku analizy przepływów i optymalizacji topologicznej „odchudzony”. Obszary topologii korpusu serwowaworu, w których nie odnotowano naprężeń wynikających z warunków pracy zostały zredukowane. W efekcie powstała konstrukcja spełniająca wymagania geometryczne zgodne z standardem NG6 oraz cechująca się minimalnymi wymaganymi grubościami ścianek. Na załączonym rysunku (rys.4.2.) przedstawiono przekroje obrazujące umiejscowienie portów przyłączeniowych A, B, P, T i pogląd na architekturę kanałów wewnętrznych[17].

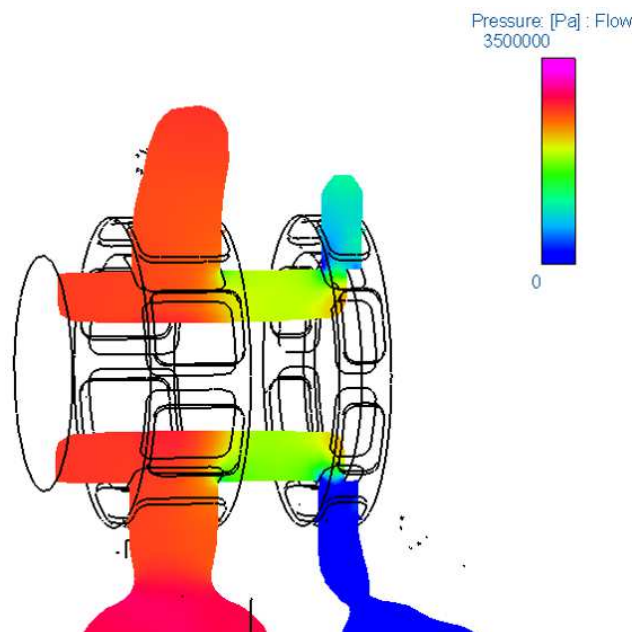


Rys. 4.2. Model 3D-CAD i przekrój serwowaworu w standardzie NG6

Model numeryczny do wykonania analiz przepływów i analizy wytrzymałości został zbudowany z wykorzystaniem warunków początkowych i brzegowych wynikających z:

- Wymiarów standardu NG6.
- Właściwości czynnika roboczego olej hydrauliczny klasy HLP32.
- Maksymalny wymagany przepływ 50 l/min przy dopuszczalnym spadku ciśnienia $\Delta P=7\text{MPa}$ pomiędzy wejściem a wyjściem serwozaworu.
- Maksymalne ciśnienie czynnika roboczego 35MPa.
- Sposobu sterowania; zawór bezpośredniego sterowania (directcontrolvalve).

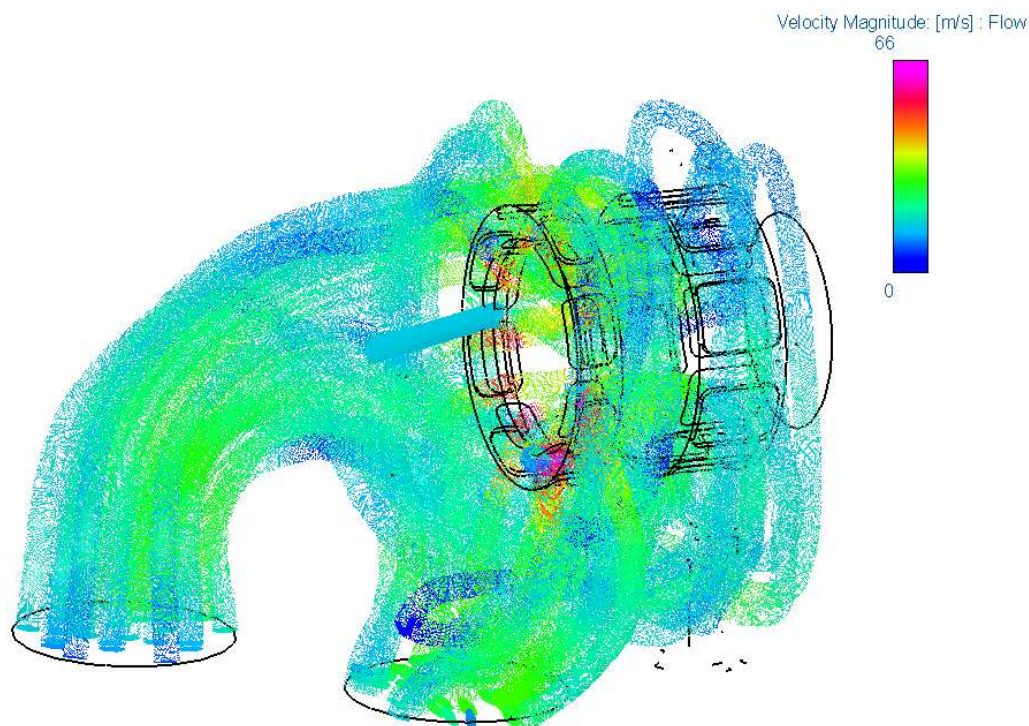
W wyniku przeprowadzonych wieloetapowych analiz najpierw przepływów a następnie wytrzymałości konstrukcji otrzymano zbiór danych pozwalających wstępnie oszacować właściwości konstrukcji. Głównym założeniem była eliminacja masy zbędnej z punktu widzenia funkcjonalności oraz zachowanie warunków przepływu medium roboczego. Analiza wartości przepływu wykonana została z użyciem oprogramowania PumpLinx®. Na rys.4.3. przedstawiono graficznie spadek wartości ciśnienia w konfiguracji dla przepływu portów od T do A. Z uwagi na wprowadzony zabieg zrównoważenia sił wynikających z oddziaływania oleju na rozdzielacz poprzez ich podzielenie na dwie przeciwstawne sekcje, wartości przepływu dla pary portów T do A są identyczne jak dla pary T do B jednak kierunki sił oddziaływujących na element rozdzielacza zwrócone przeciwnie. Zabieg ten pozwala zrównoważyć wspomniane siły. Modelowanie prowadzono dla jednej z sekcji i co za tym idzie dla ΔP 3.5 MPa. Zadane ciśnienie 3.5MPa stanowi połowę wartości ΔP 7.0 MPa. Z uwagi iż sekcja przepływu z portu T do B jest symetryczna, sumaryczny spadek ciśnienia na konstrukcji jest zgodny z warunkiem ΔP 7.0 MPa.



Rys. 4.3. Rozkład ciśnienia w obszarze lewej sekcji rozdzielacza przy modelowanym ΔP 3.5 MPa

Badanie to pozwoliło określić geometrię otworów przepływu czynnika roboczego (tzw. okienek), ich liczbę i ustawienie w celu określenia strat przepływu w przedziale nie większym niż założonym dla danego systemu sterowania czynnika roboczego.

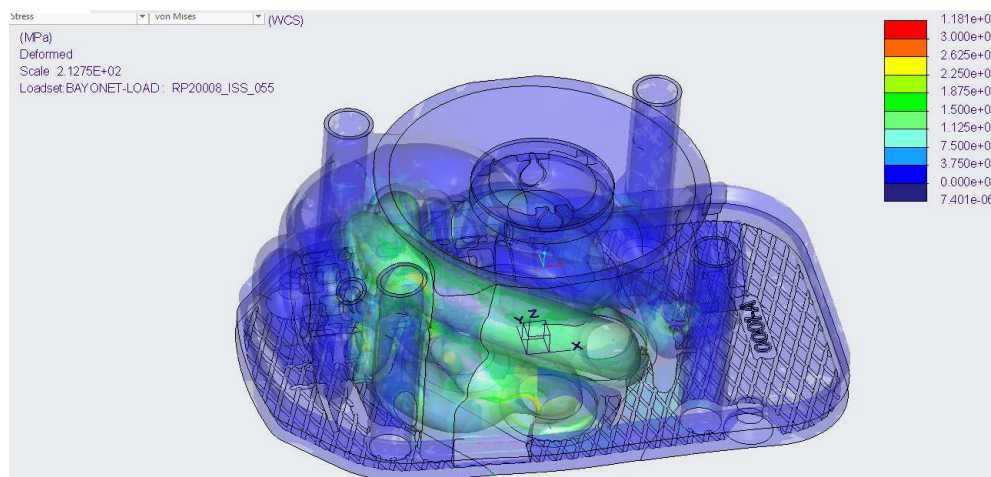
W kolejnym etapie dokonano symulacji szybkości przepływu czynnika roboczego. Zgodnie z założeniami przepływ, głównie w strefach przy krawędziowych współpracujących z rozdzielaczem, nie powinien być niższy niż zakładane 50 l/min przy zakładanym ΔP 7.0 MPa i pełnym otwarciu. Na (rys. 4.4.) zobrazowano graficznie obszary szybkości przepływu.



Rys. 4.4. Graficzny rozkład wartości przepływu dla sekcji prawej rozdzielacza

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że konstrukcja spełnia założenia. Uzyskano przepływ na poziomie 63,36 l/min. Wartości dotyczą analizy w której nie uwzględniono chropowatości kanałów prowadzących czynnik roboczy a zatem istnieje pewien zapas na ewentualny spadek przepływu wywołany jakością wykończenia powierzchni

Po zweryfikowaniu warunków przepływu przystąpiono do analizy wytrzymałościowej korpusu serwowozoru. Analizę przeprowadzono w oprogramowaniu CREO. Warunki analizy: ciśnienie znamionowe wynosiło 35MPa. Na podstawie wykonanej analizy nie stwierdzono naprężeń przekraczających wartość 300MPa dla całego obszaru konstrukcji. Na rysunku 4.5 przedstawiono graficznie rozkład naprężeń panujących w badanym bloku serwowozoru.

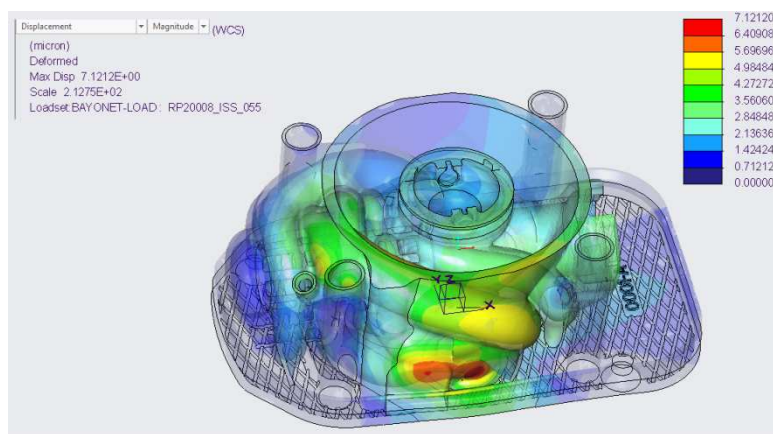


Rys. 4.5. Rozkład naprężeń w konstrukcji bloku serwozaworu

Przeprowadzone badania MES w zakresie wytrzymałości dodatkowo pozwoliły, na drodze kolejnych przybliżeń, wyeliminować obszary przetężeń materiałowych nie istotnych w aspekcie wytrzymałościowym.

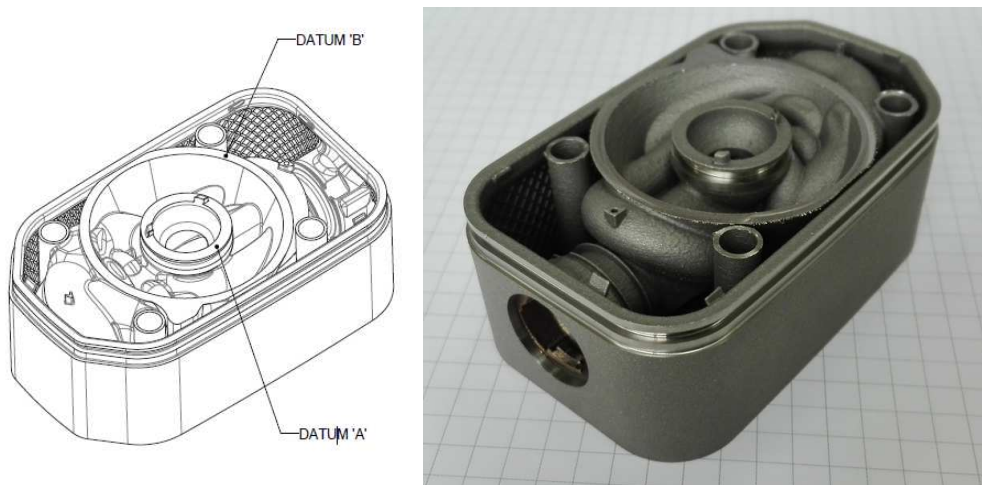
W kolejnym kroku pozostało zweryfikować parametry odkształcenia konstrukcji przy uzyskanym ciśnieniu testowym 35 MPa. Jest to zabieg istotny z uwagi na współpracujące ze sobą powierzchnie cylindryczne wewnętrznego otworu w korpusie i zewnętrznego elementu rozdzielacza. Dla zachowania niskich przecieków wewnętrznych i minimalnych sił tarcia pomiędzy elementami stosuje się pasowanie z luzem w granicach od 4-10 μ m. Kolejnym istotnym czynnikiem jest siła z jaką należy mocować zawór poprzez zestaw 4 śrub M5 do płyty przyłączeniowej. Przeniesienie napięcia wstępnego połączenia gwintowego również nie powinno odkształcać konstrukcji.

Dokonano analizy odkształcenia przy zadanym obciążeniu ciśnieniem 35 MPa(rys.4.6.). Analiza została wykonana również za pomocą oprogramowania CREO. Odkształcenia na poziomie 7,121 μ m znajdują się poniżej odkształceń postaciowych i są zlokalizowane w obszarze, który nie ma wpływu na warunki pracy elementów współpracujących.



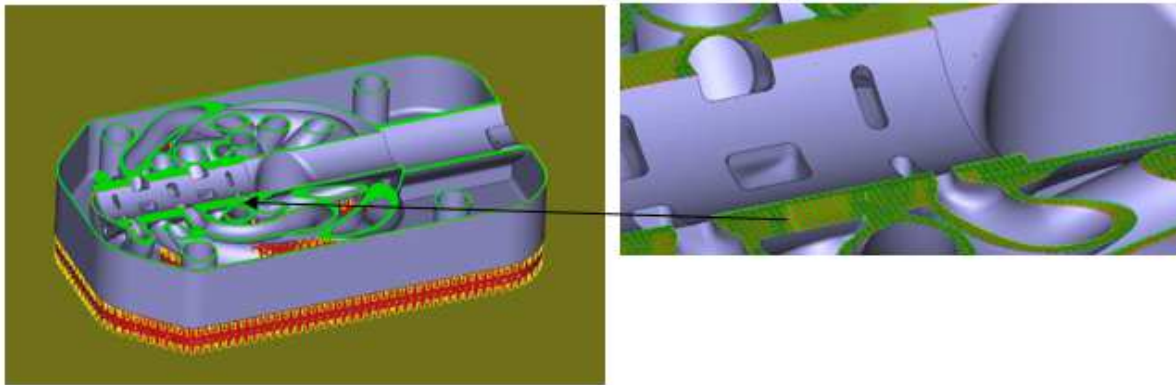
Rys. 4.6. Graficzny rozkład odkształceń

Na podstawie przeprowadzonych prac konstrukcyjnych i analitycznych w toku kolejnych iteracji do wykonania został zakwalifikowany korpus serwozaworu RL050 (rys.4.7.) [39,40,41,48] . Cechuje się on niską masą i minimalnymi grubościami ścianek kanałów prowadzących ciśnienie robocze. Korzystnym efektem prowadzonych analiz i modelowania przepływu okazał się obszar kanałów wewnętrznych. Dzięki zastosowaniu technologii PBF stało się możliwym wykonanie kształtów kanałów zgodnych z wynikami otrzymanymi z analiz i dzięki temu zredukowano obszary prostokątnych i ostrych przejść eliminując w ten sposób zjawiska kawitacji[68, 69, 70, 79, 81, 82, 83].



Rys. 4.7 Model 3D-CAD i zdjęcie korpusu serwozaworu RL050

Tak otrzymany model numeryczny (obiekt przestrzenny 3D-CAD) został skonwertowany na model powierzchniowy typu STL (ang. stereolithography). W kolejnym kroku obiekt w postaci pliku STL został zaimportowany do środowiska MAGICS firmy MATERIALISE. Jest to zaawansowane oprogramowanie technologiczne do przygotowania strategii druku 3D. W swojej strukturze zawiera moduły do importu, analizy spójności struktury pobieranych modeli, edycji właściwości takich jak skalowanie i niewielkie korekty sieci modelu powierzchniowego. Moduł do generowania niezbędnych struktur wsporczych korzysta z różnych rodzajów dostępnych z biblioteki podparć. Automatyczny kreator struktur wsporczych jest parametryzowany wg. wymagań jakie stawia obrabiany model jednak technolog ma zawsze możliwość wprowadzić własne modyfikacje dla każdej z wybranych struktur wsporczych. Finalizującym modułem oprogramowania MAGICS jest moduł do cięcia obiektu STL na płaszczyzny równoległe do powierzchni płyty startowej. Powierzchnie te stanowią zbiór płaskich przekrojów kolejnych następujących warstw. Każda warstwa zawiera definicję konturów zamkniętych oraz pola powierzchni zawarte między nimi wypełnione liniami określającymi strategię skanowania. Na rysunku (rys.4.8.) przedstawiono pojedynczą warstwę stanowiącą płaszczyznę ze strategią druku 3D [85, 86, 87, 89, 91, 92, 95].



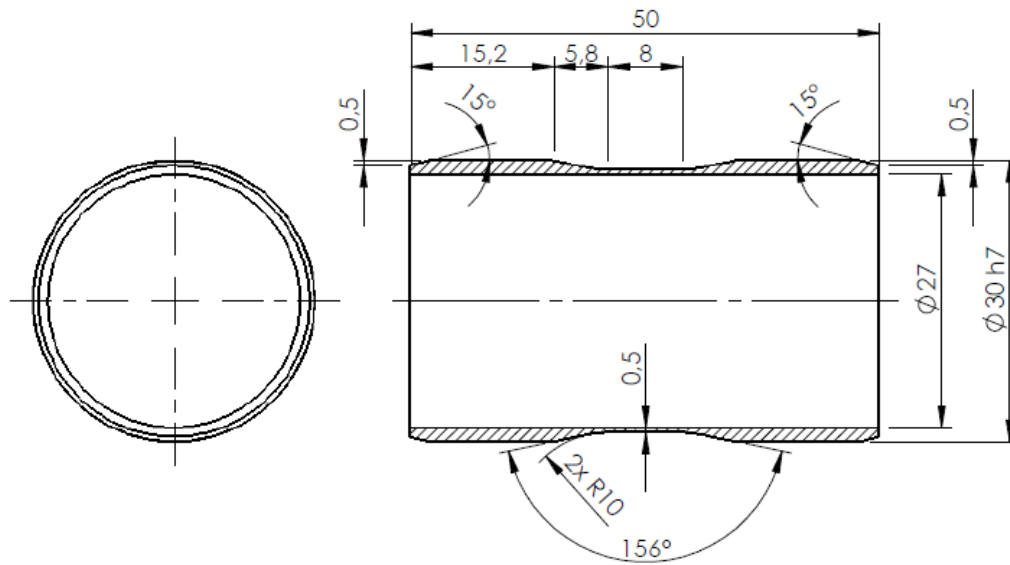
Rys. 4.8. Model numeryczny w procesie symulacji wydruku 3D i pojedyncza warstwa oznaczona kolorem zielonym wraz z powiększeniem obszaru skanowania po prawej stronie

Przygotowany plik wydruku wraz ze strukturami wsporczymi odpowiednio pocięty na warstwy o wymaganej grubości ($50\mu\text{m}$) jest już niemal gotowy do rozpoczęcia procesu wydruku. Ostatnim etapem w ramach przygotowania obiektu badawczego jest przesłanie go do środowiska maszyny EOS M290. Po załadowaniu pliku do oprogramowania maszyny należy jeszcze wybrać konfigurację odpowiadającą rodzajowi użytego materiału proszkowego. Pliki konfiguracyjne stanowią bibliotekę parametrów określających parametry procesu skanowania. Z uwagi na specyficzne wymagania konstrukcji cienkościennej parametry do wydruku serwozaworów zostały dobrane w trakcie badań wstępnych. Dobrano tak wartości mocy, czasu skanowania wiązką lasera, odległości pomiędzy kolejnymi liniami skanowania, grubość warstwy aby otrzymywane struktury po wydruku nie ulegały odkształceniom termicznym, cechowały się ciągłością i jednorodnością. Dodatkowo badania wstępne prowadzono tak by uzyskane nastawy pliku konfiguracyjnego dla stali 1.2709 pozwoliły zminimalizować występowanie porów w mikrostrukturze. Zestaw dobranych parametrów posłużył do wykonania procesu DMLS obiektu badawczego w postaci korpusu serwozaworu [125, 126].

Ponieważ badania zmęczeniowe i wytrzymałościowe samej konstrukcji serwozaworu wymagają sfinalizowania procesu obróbki i montażu zasadnym okazało się weryfikowanie jakości uzyskiwanych wydruków poprzez drukowanie próbek weryfikacyjnych wraz z modelami korpusów. Stanowią one swego rodzaju markery określające właściwości pojedynczej płyty z wydrukami. Pozwalają na szybką weryfikację partii wydruków pod kątem wytrzymałości zmęczeniowej.

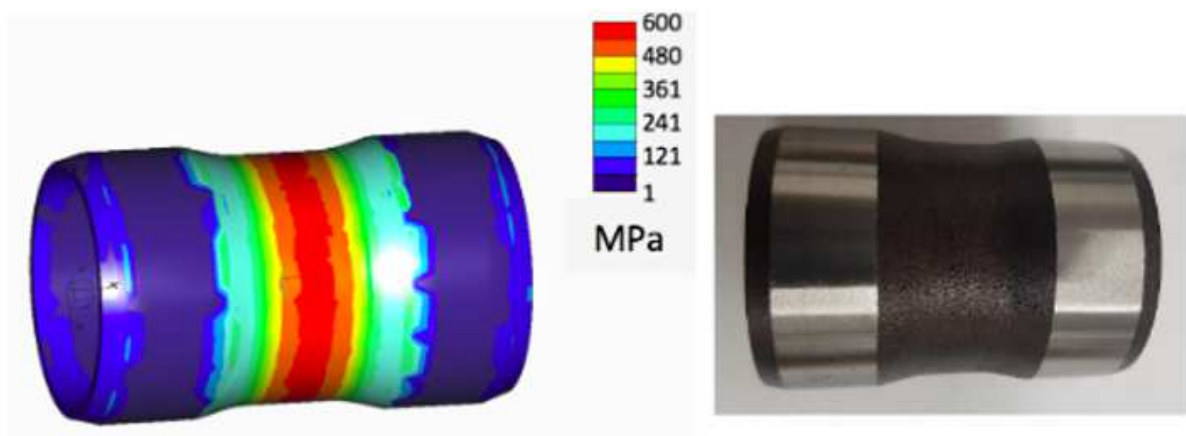
W ramach badań wstępnych określono, że badania zmęczeniowe obiektów cienkościennych stanowią najlepsze rozwiązanie weryfikacyjne. Wybrano dwa rodzaje próbek z określoną geometrią. Pierwszy rodzaj stanowią próbki do badań zmęczeniowych ciśnieniowych(rys.4.9.) a drugi próbki do badań obrotowo giętych(rys.4.11.)

Próbki rurowe cienkościenne do ciśnieniowych badań zmęczeniowych zaprojektowano wg wytycznych normy ISO/TR10771-2 [42].



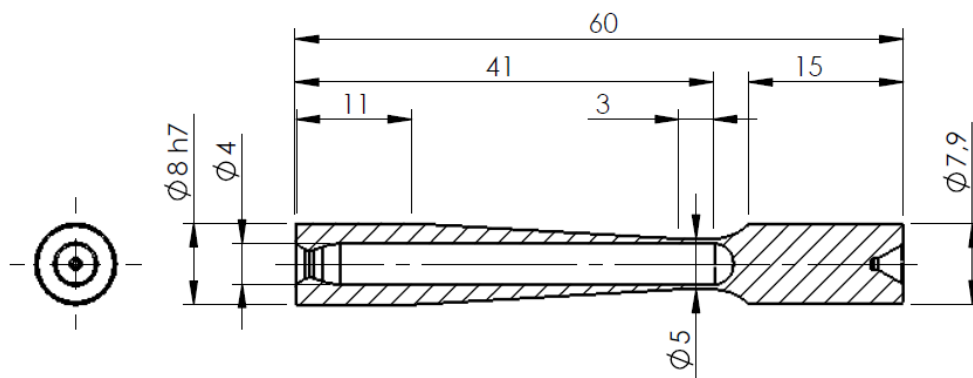
Rys. 4.9. Szkic próbki do ciśnieniowych badań zmęczeniowych

Grubość ścianki w strefie przewężenia wynosiły 0.5 mm. Grubość ścianki dobrana została w procesie analizy MES. Dla zadanego ciśnienia 10.5 MPa naprężenia wewnętrzne w strefie testowej kształtują się na poziomie 314 MPa. Jakość wykończenia: powierzchnie uszczelniane szlifowane, strefa testowa pozostawiona w stanie po wydruku DMLS aby odwzorować warunki powierzchni powstałe w konstrukcji serwowaworu (rys. 4.10) [99, 101, 102, 105, 108].



Rys. 4.10. Po lewej rozkład naprężeń w modelu próbki do ciśnieniowych badań zmęczeniowych, po prawej próbka rzeczywista

Próbki do badań zmęczeniowych w cyklu obrotowo giętym zostały zaprojektowane wg wytycznych normy ISO 1143:2010(E)[34]. Próbki wydrukowane w ramach nadzorowania procesu wydruku wraz z drukowanymi korpusami serwozaworu. Tego rodzaju próbki stanowią dodatkową metodę do analizy wytrzymałości zmęczeniowej. Wydrukowane wraz z próbkami do testów zmęczeniowych ciśnieniowych. W miejscu minimalnego przekroju grubość ścianki wynosiła 0,5 mm (rys. 4.11.). Powierzchnie cylindryczne szlifowane były w celu dopasowania do elementów stanowiska badawczego. Strefa badana pozostawiona w stanie po wydruku.



Rys. 4.11. Szkic próbki do badań w cyklu obrotowo giętym

Zarówno próbki do ciśnieniowych badań zmęczeniowych jak i próbki do badań obrotowo giętych zostały poddane obróbce cieplnej. Zadaniem obróbki było ujednoczenie struktury i podniesienie twardości do wartości 52 HRC. Proces wykonano w piecu elektrycznym. Wsad został rozgrzany na wskroś do temperatury 490°C i pozostawał wygrzewany przez 6 godzin zgodnie ze specyfikacją dla stali maraging 1.2709 [52,53,55,60,64]. Studzenie odbyło się poprzez swobodną konwekcję do otoczenia i przebiegało bez gazów osłonowych. Wszystkie próbki po procesie obróbki cieplnej zostały poddane obróbce szlifowania powierzchni uszczelniających i pasowanych wymaganych przez elementy montażowe aparatury badawczej.

W celu określenia jakości wydruku i powiązania go z ewentualnymi wadami zmęczeniowymi uzyskiwanych struktur dokonano weryfikacji jakości wydruku na podstawie parametru porowatości. Obiektem do wykonania tych badań były sześciennie kostki. Stanowią one materiał analityczny do wykonania analizy metalograficznej. Są to bloki o wymiarach 10x10x10mm (rys. 4.12.). wykonane równolegle w trakcie procesu drukowania właściwych korpusów serwozaworów. Próbki te również zostały poddane obróbce cieplnej. W ramach badań metalograficznych próbki sześciennie zostały inkludowane w znormalizowanym krążku

do badań i poddane stopniowej obróbce szlifowania do uzyskania powierzchni lustrzanej.



Rys. 4.12. Sześcienne kostki do badań mikrostruktury i porowatości

Ostatnim obiektem badawczym związanym z konkretną serią produkcyjną jest próbka proszku do badań. Próbka jest ściśle związana z konkretnym wydrukiem stanowiącym pojedynczą płytę elementów drukowanych produkcyjnie jest więc to próbka proszku złoża proszkowego uczestniczącego w procesie. Próbka ta, to około 10g proszku pobranego z powierzchni złoża proszkowego do sterylnego woreczka strunowego wraz z oznaczeniem numeru platformy wydruku (rys. 4.13.). Stanowi ona odniesienie uzyskanych wydruków do właściwości morfologicznych proszku.



Rys. 4.13. Miejsce poboru proszku do badań złoża i próbki pobranego proszku złoża PBF

Próbki pobierano systematycznie z każdego złoża proszkowego przygotowanego do kolejnego procesu wydruku za pomocą miareczki 10 ml. Materiał do badań pochodził z powierzchni znajdującej się w centralnej części przestrzeni zasypowej rezerwuaru proszku do produkcji (rys. 4.13.). Z spośród zebranej liczby próbek wyselekcjonowano do badań próbki charakteryzujące się określonym stopniem degradacji proszku tej samej stali 1.2709. Wyszczególniono 4 charakterystyki opisujące sposób przygotowania złoża proszku do druku i przeanalizowano stopień występowania charakterystycznych frakcji proszku. Za charakterystyczne uznano

frakcje kuliste w rozmiarach od 0-35 μ m, 35-55 μ m i powyżej 55 μ m, frakcje globularne o identycznych parametrach rozmiarowych oraz uznane jako wtrącenia i zanieczyszczenia cząsteczki proszku ujawniane w trakcie analiz złoza.

4.2. Metodyka badawcza

Z uwagi na charakter prowadzonej pracy związanej z projektem „doktorat wdrożeniowy” oraz specyfikę rozprawy doktorskiej badania są efektem pracy nad prototypem planowanym do wprowadzenia do produkcji seryjnej korpusów serwowzorów hydraulicznych drukowanych 3D. Metodyka badawcza ma charakter dwuetapowy. Etap I to badania nad wykazaniem i potwierdzeniem zasadności zastosowania druku 3D – PBF w prototypowaniu i produkcji elementów hydrauliki siłowej w tym korpusów serwowzorów. Etap II to badania potwierdzające zasadność wyboru wskazanej technologii addytywnej w produkcji seryjnej. Metodyka badawcza dla tych dwóch etapów różni się z założenia. Metodyka dla etapu I to czas poszukiwania i odkrywania właściwości oraz parametrów procesowych druku 3D PBF w odmianie SLM. Jest to również czas zbierania doświadczeń i określania problemów z jakimi przyjdzie się zmierzyć w przyszłości. Badania dotyczą szerokiego spektrum i mają za zadanie wzbogacić obszar nauki oraz wiedzę konstrukcyjną i technologiczną w zakresie przydatności technologii DMLS w zastosowaniach do hydrauliki siłowej. Metodyka dla etapu II obejmuje czas gdy proces już ustabilizowany a jej celem jest pomiar odchylenia wybranych parametrów wytrzymałościowych obiektów od wyznaczonych wartości średnich. W etapie II krystalizuje się też główna teza pracy, którą jest określenie wpływu jakości złoza proszkowego na właściwości wytrzymałościowe otrzymywanych struktur DMLS.

4.2.1. Analiza procesu przyrostowego SLM

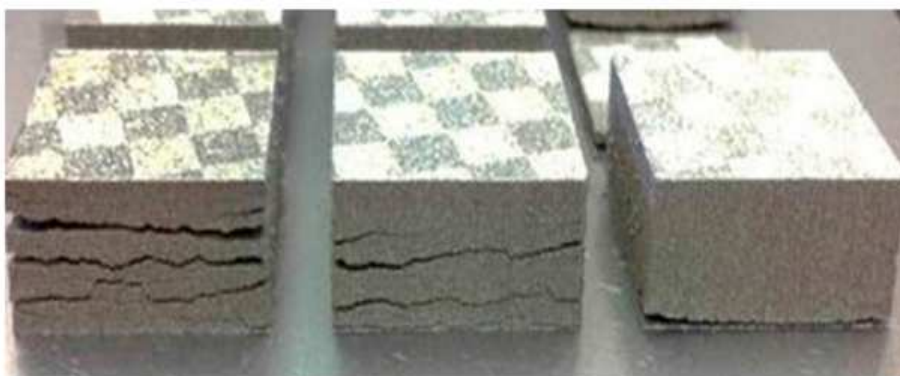
- **Badania porowatości**

W ramach poszukiwania właściwych parametrów wiązki skanowania dla obiektów cienkościennych przeprowadzono badania porowatości otrzymywanych struktur. W pierwszej fazie badań poddano analizie nastawy procesowe dla procesu PBF – SLM, które zapisywano w postaci plików ustawczych. Dla wykonanych wydruków testowych przeprowadzono analizę obecności porów w strukturze w zależności od wartości energii wiązki lasera i odległości pomiędzy liniami skanowania (ang. hatchingdistance). Badania prowadzono przy użyciu systemu PBF SLM250 firmy REALIZER z otwartym modułem parametryzacji pliku materiałowego (rys. 4.14.).



Rys. 4.14. System SLM250 oparty na PBF firmy REALIZER

Urządzenie do druku z proszków metali w technologii SLM, wyposażone w stację przesiewania z sitem $45\mu\text{m}$ do odzysku proszku i z systemem pracy w ochronie argonu. Układ rozprowadzania proszku w postaci gumowego zgarniacza. Rozmiar stołu $250 \times 250 \times 300$ mm. Otwarty dostęp do plików materiałowych. Laser IPG o mocy 400 W i długości fali 1064nm. Oprogramowanie do przygotowania procesu druku pozwalający na edycję strategii hatchingu, wyboru strategii dla pojedynczej próbki, zmianę rozmiaru plamki lasera poprzez zmienną i regulowaną ogniskowa soczewki głównej. Wynikiem prac był zestaw próbek sześciennych o wymiarach $10 \times 10 \times 10$ mm (rys. 4.15.).



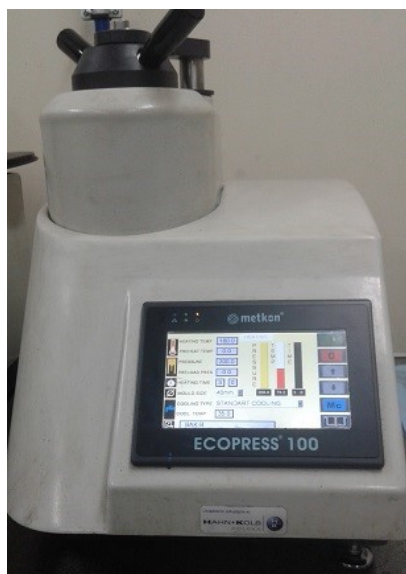
Rys. 4.15. Próbki z procesu doboru parametrów skanowania

Przygotowania próbek do analizy zglądów dokonano na zestawie składającym się z urządzenia do preparacji próbek, polerki i mikroskopu świetlnego. Przygotowanie próbek przebiegało wieloetapowo. Po uzyskaniu próbki do badań z systemu SLM dokonano przecięcia celem ujawnienia struktury w płaszczyźnie równoległej do powierzchni platformy startowej oraz prostopadle do niej. Do cięcia użyto elektrodrążarki drutowej Mitsubishi MV2400 celem zminimalizowania wpływu ciepła. Proces prowadzono w zanurzeniu w wodzie demineralizowanej (rys. 4.16.). Wycinanie elektroerozyjne WEDM to cięcie w środowisku wody destylowanej za pomocą drutu mosiężnego o średnicy 0.25 mm.



Rys. 4.16. Wycinarka elektroerozyjna Mitsubishi MV2400

Uzyskane obiekty zostały zatopione w osnowie do inkludowania próbek. Inkludowanie przeprowadzono na stacji do inkludowania ECOPRESS_100 (rys. 4.17.).



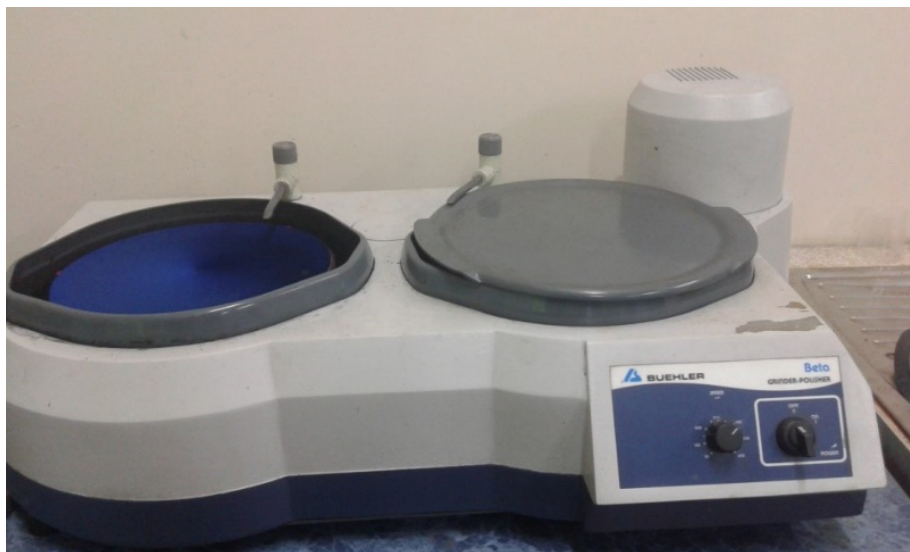
Rys. 4.17. Stacja do inkludowania próbek ECOPRESS_100

Do przygotowania złądów została wykorzystana szlifierka zgrubna FORCIMAT. Dzięki 6 gniazdom obróbkowym pozwala na jednoczesne docieranie 6 próbek w procesie automatycznym. Posiada regulacje siły docisku, obrotów tarczy ścierniej, czasu procesu oraz podajnik emulsji chłodziwo-ścierniej (rys. 4.18.).



Rys. 4.18. Stacja do szlifowania powierzchni zglądu FORCIMAT

Do wykańczającego polerowania zastosowano polerkę dyskową z obrotowym dyskiem firmy BUEHLER typ BETA (rys. 4.19). Materiałem polerującym było sukno polerskie i stopniowo zmniejszane rozmiary cząstek ściernych emulsji polerskiej. W procesie polerowania finalnie przygotowano zgląd do analizy.



Rys. 4.19. Stacja do szlifowania powierzchni zglądu BUEHLER typ BETA

Analizę zglądów metalograficznych prowadzono na mikroskopie świetlnym firmy OLYMPUS BX51M, VEGA 3 (Tescan) (rys. 4.20.).



Rys. 4.20. Mikroskop świetlny OLYMPUS BX51M, VEGA 3

Mikroskop stereoskopowy współpracujący z kamerą cyfrową Olympus SC30, która umożliwiała obserwację materiału na ekranie monitora, a dzięki oprogramowaniu Stream Essential możliwy był precyzyjny pomiar, np. wielkości ziaren. Dzięki temu oprogramowaniu można było także wykonać pomiar procentowego udziału poszczególnych faz w materiale. Ponadto sam mikroskop zaopatrzony był w uchwyt rewolwerowy obiektywów, który umożliwiał łatwą zmianę powiększenia od 50X do 1000X. Wynikiem pracy jest zbiór zdjęć, jak na załączonym rysunku (rys. 4.21.), zglądów metalograficznych z opisem udziału porów w strukturze dla próbek pochodzących z procesu doboru parametrów procesu SLM.



Rys. 4.21. Przykładowy zgląd z badania z widocznymi punktami

Zdjęcia zglądów przedstawiają powierzchnię próbki z widocznymi ciemnymi punktami definiowanymi jako pory w strukturze[125].

- **Badania wytrzymałości w próbie statycznego rozciągania**

Po dokonania wyboru parametrów skanowania dla stali 1.2709 przeprowadzono badanie wytrzymałości. Badanie przeprowadzono w Laboratorium Badań Materiałów Dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej. Próbki badawcze pochodziły z procesu wydruku wykonanego tylko na potrzeby badań wytrzymałościowych. Do badania zostało przekazanych 10 próbek wykonanych w oparciu o normę PN-EN ISO 6982-1[105](rys. 4.22.).



Rys. 4.22. Próбки do badań po procesie SLM

Badania prowadzone były w temperaturze pokojowej na maszynie wytrzymałościowej INSTRON3382(rys.4.23.). Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa z napędem elektromechanicznym, przeznaczona do wykonania badania statycznego rozciągania w temperaturze pokojowej w zakresie obciążenia do 100 kN, oraz badań statycznego rozciągania w temperaturze podwyższonej (150-1100°C) w zakresie obciążenia do 50 kN, w powietrzu lub atmosferze ochronnej.



Rys. 4.23. Stanowisko do badań wytrzymałościowych

Wyniki badań w postaci wykresów rozciągania i wartości R_M , $R_{0,2}$, A , Z , zostały zawarte w raporcie z badań.

- **Badania zmęczeniowe**

Kolejnym badaniem jakie prowadzono dla próbek otrzymanych po procesie doboru parametrów skanowania było badanie w próbie zmęczeniowej wg normy ASTM E466-15 [46,5,27]. Badanie przeprowadzono w Laboratorium Badań Materiałów Dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej. Próbki badawcze pochodziły z procesu wydruku wykonanego na parametrach dostosowanych do wymagań procesu SLM. Do Badania zostało przekazanych 9 próbek wykonanych według ASTM E466-15 [46]. Próbę zmęczeniową prowadzono w temperaturze pokojowej na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8801(rys.4.24). Hydrauliczna maszyna wytrzymałościowa do przeprowadzenia niskocyklowych prób zmęczeniowych cechuje się możliwościami wykonywania prób w temperaturze od -150 do +600°C, prób statycznego rozciągania, zginania i ściskania w zakresie obciążenia do 50 kN w temperaturze do 1100°C, prób statycznego rozciągania, zginania i ściskania w zakresie obciążenia do 100 kN w temperaturze pokojowej (z możliwością sterowania siłą w dwóch zakresach: 0-1 kN oraz 0-100 kN); prób statycznego rozciągania, zginania i ściskania w zakresie obciążenia do 2 kN w temperaturze 1500°C. Dostępne oprzyrządowanie umożliwia prowadzenie badań na próbkach płaskich lub okrągłych (z częścią chwytową gwintowaną lub mocowaną w szczękach bądź uchwytach pierścieniowych). Maszyna wytrzymałościowa wyposażona w ekstensometry dynamiczne i statyczne oraz wideoekstensometr.



Rys. 4.24. Hydrauliczna maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8801: a) widok ogólny, b) uchwyty z zamocowaną próbką

Obciążenie zmienne o przebiegu sinusoidalnym było zadawane z częstotliwością $f=3\text{Hz}$. Próbę zmęczeniową sterowaną naprężeniem, prowadzono w warunkach jednostronnego rozciągania dla wartości współczynnika asymetrii cyklu: $R = 0,05$. Wyniki próby przedstawiono w postaci raportu.

- **Badania trybologiczne**

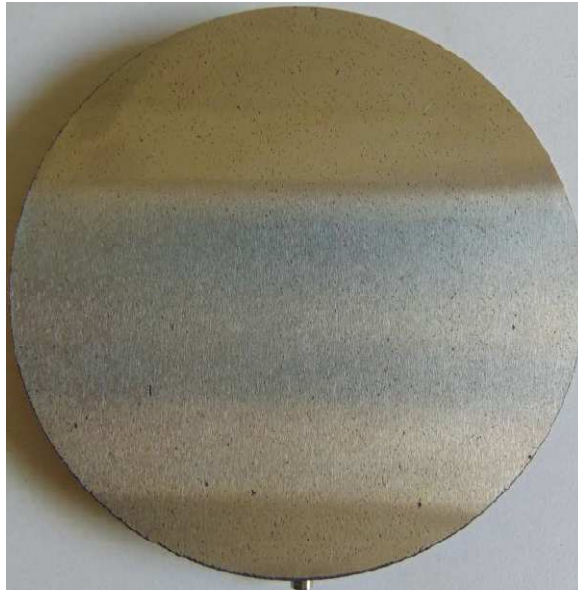
Kolejnym badaniem dla etapu I było badanie własności trybologicznych. Badania zostały wykonane na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Badania trybologiczne zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu testera trybologicznego OPTIMOL SRV 5 służącego do badania zjawisk towarzyszących procesowi poślizgu współpracujących powierzchni. Urządzenie wyposażone było podczas badań w standardowy moduł rotacyjny (rys. 4.25.).



Rys.4.25. Stanowisko badawcze składające się z testera trybologicznego OPTIMOL SRV5 oraz powiększony widok na komorę pomiarową urządzenia, w której zamontowany jest standardowy moduł rotacyjny

Tester OPTIMOL SRV5 wyposażony w moduł rotacyjny jest przeznaczony do badania zjawisk zachodzących podczas poślizgu dwóch współpracujących powierzchni. Badana powierzchnia tarczy (rys. 4.26.) mocowana jest na głowicy obrotowej znajdującej się w dolnej części komory pomiarowej, natomiast przeciwpróbka (w tym wypadku trzpień; rys. 4.27.) mocowana jest w głowicy pomiarowej, której zadaniem jest pomiar sił pojawiających się przy współpracy oddziaływujących ze sobą powierzchni. Parametry monitorowane przez urządzenie w czasie rzeczywistym to:

- temperatura tarczy [$^{\circ}\text{C}$],
- prędkość obrotowa tarczy [obr/min],
- siła docisku trzpienia do tarczy [N],
- siła tarcia [N],
- promień tarcia [mm] (odległość pomiędzy środkiem trzpienia a osią obracającej się tarczy),
- moment tarcia [Nm] (wykorzystywany jedynie przy zjawiskach w których promień tarcia wynosi 0 mm, np. przy tarceniu wiertnym).



Rys. 4.27. Standardowa tarcza wykorzystywana do badań w testerze OPTIMOL SRV5 wykonana ze stali maraging 1.2709 SLM



Rys. 4.27. Trzpień stanowiący przeciw-próbkę dla tarczy wykonany ze stali maraging 1.2709 – SLM

Badane próbki wykonane zostały zgodnie z wytycznymi producenta urządzenia pomiarowego. Ich wymiary to:

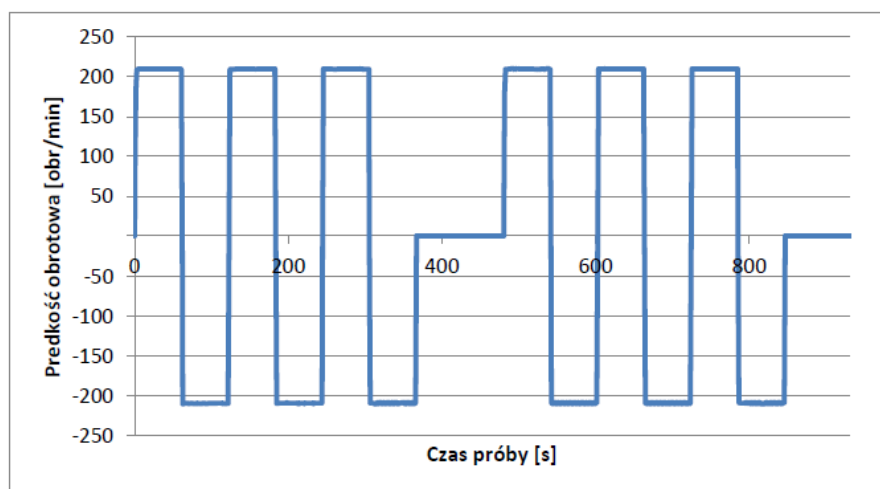
Tarcza:

- Średnica: 100 mm -0,1
- Wysokość tarczy: 10 mm \pm 0,1
- Materiał: stal Maraging nr. 1.2709

Trzpień:

- Średnica: 16mm -0,05
- Wysokość: 12,7 mm +0,3
- Materiał: stal Maraging nr. 1.2709

Badania były przeprowadzane w 2 wariantach: temperaturowym (A) i obciążeniowym (B). W wariacie temperaturowym celem było wyznaczenie oporów ruchu w zależności od temperatury, natomiast w wariacie obciążeniowym badano zależność współczynnika tarcia od siły nacisku na powierzchnie współpracujące. Testy dla każdego wariantu powtarzane były 5-krotnie. Wszystkie testy niezależnie od wariantu przeprowadzone zostały przy stałym promieniu tarcia wynoszącym 25mm. Prędkości obrotowe zostały dobrane tak aby odwzorować prace elementów rozdzielacza hydraulicznego pracującego w korpusie serwowozaworu. W tym celu zastosowano cykle, w których tarcza poruszała się naprzemiennie zgodnie z ruchem wskazówek zegara i przeciwnie w interwałach o czasie 1 min. Zastosowana prędkość obrotowa to 210 obr/min i odpowiednio -210 obr/min. Każdy cykl zawierał 6 interwałów (rys. 4.28.).

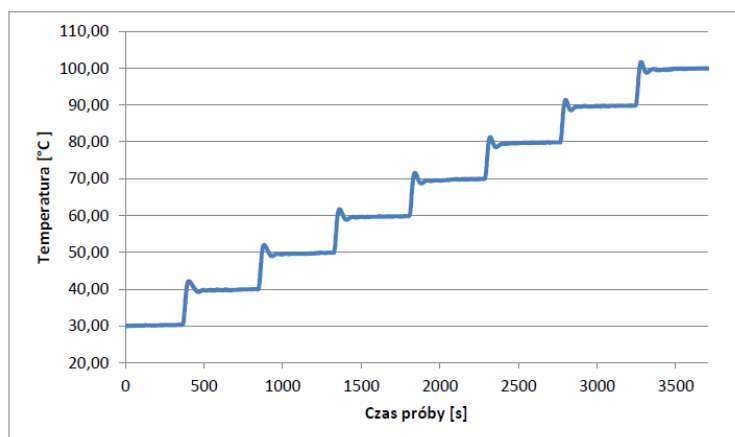


Rys. 4.28. Wykres przedstawiający rozkład prędkości obrotowych w czasie dla 2 cykli wraz z okresami przestoju niezbędnymi na stabilizację temperatury i obciążenia

Na początku testu w miejsce współpracy zostało podane 1,5 ml oleju MIL PRF 5606H o klasie lepkości wg ISO VG 15 stosowanego w układach hydrauliki siłowej. Po każdym cyklu podawane było 0,5 ml oleju celem uzupełnienia braków spowodowanych oddziaływaniem siły odśrodkowej, która powodowała spływanie oleju poza dysk.

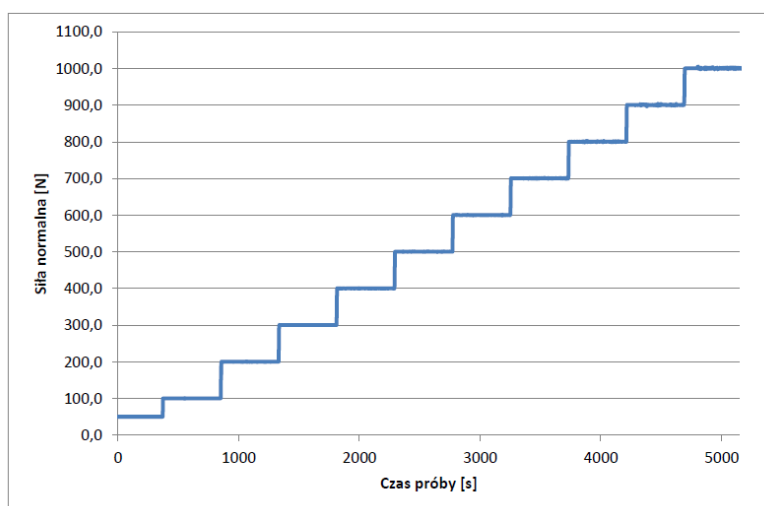
- Wariant temperaturowy (A).
 - Siła normalna: 50 N
 - Temperatura: od 30 °C do 100°C z krokiem 10 °C dla każdego cyklu (rys.4.29.).

Pomiędzy cyklami zastosowano 2 min przerwy celem podgrzania i stabilizacji temperatury w komorze pomiarowej na nowym poziomie.



Rys. 4.29. Przykładowy rzeczywisty przebieg temperatur dla testów w wariacie temperaturowym

- Wariant obciążeniowy (B).
 - Temperatura początkowa: 50 °C
 - Siła normalna: 50 N dla pierwszego cyklu później od 100 N do 1000 N z krokiem 100 N (rys.4.30).



Rys. 4.30. Wykres przedstawiający sposób obciążania skojarzenia trącego w zależności od czasu

Zmierzone opory ruchu przedstawiono na wykresach jako współczynnik tarcia, który obliczany był jako stosunek siły tarcia do siły normalnej oddziałującej na skojarzone pary trące. Zebrane wyniki stanowiły element badań wstępnych. Ich celem było potwierdzenie zasadności zastosowania pary elementów wykonanych w procesie addytywnym stali 1.2709 w konstrukcji serwowozaworu. W odniesieniu do wpływu degradacji złoza proszkowego badań trybologicznych nie rozpatrywano w kontekście degradacji złoza, ponieważ skala porowatości jest niewspółmiernie mniejsza niż wartości chropowatości nadane powierzchni przez obróbkę szlifowania.

- **Badania twardości**

Uzupełnieniem i ostatnim badaniem prowadzonym dla etapu I były badania twardości próbek uzyskanych w procesie SLM dla uzyskanego zestawu parametrów skanowania. Badanie przeprowadzono na twardościomierzu UNIWERSALNYM QNESS 250 (rys. 4.31.). Badaniom poddano próbki po obróbce cieplnej 490°C i 6 h wygrzewania, studzone swobodnie bez ochrony gazów obojętnych. Na wykorzystanym twardościomierzu możliwy był pomiar różnymi metodami, takimi jak metoda Rockwella, Vickersa, czy Brinella. Dla pomiaru daną metodą koniecznym było dobranie odpowiedniego wgłębniaka oraz zastosowanie odpowiedniej siły nacisku wgłębniaka na powierzchnię badaną.



Rys. 4.31. Twardościomierz uniwersalny QNESS 250.

Badania twardości miały za zadanie potwierdzić właściwości twardości próbek otrzymanych w procesie SLM i zastosowanego procesu obróbki cieplnej. Ich wyników nie wiązano z wpływem degradacji złoża proszkowego.

4.2.2. Metodyka badań próbek dla procesu DMLS

W toku przeprowadzonych badań wstępnych dokonano wyboru technologii do druku seryjnego elementów hydrauliki siłowej. Dzięki nim określono warunki jakie powinien spełniać proces docelowy produkcji seryjnej. Na podstawie zebranych danych wyspecyfikowano system do druku 3D oparty na PBF firmy EOS o nazwie M290 (rys. 4.32.).



Rys. 4.32. System M290 DMLS oparty na PBF firmy EOS

Urządzenie do druku z proszków metali w technologii DMLS (Direct Metal Laser Sintering), wyposażone w oddzielną stację przesiewania i odzysku proszku, z systemem pracy w ochronie azotu (wytwornica azotu) lub argonu (z butli gazowej). Układ dozowania proszku zamknięty w strefie komory roboczej, rozprowadzania proszku za pomocą ceramicznego zgarniacza. Laser Yb-fiber, o mocy 400 W i długości fali 1064nm. Rozmiar stołu 250x250x300 mm [14].

Dysponując już doświadczeniem z etapu I zostały określone warunki dla metodyki w etapie II. Określono interesujące obszary monitorowania drukowanych struktur oraz wybrano metodę weryfikacji pozyskiwanych struktur. Z uwagi na charakter otrzymywanych wydruków w badaniach zasadniczych skupiono się na właściwościach wytrzymałościowych dotyczących badań zmęczeniowych znormalizowanych próbek badawczych drukowanych jako próbki weryfikacyjne wraz z elementami części właściwych. Zaprojektowano płytę z kompletem elementów stanowiących części konstrukcji serwozaworu i zestawem próbek badawczych, weryfikujących jakość wydruku. Próbki stanowiły zbiór czterech próbek do badań zmęczeniowych hydraulicznych, czterech próbek do badań zmęczeniowych w teście obrotowo giętym, próbkę sześcienną do analizy mikrostruktury. Dodatkowo z każdej platformy roboczej pobierana była próbka proszku stali 1.2709 do analizy

morfolologicznej stanu złoza proszkowego. Próbki testowe rozmieszczono w narożnikach płyty startowej(rys. 4.33.).



Rys. 4.33. Płyta drukowa komponentów L050: 1 płyta startowa; 2 korpus serwowozaworu, 3 rozdzielacz serwowozaworu, 4 próbka do badań ciśnieniowych, 5 próbka do badań obrotowo-giętych, 6 próbka do badań porowatości, 7 złoże proszkowe

Z pośród wszystkich przedstawionych elementów umieszczonych na płycie startowej tylko komponent nr: 3 – rozdzielacz serwowozaworu nie stanowi obiektu badań. Podsumowując mamy zatem następującą ilość próbek z pojedynczej płyty startowej:

- 4 sztuki próbek do ciśnieniowych badań zmęczeniowych poz. 4
- 4 sztuki próbek do obrotowo-giętych badań zmęczeniowych poz. 5
- 1 sztukę próbki do badań porowatości poz. 6
- próbkę proszku do badań morfologii poz. 7

Ten układ rozmieszczenia pozwolił na wychwycenie niezgodności w obszarach najbardziej narażonych na niezgodności. Wynikało to z warunków prowadzenia źródła energii, ewakuacji gazów procesowych, dystrybucji proszku i osadzania się ewentualnych cząsteczek nie w pełni przetopionych, wyrzucanych w trakcie ekspozycji wiązką lasera. Wszystkie platformy druku były odpowiednio oznakowane i skatalogowane. Tak zebrany materiał stanowił bazę do weryfikacji procesu druku części produkcyjnych elementów hydrauliki siłowej.

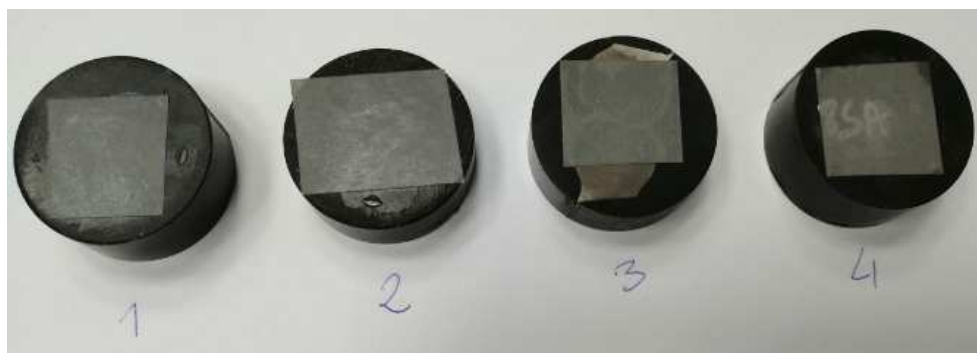
Na podstawie tak zebranego materiału przeprowadzono badania próbek pod kątem wpływu stanu złoza proszkowego na właściwości wytrzymałościowe otrzymanych struktur. Proces badania obejmował trzy procedury badawcze. Procedura I określenie stanu złoza na podstawie analizy morfologii proszku pobranego z procesu wydruku dla określonej platformy wydruku. Procedura II określenie liczby cykli zmęczeniowych obciążenia próbki w procesie badania zmęczeniowego na stanowisku hydraulicznym. Procedura nr III wyznaczenie liczby cykli zmęczeniowych próbki poddanej obciążeniu obrotowo-giętemu. Tak zebrany

materiał badawczy został poddany analizie porównawczej do próbek przebadanych w fazie wstępnej. Z uwagi że faza wstępna badań zawiera kompleksowe wyniki w aspekcie różnych badań zarówno dla próbek drukowanych jak i z materiału uzyskanego tradycyjnie (metalurgicznie) zastosowano weryfikację opartą na wyznaczeniu liczby cykli zmęczeniowych i porównaniu ich do próbek z badań wstępnych. Próbkę poddawano cyklicznemu obciążeniu aż do zniszczenia próbki lub osiągnięcia 1mln cykli.

- **Procedura I: badanie morfologii złoza proszkowego**

Badanie to polegało na określeniu procentowym występowania różnych frakcji geometrycznych proszku użytego do procesu AM. Badanie prowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego OLYMPUS SC30(rys.4.35.).Z pośród zebranych próbek proszku do badań zakwalifikowano próbki (rys. 4.34.) o charakterystyce morfologii wg opisu:

1. Próbka nr 1: Złoże proszkowe w stanie dostawy, proszek EOS MS1.
2. Próbka nr 2: Złoże proszkowe po 10 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowego proszku.
3. Próbka nr 3: Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowym proszkiem.
4. Próbka nr 4: Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu bez wzbogacania nowym proszkiem



Rys. 4.34. Próbki proszku

Wyniki analizy mikroskopowej wprowadzono do tabeli (tab.4.1.).

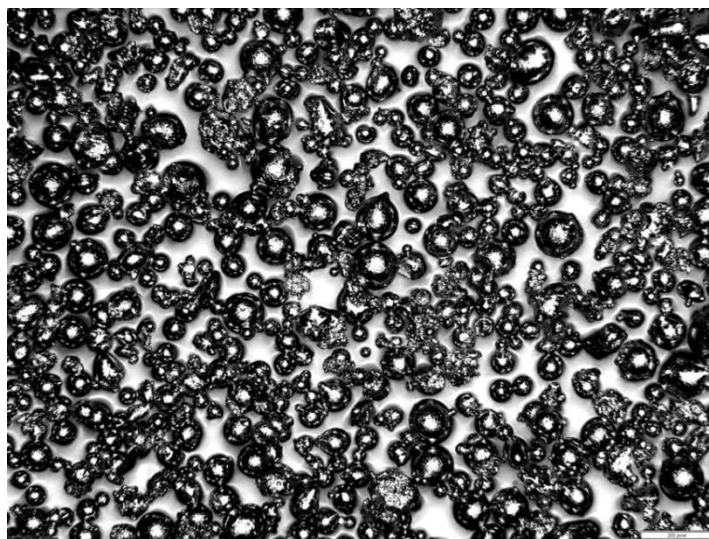
Tab. 4.1. Tabela właściwości proszku

Próbka nr	Opis stanu proszku	Kuliste		Globularne		Wtrącenia zanieczyszczeń	
		rozmiar [μm]	udział [%]	rozmiar [μm]	udział [%]	rozmiar [μm]	udział [%]



Rys. 4.35. Mikroskop świetlny Olympus SC30

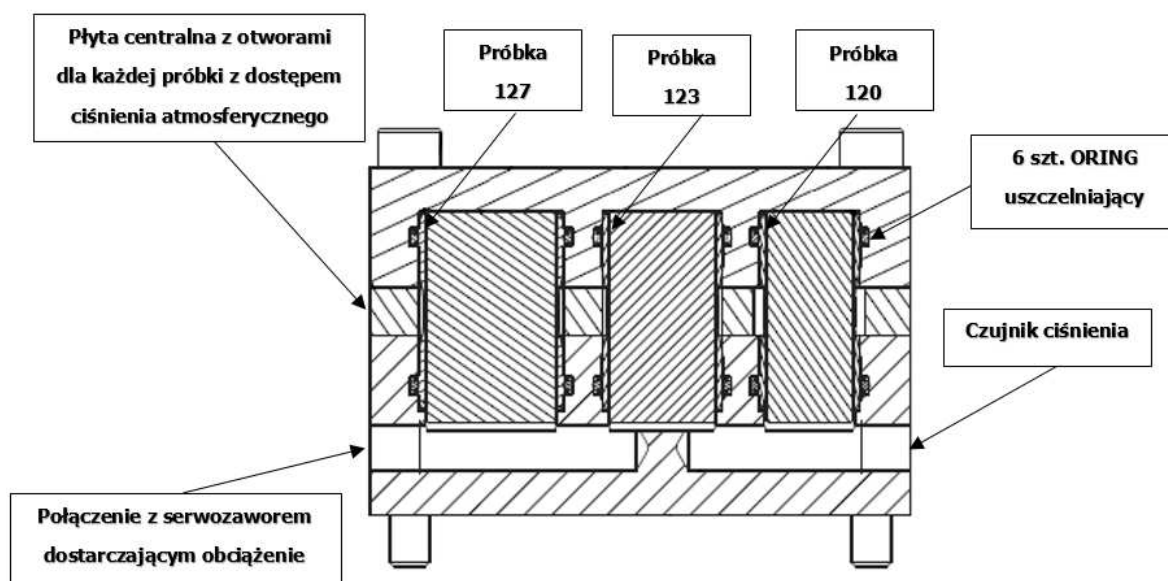
Mikroskop stereoskopowy współpracował z kamerą cyfrową Olympus SC30, która umożliwia obserwację materiału na ekranie monitora, a dzięki oprogramowaniu Stream Essential możliwy był precyzyjny pomiar, np. wielkości ziaren. Dzięki temu oprogramowaniu dokonano pomiaru procentowego udziału poszczególnych faz w materiale. Ponadto sam mikroskop zaopatrzony był w uchwyt rewolwerowy obiektywów, który umożliwiał łatwą zmianę powiększenia od 50X do 1000X. Funkcja aktywnej głębi ostrości pozwoliła uzyskać zadawalające obrazy do analiz. Oprogramowanie dawało możliwość analizy w oparciu o normy: EN ISO 945-1, ASMT A247, JIS G5502, KS D 4302, GB / T 9441. Przykładowy obraz proszku do analizy przedstawia rysunek(rys. 4.36.).



Rys. 4.36 Przykładowy obraz proszku stali 1.2709 otrzymany z mikroskopu do analizy morfologii

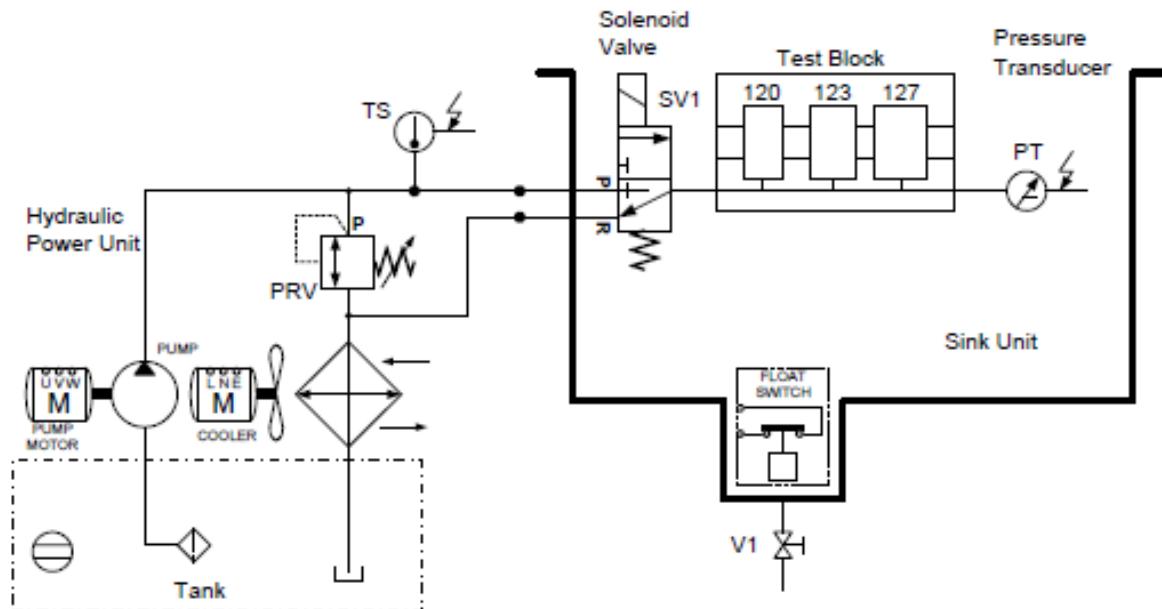
- **Procedura II, badanie zmęczeniowe próbek obciążonych cyklicznie zmiennym obciążeniem ciśnieniowym**

W niniejszym badaniu przeprowadzono próbę zmęczenia impulsowego próbek stali maraging wytworzonych w technologii Additive Manufacturing (AM). Wszystkie wyniki dotyczą próbek w stanie po obróbce cieplnej bez obróbki mechanicznej lub powierzchniowej obszaru badań. Wszystkie badania przeprowadzono na próbkach zbudowanych pionowo w maszynie AM EOSM290 wg ustawienia opisanego na rysunku (rys. 4.34.). Procedurą objęto badania próbek przypisanych do konkretnych parametrów złoża proszkowego Z1, Z2, Z3, Z4 oraz próbki otrzymane obróbką skrawaniem PM01-PM09. Dla każdego złoża proszkowego pozyskano materiał badawczy w postaci próbek do badań ciśnieniowych indeksowany do numeru parametru „Z” jako złoża proszkowego. Procedura badawcza polegała na określeniu liczby cykli obciążenia znormalizowanej próbki do momentu zniszczenia lub osiągnięcia 1mln cykli. Zastosowano próbki do badań ciśnieniowych opisanych wg szkicu przedstawionego na rysunku (rys. 4.9.). Grubość ścianki poddawanej cyklom obciążeniowym wynosiła 0,5mm. Rozmiar ten dotyczy badania próbek określonych jako typ 123 . Ten typ próbek montowany był w gnieździe centralnym przyrządu do testowania (rys. 4.37.). Półki poddawane były oddziaływaniu impulsów ciśnieniowych dostarczanych do wnętrza próbki w celu wytworzenia naprężeń rozciągających w ściance rury [4]. Ciśnienie zmieniało się od zera do maksimum, co powodowało powstanie naprężeń rozciągających, które również zmieniały się od zera do maksimum. W celu przeprowadzenia badań impulsowych opracowano specjalne urządzenie badawcze.



Rys. 4.37. Schemat przyrządu do ciśnieniowej próby zmęczeniowej

Standardowa jednostka zasilająca hydrauliczna (HPU) była wykorzystywana do wytwarzania ciśnienia regulowanego, a zawór elektromagnetyczny służył do naprzemiennego, cyklicznego podłączania bloku testowego do ciśnienia obciążającego (ciśnienie wysokie) a następnie do sekcji powrotu do zbiornika znajdującego się pod ciśnieniem atmosferycznym (ciśnienia niskie) HPU (rys. 4.38.).



Rys. 4.38. Schemat układu hydraulicznego stanowiska do ciśnieniowych testów zmęczeniowych

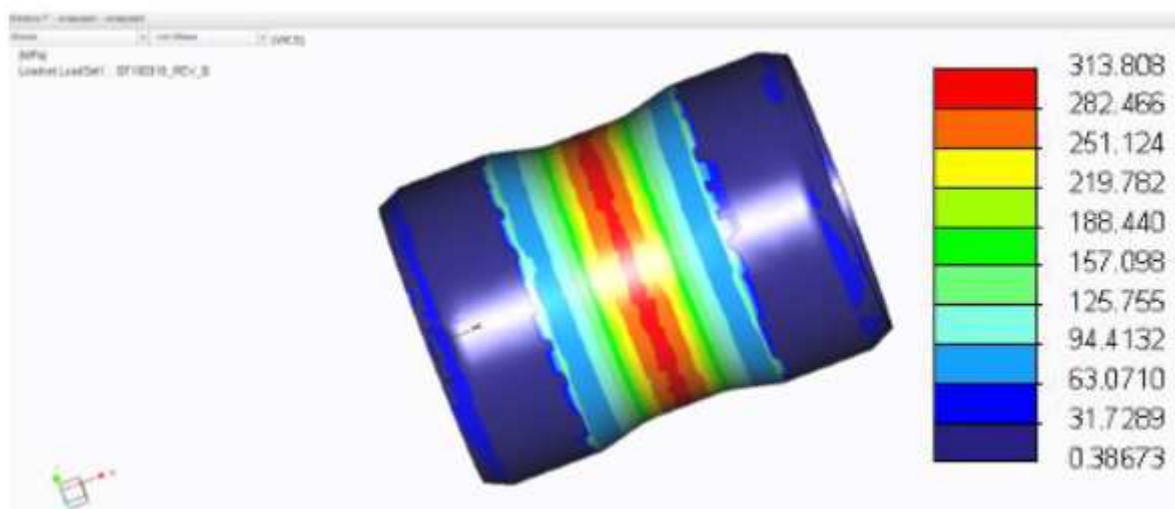
Blok badawczy (Test Block) zawierający próbki był podłączony bezpośrednio do zaworu elektromagnetycznego (Solenoid Valve), a przetwornik ciśnienia (Pressure Transducer) przymocowany do odległego końca bloku badawczego, zapewniając, że próbki były poddawane ciśnieniu co najmniej tak dużemu, jak to uzyskiwane na przetworniku (rys. 4.38.). W próbkach zamontowano korki zaślepiające w celu zmniejszenia objętości płynu do minimum (płyn hydrauliczny jest lekko ściśliwy). Wyłącznik pływakowy (Floatswitch) był zamontowany w odpływie zlewu tak, że gdy próbka pękła, wyciek oleju uruchomił wyłącznik i odcinał zasilanie silnika a licznik przestawał zliczać kolejne cykle. Należy pamiętać, że pomiędzy powstaniem wycieku a punktem, w którym w odpływie zgromadzi się wystarczająca ilość oleju, aby zadziałał wyłącznik pływakowy, będzie niewielka zwłoka. W przypadku wyższych ciśnień wskaźnik wycieku po awarii jest wysoki i wyłącznik zadziała szybko (1-200 cykli). W przypadku niższych ciśnień wskaźnik wycieku jest niższy, a opóźnienie może wynosić do około 2000 cykli. Ogólnie rzecz biorąc, żywotność próbki wzrasta wraz ze spadkiem ciśnienia. Dlatego błąd w liczbie cykli jest zawsze rzędu 2% maksimum. Maszyna testowa przedstawiona na rysunku (rys. 4.39.) była również wyposażona w chłodnicę oleju, aby umożliwić pracę w ustalonych warunkach i nie powodować niebezpiecznego przegrzewania oleju.



Rys. 4.39. Stanowisko do ciśnieniowych testów zmęczeniowych

Poziomy naprężen dla wszystkich testów oparte są na obliczeniach przy użyciu nominalnych wymiarów z tego samego modelu 3D CAD używanego w procesie budowy AM. Nie uwzględnia się różnic pomiędzy projektem a budową. Krzywe S-N stanowią zatem kalibrację całego procesu modelowania 3D, obliczeń MES oraz procesu wytwarzania AM.

Dla każdego rozmiaru próbki przeprowadzono obliczenia metodą elementów skończonych (MES) z zastosowaniem jednostkowego ciśnienia przyłożonego równomiernie do wewnętrznej powierzchni rury. Obraz rozkładu naprężeń przedstawia rysunek (rys.4.40).Naprężenie szczytowe z modelu MES zapewnia współczynnik skali pomiędzy ciśnieniem a naprężeniem. Zakłada się, że odkształcenia są nieistotne, a naprężenie w funkcji ciśnienia jest liniowe.



Rys. 4.40. Obraz rozkładu naprężeń uzyskany dla modelu MES

Testy były wykonywane przy użyciu przetworników ciśnienia, które zostały skalibrowane przez dostawcę przed realizacją badań. Wszystkie dostarczone manometry miały dokładność lepszą niż $\pm 1\%$ i dlatego nie wykonywano korekty dla rzeczywistej czułości. Testowanie próbek rurowych było przeprowadzone przy użyciu manometrów o nominalnej czułości 10V/35MPa. Napięcie wyjściowe z przetwornika ciśnienia było sprawdzane przez trzy systemy pomiarowe; miernik napięcia zamontowany na panelu sterowania maszyny badawczej (pomiar statyczny), oscyloskop oparty na komputerze PC (pikoskop), który służył do sprawdzania ciśnienia szczytowego podczas pulsowania i charakterystyki profilu ciśnienia, a zewnętrzny multimetr cyfrowy służył do okresowego sprawdzania kalibracji miernika panelowego i pikoskopu. Dokładność każdego z urządzeń wynosiła $\pm 1\%$. Całkowita niedokładność pomiaru była więc mniejsza niż $\pm 2\%$. Ciśnienie było ustawiane za pomocą ręcznie regulowanego regulatora ciśnienia. Ciśnienie ustawiano na początku każdego badania, a także okresowo w trakcie badania (regulacja ciśnienia zmieniała się nieznacznie wraz z temperaturą). Ustawione ciśnienie było utrzymywane w zakresie $\pm 2\%$ wartości nominalnej przez cały czas trwania badania. Całkowita kontrola ciśnienia i niedokładność pomiaru była więc niższa niż $\pm 4\%$. Zebrane wyniki stanowiły wartość zadanej dla pojedynczej próbki naprężeń maksymalnych cyklu pulsacji S w funkcji liczby uzyskanych cykli N dla których sporządzono krzywą $S-N$ (rys. 4.41.).

Do wszystkich dopasowań krzywych $S-N$ zastosowano następujące równanie:

$$S = S_{inf} \left(1 + \left(\frac{S_0}{S_{inf} - 1} \right) \times \left(1 + \left(\frac{N}{B} \right) \right)^{-C} \right)$$

Gdzie:

S = naprężenie (MPa)

N = liczba cykli

S_{inf} = naprężenie przy nieskończonej liczbie cykli (MPa)

S_0 = naprężenie przy małej liczbie cykli (MPa)

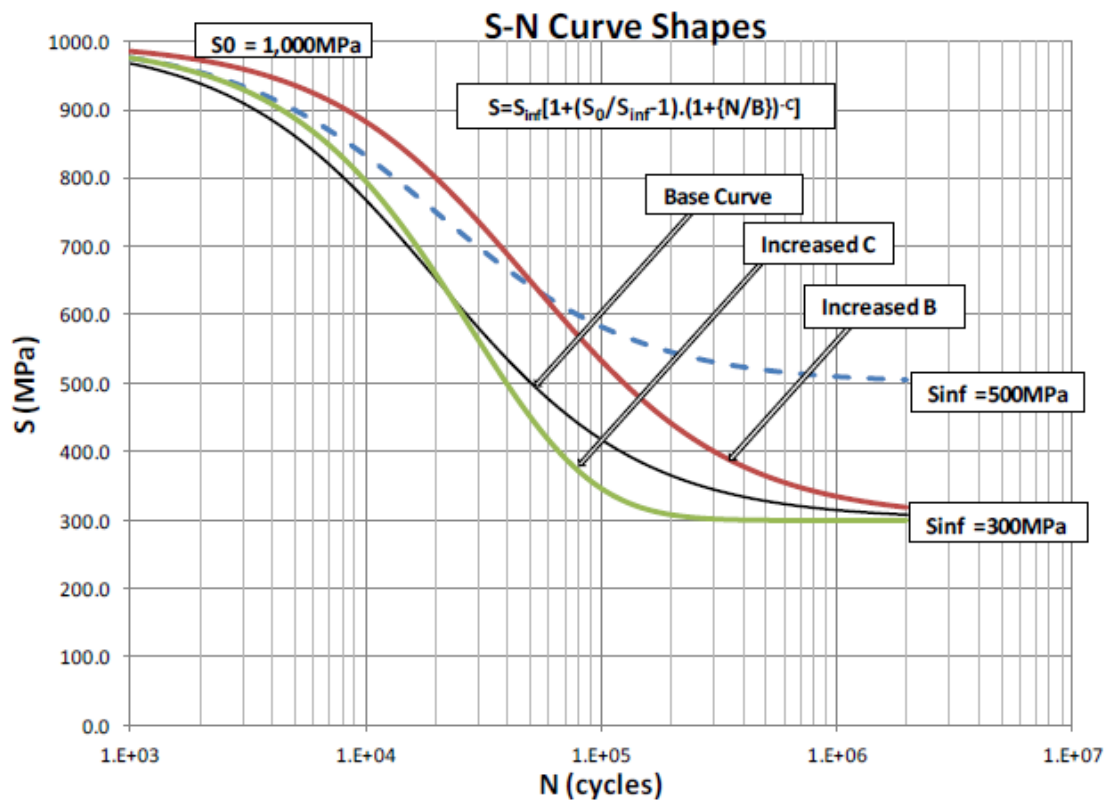
B i C są czynnikami kontrolującymi kształt krzywej

C określa, jak strome jest przejście między S_0 i S_{inf}

B może być użyte do przesunięcia przejścia w poziomie.

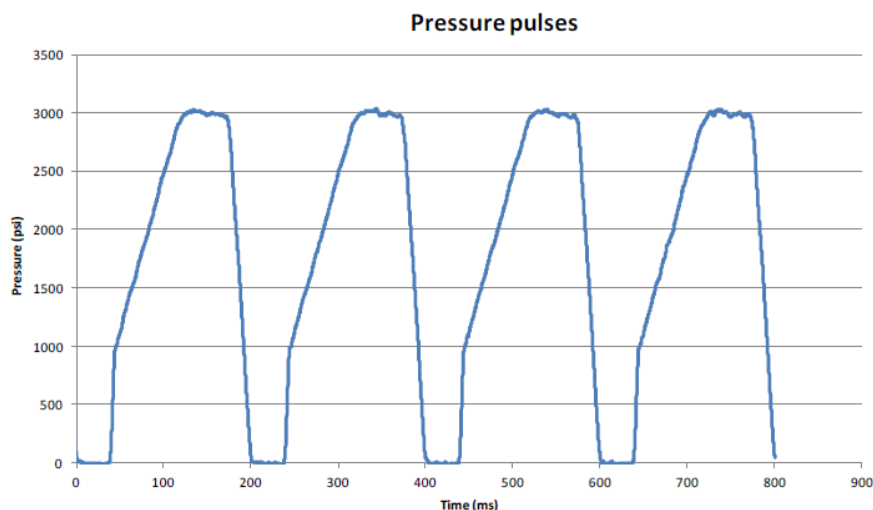
Ta krzywa była używana zamiast konwencjonalnej krzywej log-log z kilku powodów:

- Log-log może być zwykle dopasowany tylko w pewnym zakresie wartości N . Zazwyczaj do pokrycia całego zakresu używa się kilku linii prostych, co sprawia, że krzywa jest fragmentaryczna i nieciągła.



Rys. 4.41. Przykładowa krzywa S-N opis

Częstotliwość badania i profil ciśnienia używany do badań został dobrany tak, aby zapewnić, że ciśnienie w bloku badawczym miało wystarczający czas na osiągnięcie i ustabilizowanie się wartości maksymalnej, a także zerowej. Wszystkie badania tulei przeprowadzono przy częstotliwości 5Hz. Typowy przebieg profilu ciśnienia przedstawiono na rysunku (rys. 4.42.).

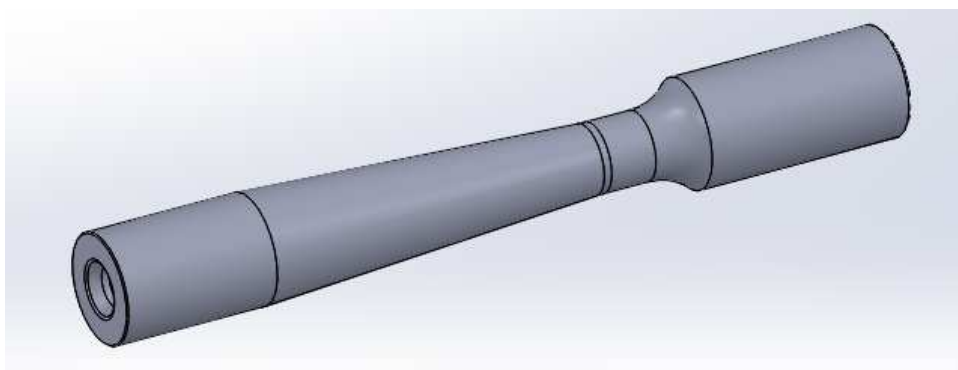


Rys. 4.42. Charakterystyka przebiegu obciążenia impulsowego

- **Procedura III, badanie zmęczeniowe próbek obciążonych cyklicznym obrotowym momentem zginającym**

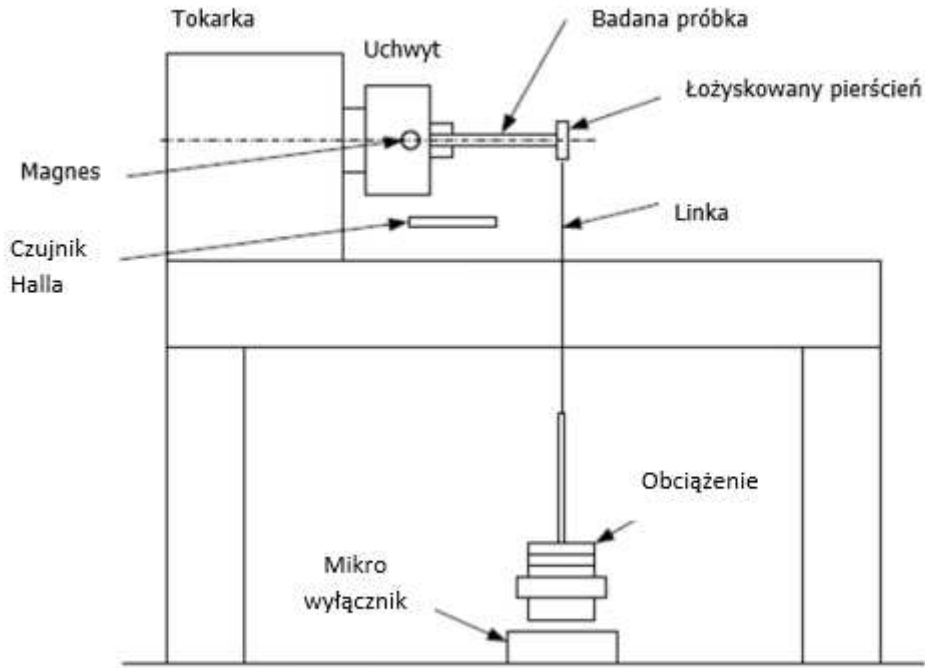
W niniejszym badaniu przeprowadzono próbę zmęczenia próbek stali maraging wytworzonych w technologii Additive Manufacturing (AM) cyklicznym obrotowym momentem zginającym. Wszystkie wyniki dotyczą próbek w stanie po obróbce cieplnej bez obróbki mechanicznej lub powierzchniowej obszaru badań. Wszystkie badania przeprowadzono na próbkach zbudowanych pionowo w maszynie AM EOSM290 wg ustawienia opisanego na rysunku (rys. 4.32.).

Procedura ta polegała na określeniu liczby cykli obciążenia znormalizowanej próbki do momentu zniszczenia lub osiągnięcia 1mln cykli. Z uwagi na charakter obciążenia, czyli zginający moment obrotowy, za miarę liczby cykli przyjęto liczbę wykonanych obrotów przez próbkę. Zastosowano próbkę o grubości ścianki 0,5mm. Wszystkie próbki były zbudowane pionowo w maszynie AM, i poddane obróbce cieplnej w procesie 490°C i czasie wygrzewania 6h oraz studzeniu swobodnym w temperaturze otoczenia. Części cylindryczne współpracujące z aparaturą badawczą poddano szlifowaniu na pożądany wymiar średnicy (rys. 4.43.).

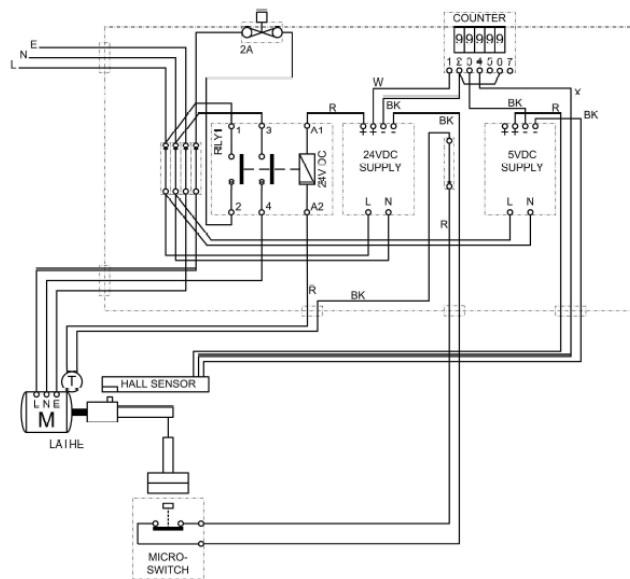


Rys. 4.43. Widok próbki do badań w cyklu obrotowo giętym

W celu wykonania badań zmęczeniowych próbek obciążonych cyklicznym obrotowym momentem zginającym, zbudowano stanowisko do testów obrotowo giętych rysunki 4.44. i 4.45., przedstawiają kolejno schemat mechanicznych (rys. 4.44) i schemat elektryczny stanowiska badawczego (rys. 4.45).



Rys. 4.44. Schemat stanowiska do badań w cyklu obrotowo giętym



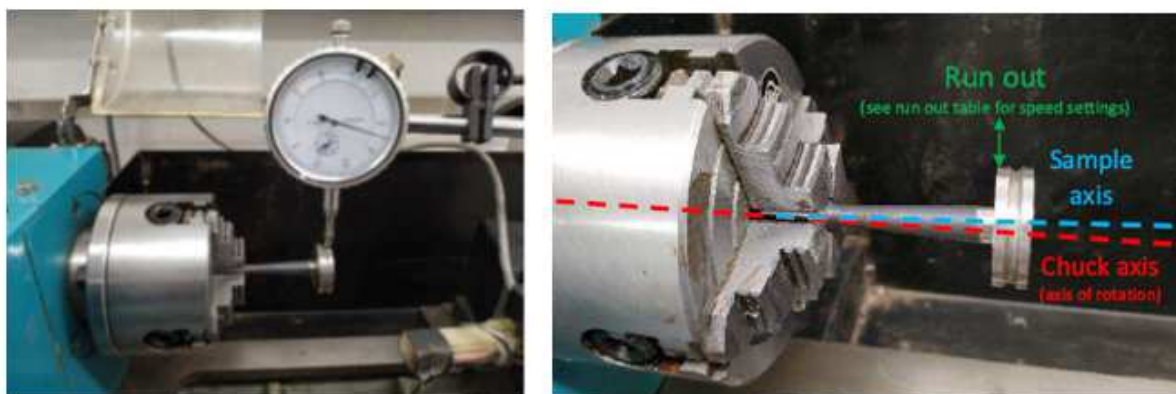
Rys. 4.55. Schemat elektryczny stanowiska do badań obrotowo-giętych

Badaną próbkę wraz z osadzonym łożyskowym pierścieniem mocowało się w uchwycie 4-szczękowym (rys. 4.46.). Ramię momentu gnącego było niezmiennie dla wszystkich próbek. Zapewniła to warunek Zachowania wymiaru 41 mm od strefy przewężenia do końca powierzchni cylindrycznej na której osadzano obrotowy krążek z łożyskiem.



Rys. 4.46. Po lewej próbka z pierścieniem obrotowym, po prawej próbka w uchwycie 4 szczękowym

Następnie dokonywano ustawienia bicia promieniowego tak by wyeliminować efekt pulsacji (rys. 4.47).



Rys. 4.47. Po lewej próbka w trakcie pomiaru bicia promieniowego, po prawej próbka w uchwycie 4 szczękowym

W następnym kroku wprowadzano obciążenia badanej próbki za pomocą zestawu dobranych odważników zawieszonych na linie i umieszczonych tuż nad mikro wyłącznikiem. Do zliczania cykli N służył licznik impulsów wyzwalany przez czujnik halla. Na początku każdego badania dokonywano jego zerowania. Obroty jakie należało ustawić na wrzecionie stanowiska badawczego były dobrane tak aby zapewnić uzyskanie częstotliwości 7,5 Hz. Osiągnano to przy 450 obr/min. Badanie trwało do pęknięcia próbki lub uzyskania 1mln cykli.

Moment zerwania rejestrował licznik cykli w chwili zerwania próbki i wyzwolenia mikro wyłącznika umieszczonego pod zespołem obciążeniowym. Dane w postaci liczby uzyskanych cykli, grubości ścianki, wielkości obciążenia wprowadzano do arkusza kalkulacyjnego na podstawie którego obliczano wartość naprężeń S w funkcji uzyskanej liczby cykli N . Wyniki służyły do wykreślenia krzywej $S-N$.

5 REALIZACJA BADAŃ I WYNIKI BADAŃ

Zebrane wyniki badań dotyczyły dwu etapów pracy nad procesem warstwowego selektywnego spajania proszków metali - PBF. Etap pierwszy to wyniki badań wykonane przy użyciu próbek otrzymanych w technologii SLM (SLM250 Realizer) oraz etap drugi gdzie próbki wykonano z zastosowaniem procesu DMLS i urządzenia M290 EOS.

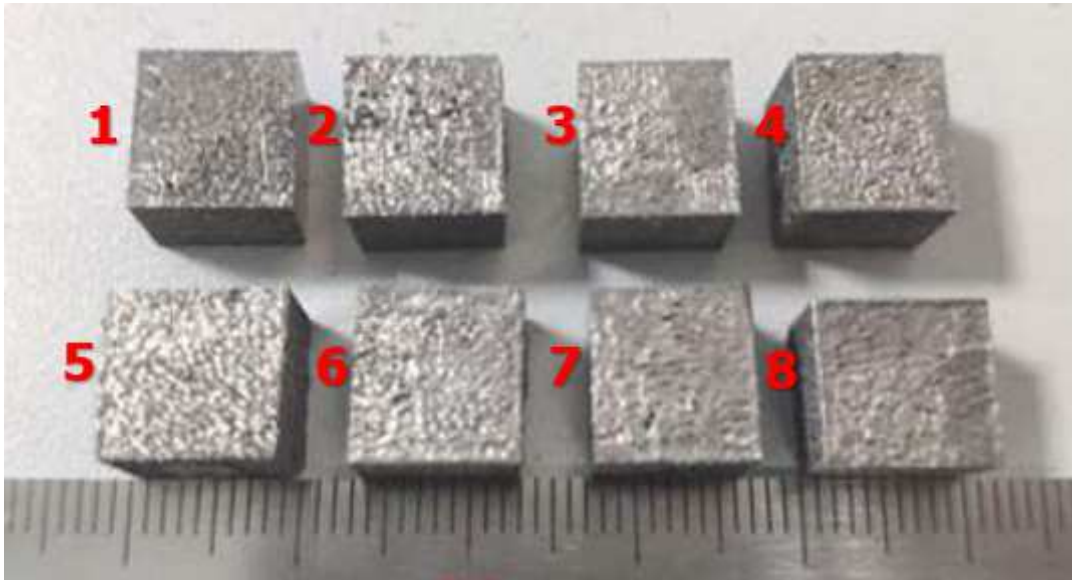
5.1. Wyniki badań z analizy procesy przyrostowego SLM

W tej części przedstawiono wyniki badań uzyskanych dla próbek z procesu SLM. Badania obejmowały, określenie gęstości otrzymywanych wydruków, wytrzymałości zbadanej przy użyciu klasycznej próby rozciągania, wytrzymałości zmęczeniowej, badania trybologiczne i weryfikację twardości metodą Vickersa. Biorąc pod uwagę podobieństwa procesów PBF w zakresie metod Selective Laser Melting (SLM) oraz Direct Metal Laser Sintering (DMLS), realizacja badań miała na celu opracowanie pewnych ogólnych założeń metodyki wytwarzania elementów cienkościennych poddawanych obciążeniom zmiennym dla procesu PBF jako uniwersalnego narzędzia dla wszystkich metod opartych o selektywne warstwowe spajania proszków metali.

5.1.1. Badania porowatości

W prezentowanych wynikach badania porowatości przedstawiono wyniki dla 8 reprezentatywnych próbek z pośród kilkudziesięciu, które przebadano w celu znalezienia parametrów wiązki, właściwych dla zastosowania do produkcji korpusów serwozaworów. Badania dotyczyły pomiaru udziału porowatości badanego obszaru w relacji do mocy wiązki lasera i odległości pomiędzy liniami skanowania (hatchingdistance). Na tym etapie badań założono niezmiennosc pozostałych parametrów procesu SLM. Proces przeprowadzono za pomocą systemu SLM250 Realizer. Proszek stali 1.2709 (EOS MS1) do badania pochodził bezpośrednio z nowej partii. Został on załadowany do układu maszyny i w sposób automatyczny, poprzez podajniki ślimakowe podawany do strefy rozprowadzania, poprzez gumowe wycieraczki (ang. wipers). Pojedyncza warstwa nanoszonego nowego proszku wynosiła 50 μm . Gazem osłonowym w procesie był argon. System ustawiono tak by resztkowa ilość tlenu w komorze nie przekraczała 0,3%. Parametr ten by mierzony w trakcie procesu i utrzymywany na zadanym poziomie poprzez kontroler. W badaniach dokonywano zmiany prędkości skanowania, zmiany mocy wiązki lasera, zmiany odległości pomiędzy liniami skanowania i zapisywano parametry w plikach ustawczych odpowiadających kolejnym próbkom. Przedstawione wyniki porowatości otrzymanych próbek w udziale procentowym są połączone z konkretnymi zestawami parametrów skanowania, zawartymi w tabelach (tab. 5.1. do tab. 5.8.). Wyniki zaprezentowano dla 8 zestawów parametrów i 8 reprezentatywnych próbek

przyporządkowanych ustawieniom. Próbkę referencyjną zaprojektowano w postaci modelu prostopadłościennych opartych na podstawie kwadratu o boku 10mm (rys. 5.1). Tego typu próbkę można umieścić w każdej partii wydruku 3D, jako materiał do analizy bieżącej lub po procesowej kontroli platformy wydruku 3D.

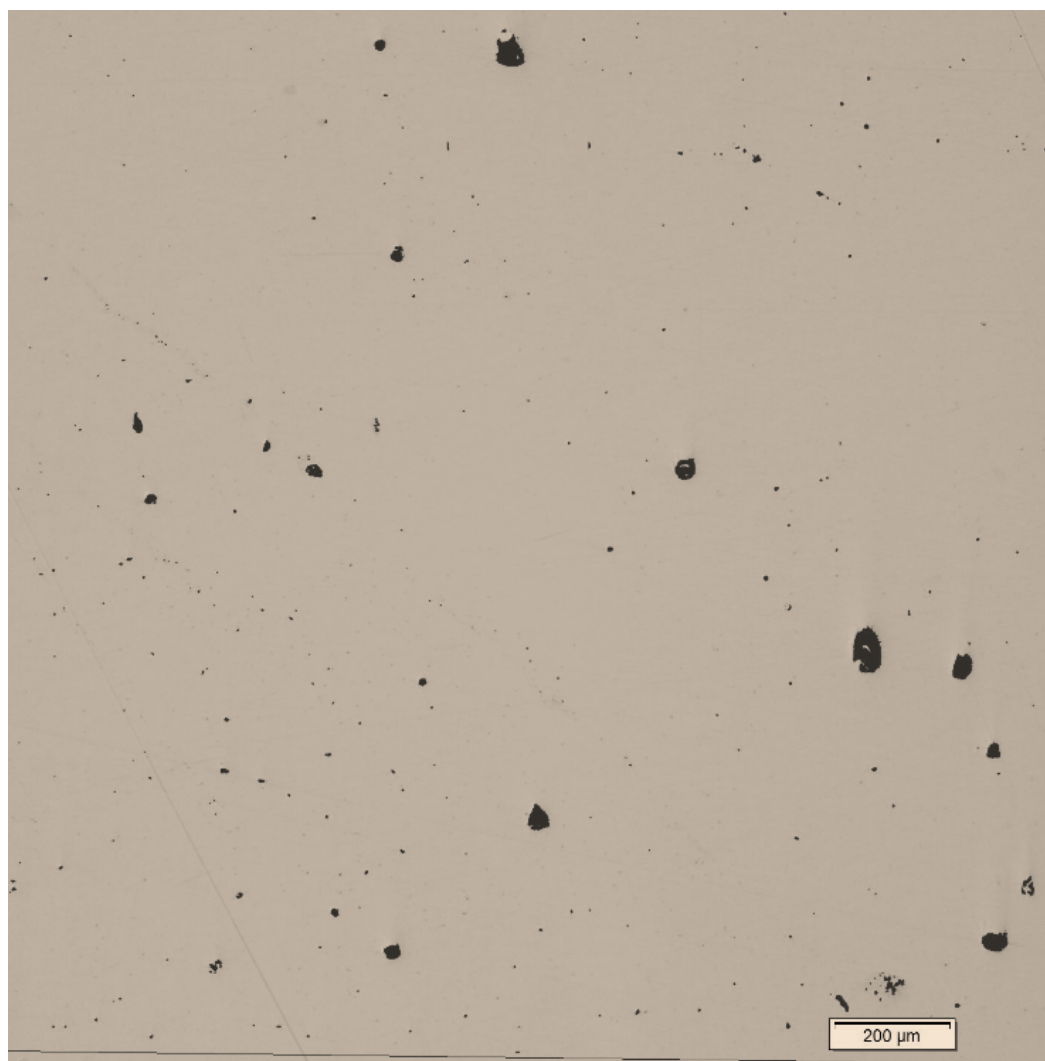


Rys. 5.1. Próbkę do badania porowatości

Dzięki zastosowaniu sześciennego modelu i możliwości umieszczenia na płycie startowej wielu próbek, których parametry skanowania mogą się różnić niewielkimi zmianami można zebrać materiał badawczy odpowiadający poszczególnym próbkom. W przypadku doboru parametrów w procesie SLM regulowano głównie parametry mocy wiązki lasera, szybkości skanowania, odległości między kolejnymi liniami skanowania. Wyniki prowadzonych badań porowatości przedstawiono w postaci zdjęć (rys. 5.2 ÷ rys. 5.9) zglądów metalograficznych na podstawie których określono udział porów w badanej strukturze. Wyniki zebrano w tabelach z opisem zestawu nastaw procesowych i zawartością porów w strukturze.

Tab. 5.1. Parametry procesu PBF – zestaw ustawień nr 1

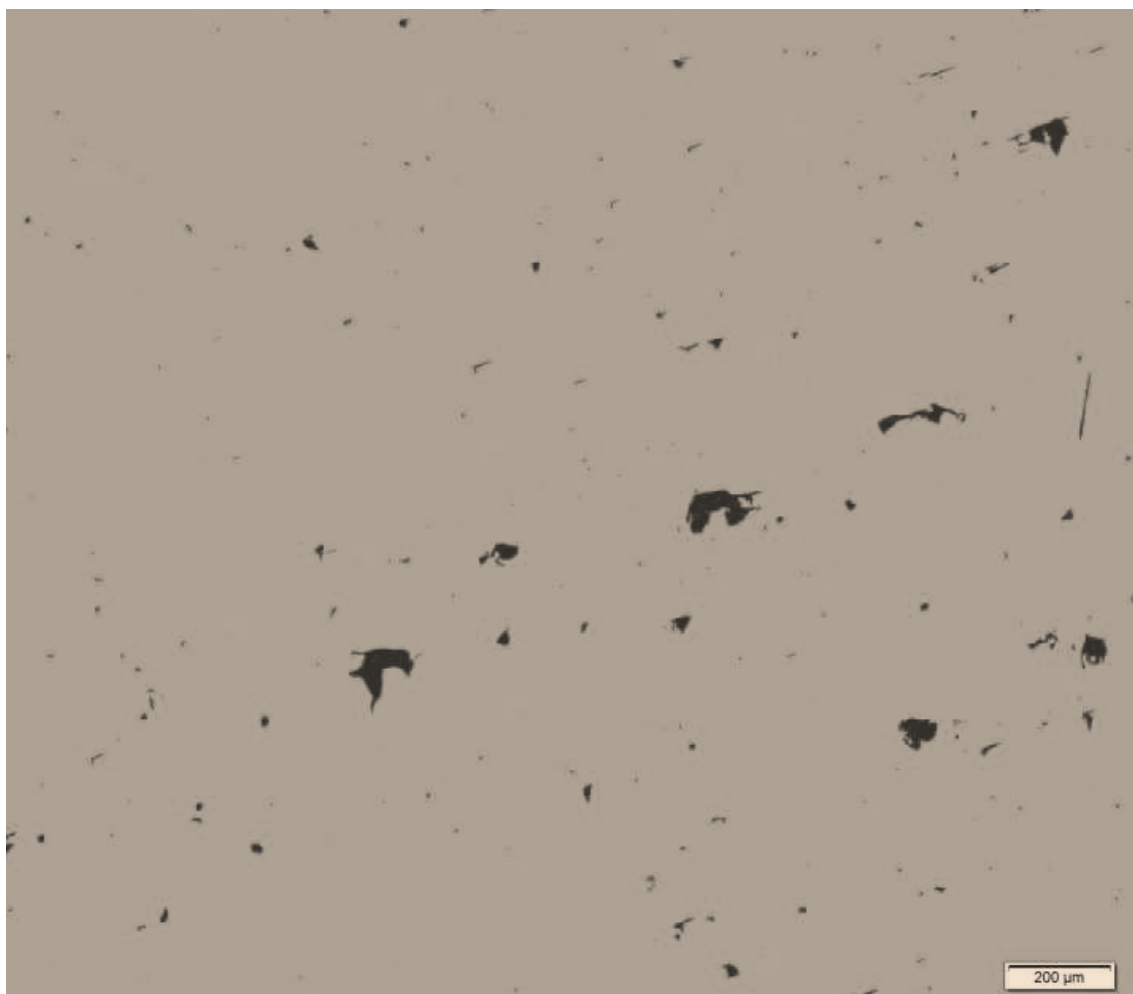
Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy	Udział porów w badanym obszarze
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	%
100	245	40	50	0,60



Rys. 5.2. Zdjęcie zglądu metalograficznego – zestaw ustawień nr 1

Tab. 5.2. Parametry procesu PBF – zestaw ustawień nr 2

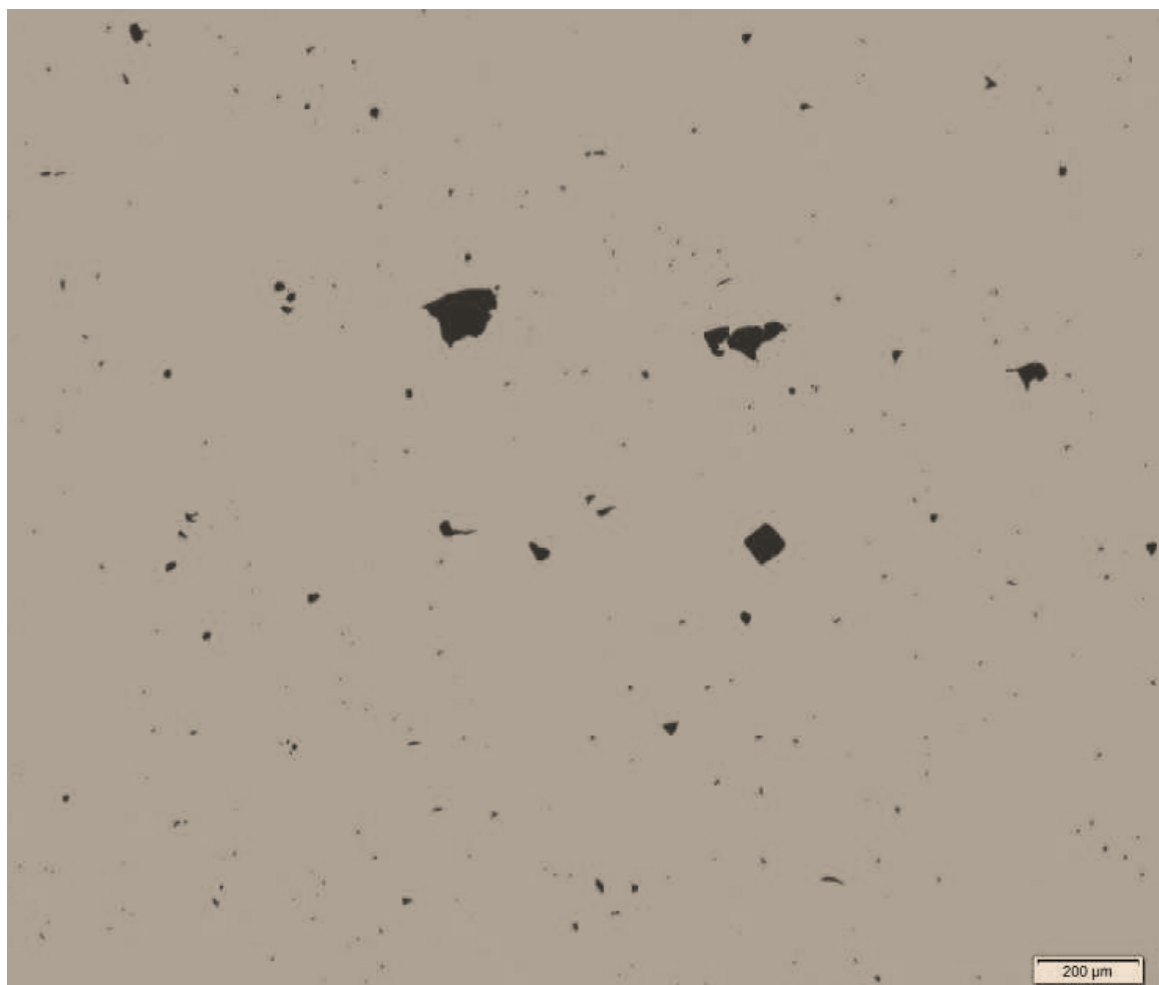
Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy	Udział porów w badanym obszarze
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	%
130	315	40	50	1,06



Rys. 5.3. Zdjęcie zglądu metalograficznego – zestaw ustawień nr 2

Tab. 5.3. Parametry procesu PBF – zestaw ustawień nr 3

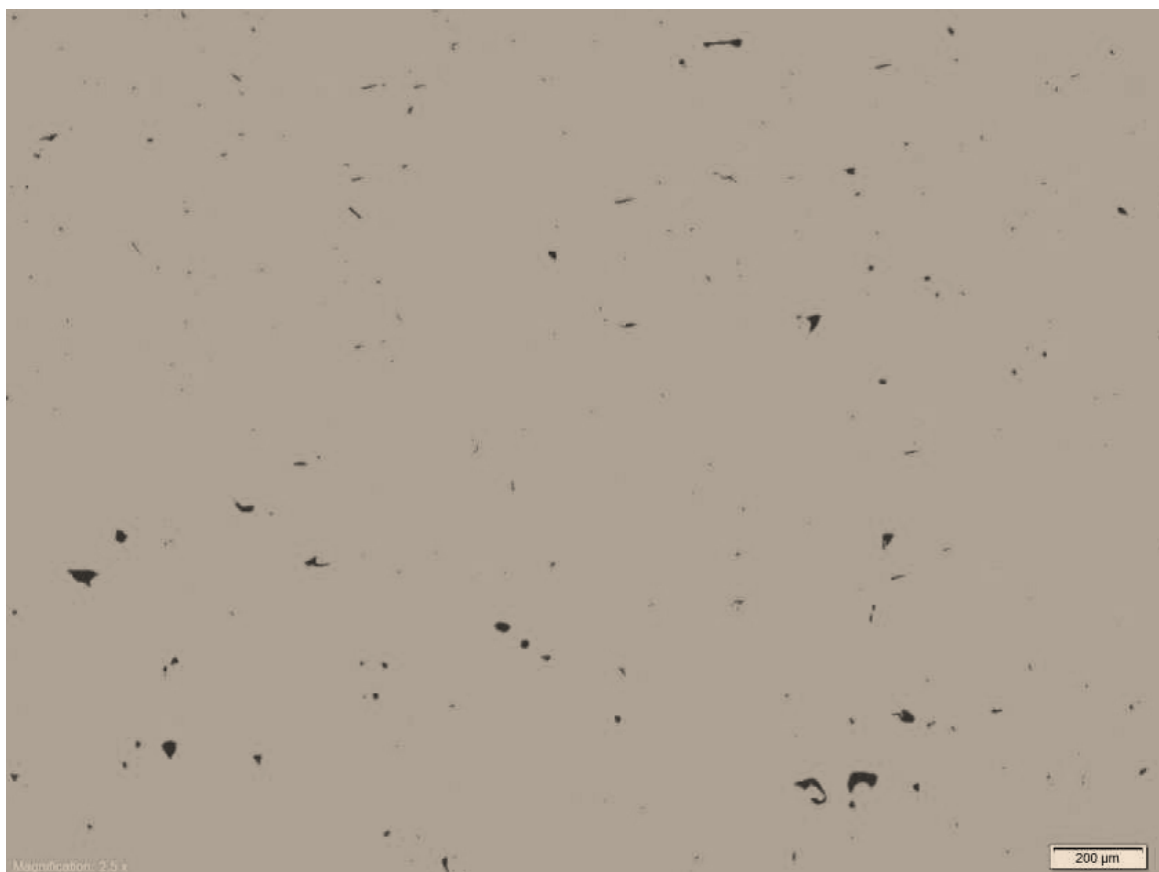
Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy	Udział porów w badanym obszarze
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	%
160	385	40	50	0,90



Rys. 5.4. Zdjęcie zglądu metalograficznego – zestaw ustawień nr 3

Tab. 5.4. Parametry procesu PBF – zestaw ustawień nr 4

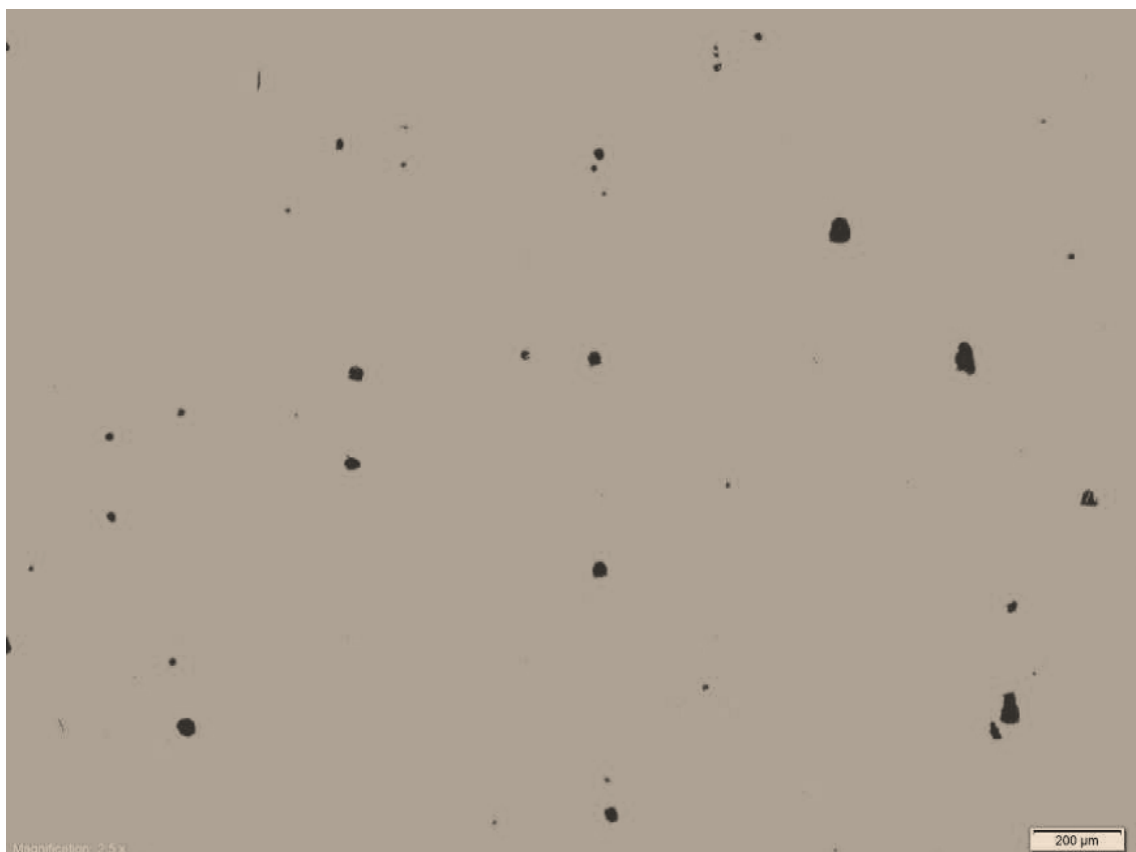
Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy	Udział porów w badanym obszarze
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	%
70	175	40	50	0,44



Rys. 5.5. Zdjęcie zglądu metalograficznego – zestaw ustawień nr 4

Tab. 5.5. Parametry procesu PBF – zestaw ustawień nr 5

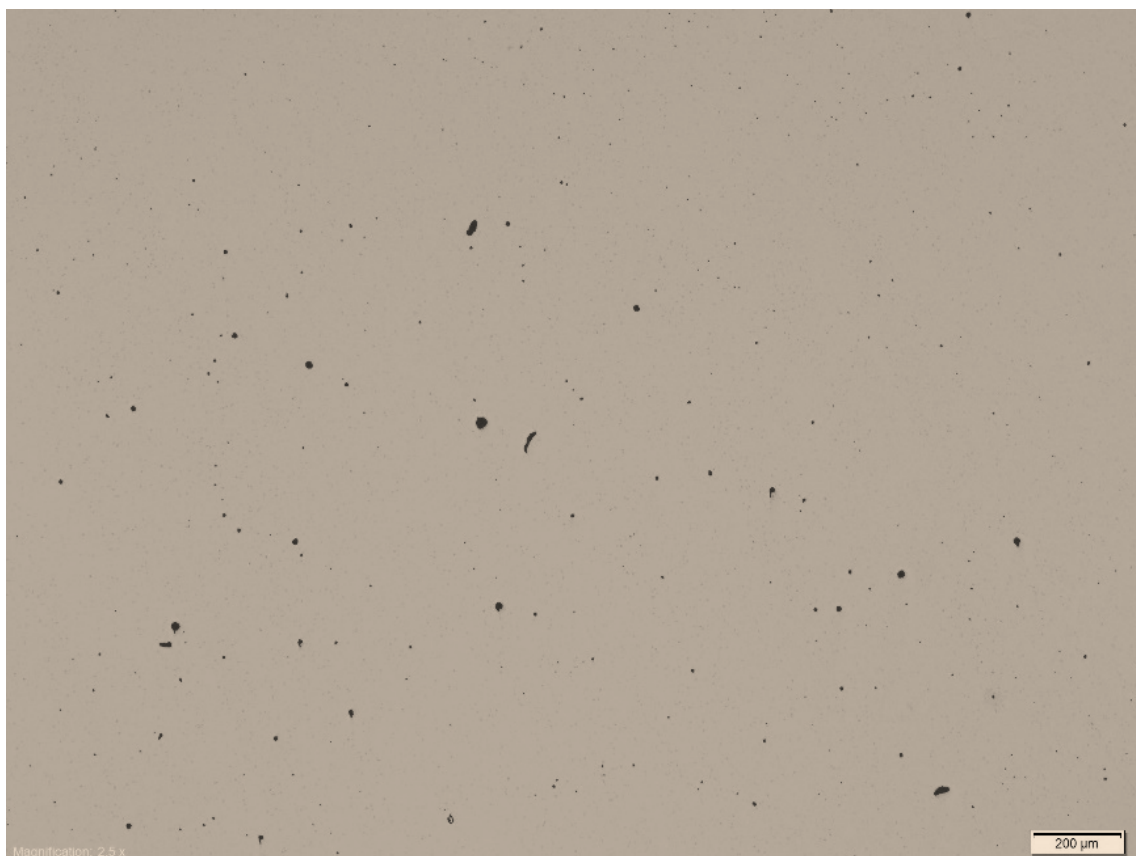
Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy	Udział porów w badanym obszarze
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	%
150	350	90	50	0,40



Rys. 5.6. Zdjęcie zglądu metalograficznego – zestaw ustawień nr 5

Tab. 5.6. Parametry procesu PBF – zestaw ustawień nr 6

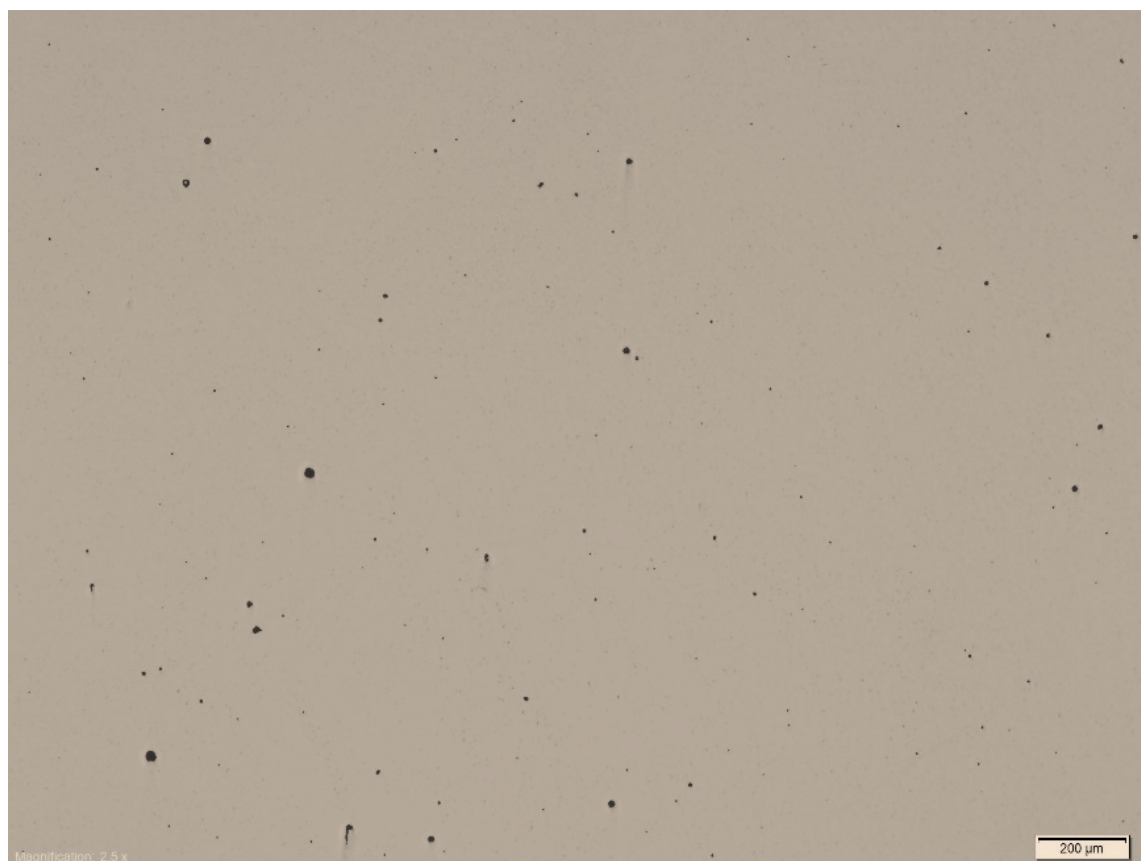
Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy	Udział porów w badanym obszarze
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	%
170	385	90	50	0,20



Rys. 5.7. Zdjęcie zglądu metalograficznego – zestaw ustawień nr 6

Tab. 5.7. Parametry procesu PBF – zestaw ustawień nr 7

Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy	Udział porów w badanym obszarze
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	%
70	175	90	50	0,11



Rys. 5.8. Zdjęcie zglądu metalograficznego – zestaw ustawień nr 7

Tab. 5.8. Parametry procesu PBF – zestaw ustawień nr 8

Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy	Udział porów w badanym obszarze
[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]	%
100	210	90	50	0,08



Rys. 5.9. Zdjęcie zglądu metalograficznego – zestaw ustawień nr 8

W wyniku przeprowadzonych poszukiwań parametrów procesu SLM z pośród zebranych analiz porowatości uzyskanych dla konkretnych nastaw procesowych można zaobserwować, że koncentracja energii wiązki lasera w czasie procesu skanowania wpływa na jakość gęstości otrzymywanego materiału. Dla zaprezentowanych wyników osiągnęła wartość 1.06 % udziału porów w badanej próbce nr 2 i zestawu parametrów nr 2, natomiast najmniejszy udział porów zaobserwowano w próbce nr 8, zestaw parametrów nr 8 i stanowił on 0,08%.

5.1.2. Badania wytrzymałości

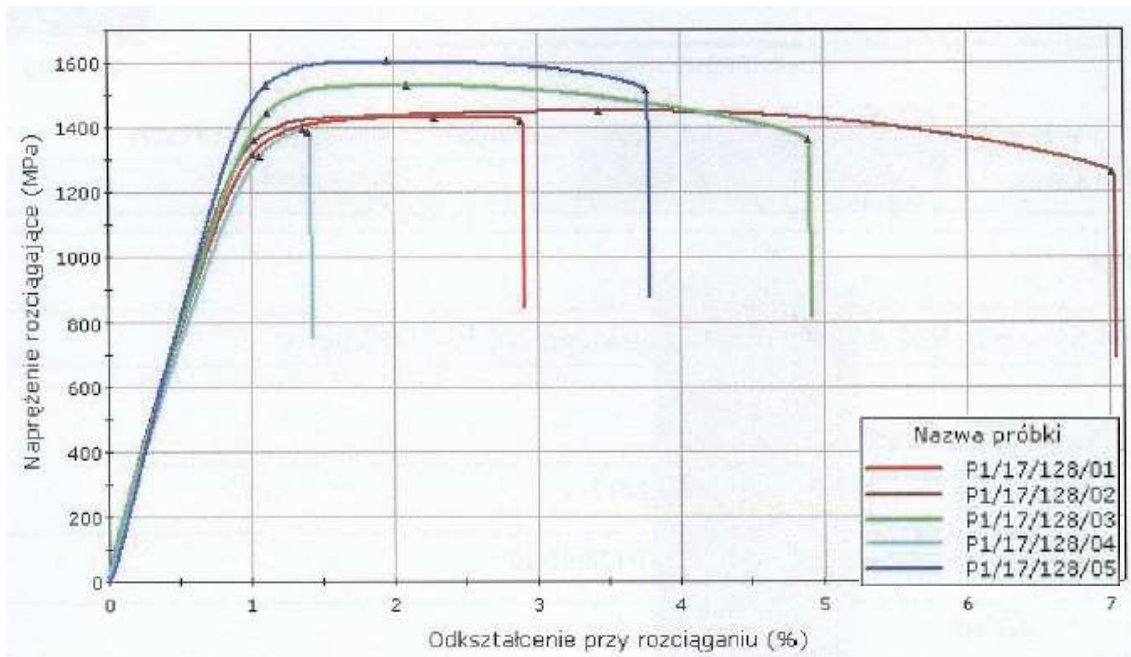
Zaprojektowano platformę do druku zawierającą 20 próbek badawczych wg wymagań standardu PN-EN ISO 6982-1[105]. Próbki zostały wydrukowane z proszku stali maraging 1.2709 dostarczonego przez firmę EOS o nazwie własnej MS1. Proszek do wykonania próbek był nowy. Platforma została zaprojektowana tak aby próbki można było wykonać w trakcie jednego procesu SLM. Próbki wykonano wg zestawu nr 8 ustawień skanowania i z potwierdzoną porowatością na poziomie 0,08%. Próbki od numeru 1 do 10 zostały przeznaczone do próby statycznego rozciągania, próbki od 11 do 19 zostały użyte do badań zmęczeniowych a próbka nr 20 do analizy twardości. Ustawienia procesu skanowania dla zestawu parametrów wiązki skanowania zawiera tabela (tab. 5.8.). Wszystkie próbki poddano procesowi obróbki cieplnej w temperaturze 490°C i 6h wygrzewania, studzenie zrealizowano przez wyjęcie z pieca i swobodne wychłodzenie w temperaturze otoczenia.

Próbki do wykonania klasycznej próby rozciągania zostały ponumerowane wg tabeli (tab.5.9.). Oznaczenie próbek przyjęto zgodnie z zaproponowanym w sprawozdaniu nr RU-P1-651-128/17 z badań w Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej. Ostatnia pozycja oznaczenia próbki stanowi numer kolejny próbki przekazanej do badania.

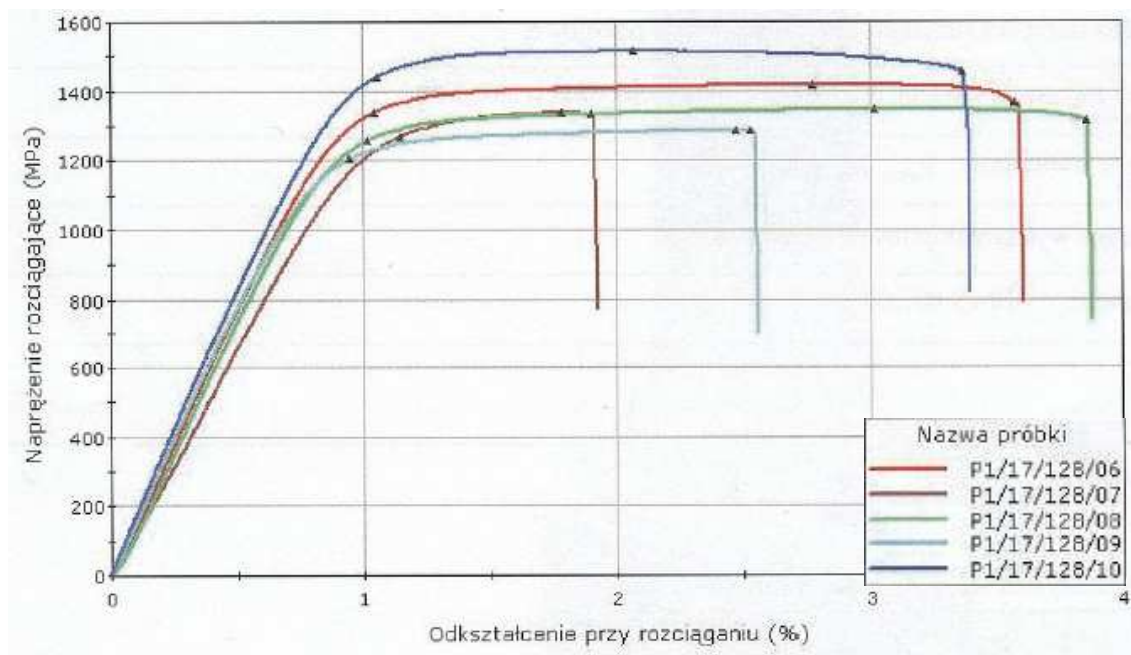
Tab. 5.9. Numery próbek i uzyskane wartości naprężeń, wydłużenia i przewężenia

Ozn. próbki (RU)	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
P1/17/128/01	1317	1432	2,9	18
P1/17/128/02	1359	1450	5,1	21
P1/17/128/03	1445	1530	4,4	21
P1/17/128/04	1309	1397	1,2	5
P1/17/128/05	1530	1603	2,8	13
P1/17/128/06	1338	1417	6,8	10
P1/17/128/07	1268	1336	2,8	5
P1/17/128/08	1259	1347	6,0	6
P1/17/128/09	1204	1287	4,8	8
P1/17/128/10	1442	1514	6,9	13

Graficzny zapis próby rozciągania prezentują wykresy (rys. 5.10. i rys. 5.11.). Na pierwszym przedstawiono wartości naprężeń w funkcji odkształcenia dla próbek od P1/17/128/01 do P1/17/128/05. Na drugim dla próbek P1/17/128/06 do P1/17/128/10.



Rys. 5.10. Wykres naprężeń w funkcji odkształcenia dla próbek P1/17/128/01 do P1/17/128/05



Rys. 5.11. Wykres naprężeń w funkcji odkształcenia dla próbek P1/17/128/06 do P1/17/128/10

Z przeprowadzonego badania wynika, że próbki uzyskują różne wartości wytrzymałości na rozciąganie. Różnice mieszczą się w przedziale od 1287 MPa do 1603 MPa. Różne wartości granicy plastyczności są zdefiniowane w przedziale naprężeń od 1204 MPa do 1530 MPa.

5.1.3. Badania zmęczeniowe

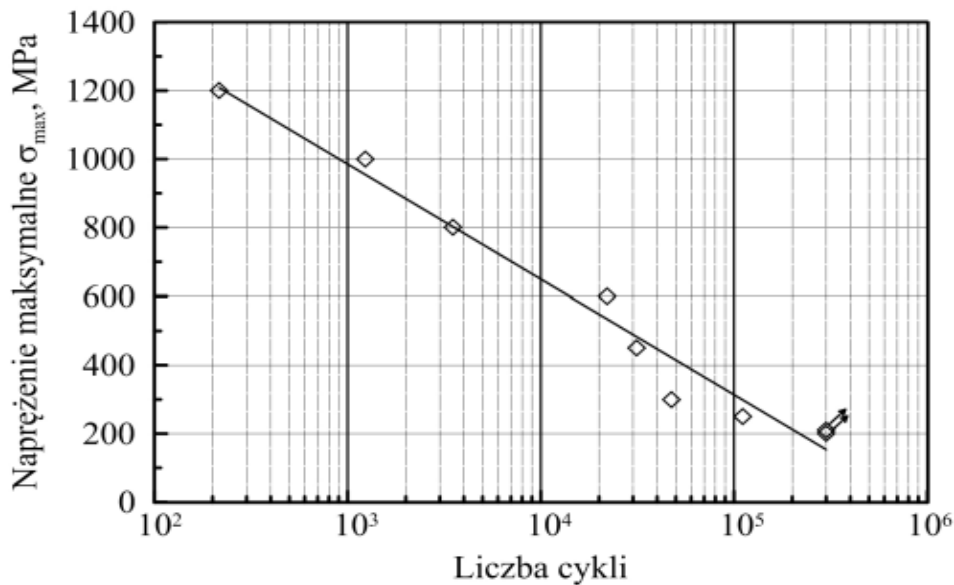
Badania w tym obszarze zostały przeprowadzone na kolejnych próbkach o numerach od 11 do 19 uzyskanych w procesie druku SLM z proszku stali maraging 1.2709 wg wymagań standardu PN-EN ISO 6982-1[105]. Tak jak dla badań wytrzymałościowych w klasycznej próbie rozciągania próbki wykonano przy użyciu parametrów skanowania, które cechowały się minimalną ilością porów w obrazie zglądu metalograficznego według zestawu parametrów nr 8 (tab. 5.8.) i odpowiadającego mu obrazu porowatości przedstawionego na rysunku (rys. 5.9.). Wszystkie próbki poddano procesowi obróbki cieplnej w temperaturze 490°C i 6h wygrzewania, studzenie zrealizowano przez wyjęcie z pieca i swobodne wychłodzenie w temperaturze otoczenia. Próbie zmęczeniowej poddano łącznie 9 próbek (tab.5.10.). Są to kolejne próbki z serii wydrukowanych 20. Badania zostały wykonane w Laboratorium Badań Materiałów Dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej. Wyniki z badań zawarto w raporcie z badań nr RU-P1-651-136/17. Zastosowano obciążenie zmienne o przebiegu sinusoidalnym zadawane z częstotliwością $f = 3$ Hz.

Tab. 5.10. Uzyskane wartości liczby cykli dla zadanej wartości obciążenia zmęczeniowego

Nr próbki	σ_{max}	σ_{max}	N_f
	[MPa]	[MPa]	Liczba cykli
11	1200	60	216
12	1000	50	1237
13	800	40	3504
14	600	30	22077
15	450	22,5	31324
16	300	15	47489
17	250	12,5	111361
18	210	10,5	300000*
19	200	10	300000*

*-próbka nie uległa zerwaniu

Na podstawie wyników próby zmęczeniowej opracowano wykres Wohlera (rys.5.12.).



Rys. 5.12. Wykres Wohlera dla próbek nr 11 do nr 19

Na podstawie zrealizowanych prób zmęczeniowych dla zestawu próbek wykonanych na wspólnej platformie startowej z parametrami skanowania dla zestawu parametrów nr 8 prognozuje się, że wytrzymałość zmęczeniowa stali 1.2709 w warunkach jednostronnego rozciągania ($R = 0,05$) dla granicznej liczby cykli $N_g = 300\ 000$ przyjmuje wartość w zakresie 210-250 MPa.

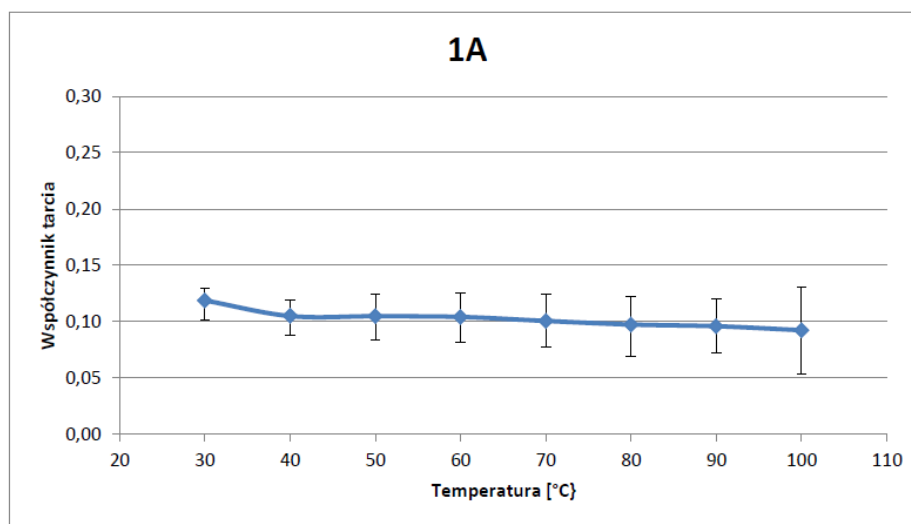
5.1.4. Badania trybologiczne

Badania trybologiczne próbek stali 1.2709 uzyskanej w procesie druku 3D SLM miały za zadanie określić wartości współczynnika tarcia w dwu wariantach: temperaturowym i obciążeniowym. W wariacie temperaturowym celem było wyznaczenie oporów ruchu w zależności od temperatury, natomiast w wariacie obciążeniowym badano zależność współczynnika tarcia od siły nacisku na powierzchnie współpracujące. Testy dla każdego wariantu powtarzane były 5-krotnie. Dla tego badania zostały wydrukowane 2 trzecie o średnicy 100 mm i dwa trzpienie o średnicy 16 mm. Wydruk wykonano na SLM250 Realizer z proszku stali maraging 1.2709 w stanie nowym. Zastosowano zestaw ustawień nr 8 wg tabeli (tab.5.8.). Próbkę do badań poddano obróbce cieplnej. Zastosowano 490°C i 6h wygrzewania oraz chłodzenie swobodne bez atmosfery gazów ochronnych. Próbkę następnie zostały poddane szlifowaniu powierzchni celem uzyskania chropowatości $R_a=0,32\ \mu\text{m}$. Wszystkie testy niezależnie od wariantu przeprowadzone zostały przy stałym promieniu tarcia wynoszącym 25mm. Prędkości obrotowe zostały dobrane tak aby odwzorować prace rozdzielacza hydraulicznego pracującego w serwowzorze. W tym celu zastosowano cykle, w których tarcza poruszała się naprzemiennie zgodnie z ruchem wskazówek zegara i przeciwnie w interwałach o czasie 1 min.

Zastosowana prędkość obrotowa to 210 obr/min i odpowiednio -210 obr/min. Na początku testu w miejsce współpracy zostało podane 1,5 ml oleju MIL PRF 5606H o klasie lepkości wg ISO VG 15 stosowanego w układach hydrauliki siłowej. Po każdym cyklu podawane było 0,5 ml oleju celem uzupełnienia braków.

- Wariant A - temperaturowy

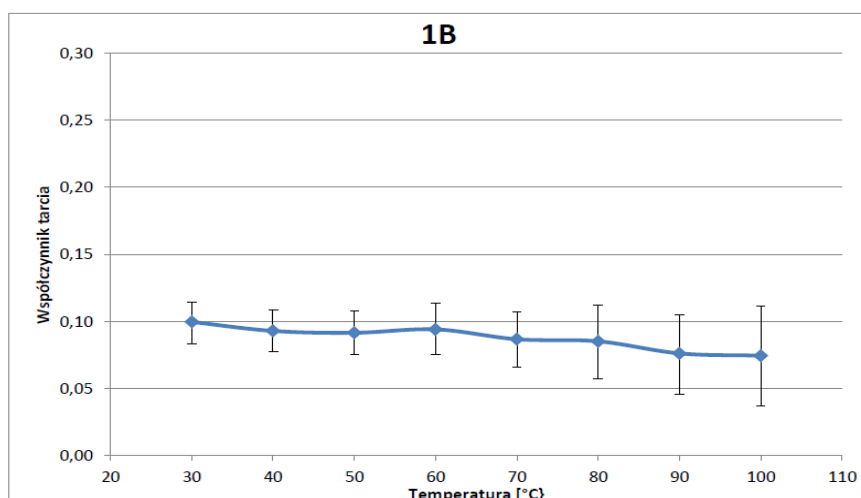
Na rysunku (rys. 5.13.) przedstawiono wykresy średnich wartości współczynnika tarcia dla poszczególnych prób wraz z rozrzutem dla odpowiadających cykli.



Rys. 5.13. Współczynnik tarcia wariant temperaturowy

- Wariant B - Obciążeniowy

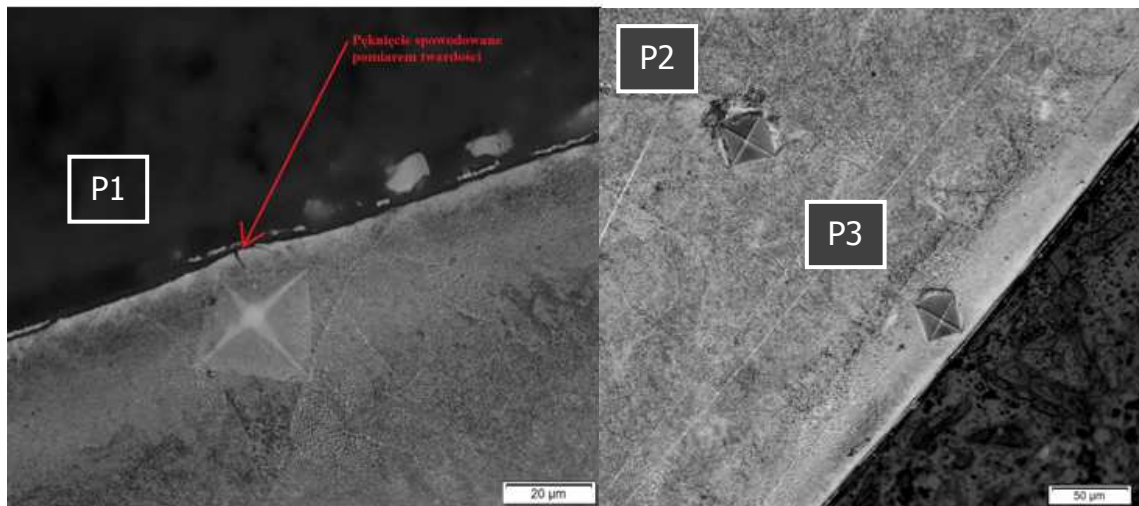
Na rysunku (rys. 5.14.) przedstawiono wykresy średnich wartości współczynnika tarcia dla poszczególnych prób wraz z rozrzutem dla odpowiadających cykli.



Rys. 5.14. Współczynnik tarcia wariant obciążeniowy

5.1.5. Badania twardości

Badanie twardości było badaniem pogładowym w kwestii uzyskiwanej twardości próbek otrzymywanych w procesie SLM i poddawanych obróbce cieplnej. Stanowiło ono jedynie uzupełnienie badań procesu i weryfikację nie tak procesu SLM jak właśnie procesu obróbki cieplnej. Próbką do badania była próbka nr 20 z serii próbek wykonanych z tymi samymi parametrami, zestaw nr 8 (tab. 5.8.), co próbki do badań zmęczeniowych i wytrzymałościowych. Wszystkie próbki poddano procesowi obróbki cieplnej w temperaturze 490°C i 6h wygrzewania, studzenie zrealizowano przez wyjęcie z pieca i swobodne wychłodzenie w temperaturze otoczenia. Powierzchnia badania została przygotowana poprzez szlifowanie i polerowanie. Badanie wykonano metodą Vickersa. Przykładowe obrazy z pomiaru przedstawiają odcisk wglębniaka oraz identyfikują miejsce wykonania pomiaru (rys. 5.15.).



Rys. 5.15. Pomiar twardości metoda Vickersa

Wyniki pomiaru twardości przedstawiono na rysunku (rys.5.15.).Przedstawia on oznaczone punkty pomiarowe P1, P2, P3.Pomiar twardości oznaczony jako P1 uzyskał 331 HV ale z uwagi na wystąpienie pęknięcia nie jest miarodajny. Dla pomiaru P2 uzyskano 335 HV a dla P3 334 HV. Na podstawie pomiaru twardości można stwierdzić, że próbki w procesie obróbki cieplnej uzyskały wymaganą twardość.

5.2. Wyniki badań próbek dla procesu DMLS

W tej części przedstawiono wyniki badań uzyskanych dla próbek z procesu DMLS uzyskanych na maszynie EOS M290 z ceramiczną wycieraczką. Badania obejmowały, określenie morfologii złoza proszku, określenie gęstości otrzymywanych wydruków w odniesieniu do uzyskanej morfologii oraz badania zmęczeniowe. Badania zmęczeniowe wykonano w dwóch wersjach. W wersji dla próbek obciążanych cyklicznym zmiennym obciążeniem ciśnieniowym oraz w wersji obciążania momentem obrotowo giętym.

5.2.1. Badanie morfologii złoza proszkowego

Badaniu poddano 4 warianty złoza proszku stali maraging 1.2709 o oznaczeniu dostawcy EOS MS1 wytypowane do serii badawczej. Warianty złoza odnosiły się do udziału procentowego frakcji zdefiniowanych przez rozmiar i kształt cząsteczek proszku. Poszczególne złoza oznaczono Z1, Z2, Z3, Z4. Skład chemiczny zgodny z kartą materiałową dostawcy przedstawiono w tabeli (tab. 5.11). Parametry opisujące kształt i rozmiary cząsteczek proszku zawarto w tabeli (tab. 5.12.)

Tab. 5.11. Skład chemiczny proszku stali 1.2709 dane producenta.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti	Co
0-0.03	0-0.1	0-0.15	0-0.01	0-0.1	0-0.25	4.5-5.2	17.0-19.0	0.8-1.2	8.5-10.0

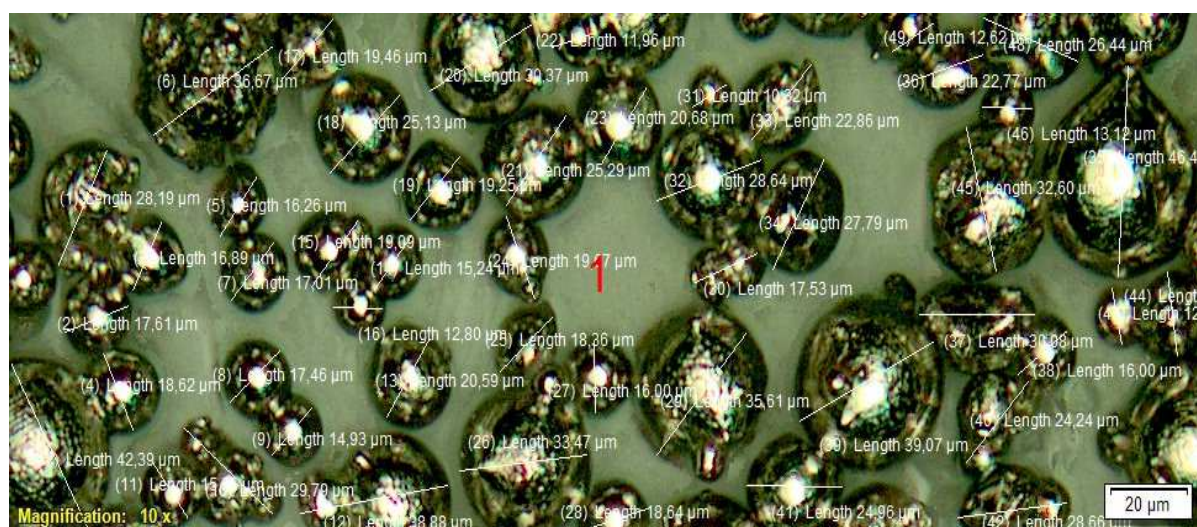
Analizy rozmiaru i kształtu dokonano za pomocą mikroskopu świetlnego Olympus wyposażonego w oprogramowanie Stream Essential pozwalające na pomiar cząsteczek proszku. Wyniki analizy zostały zawarte w tabeli (tab. 5.12.)

Tab. 5.12. Zestawienie parametrów cząsteczek proszku

Próbka nr	Opis stanu proszku	Kuliste		Globularne		Wtrącenia zanieczyszczeń		Zmieniona barwa pod wpływem spiekania
		rozmiar [µm]	udział [%]	rozmiar [µm]	udział [%]	rozmiar [µm]	udział [%]	udział [%]
Z1	Złoże proszkowe w stanie dostawy, proszek EOS MS1.	0-35	71,43%	0-35	16,33%	0-35	0	brak
		35-55	8,16%	35-55	4,08%	35-55	0	
		55-100	0	55-100	0	55-100	0	
Z2	Złoże proszkowe po 10 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowego proszku	0-35	59,26%	0-35	19,75%	0-35	0	Brak
		35-55	7,41%	35-55	12,35%	35-55	0	
		55-100	0	55-100	1,23%	55-100	0	
Z3	Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowym proszkiem	0-35	53,16%	0-35	27,86%	0-35	0	5,06%
		35-55	6,32%	35-55	10,13%	35-55	0	
		55-100	0	55-100	2,53%	55-100	0	
Z4	Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu bez wzbogacania nowym proszkiem	0-35	47,06%	0-35	19,12%	0-35	0	10,29%
		35-55	5,88%	35-55	23,53%	35-55	0	
		55-100	0	55-100	4,41%	55-100	0	

- Złoże Z1**

Na rysunku (rys 5.16.) zobrazowano proszek w stanie dostawy, nowy.

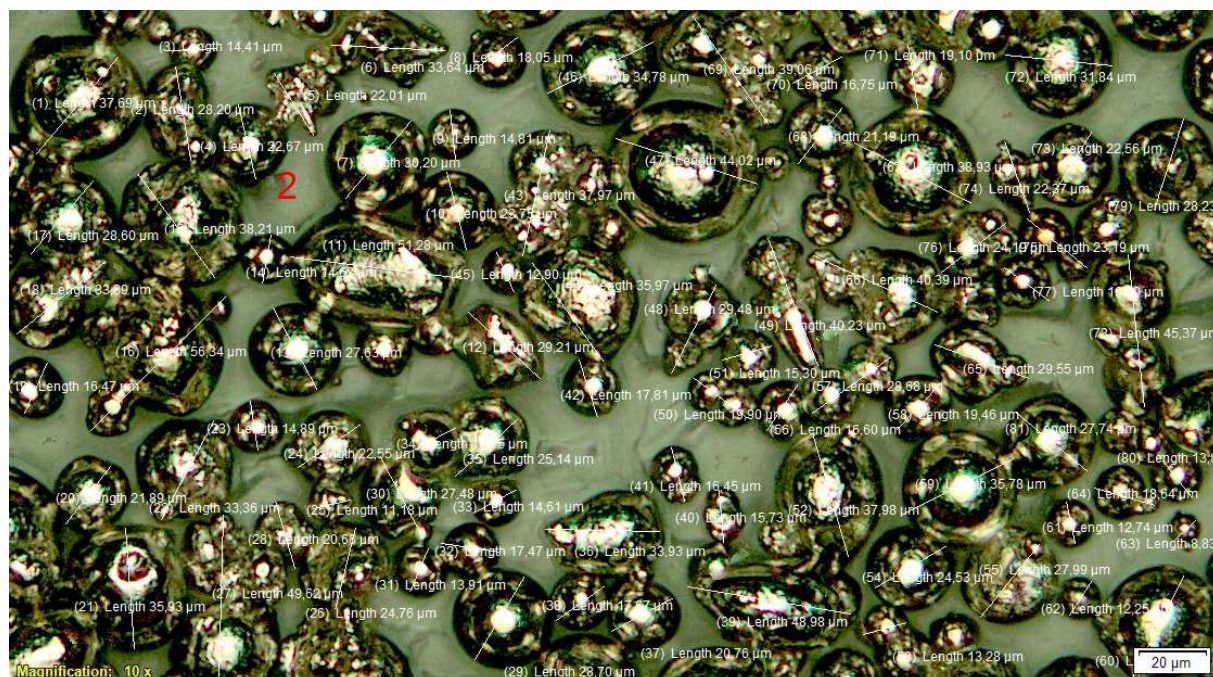


Rys. 5.16. Obraz proszku dla złoża Z1

Na podstawie danych z analizy można stwierdzić, że proszek jest zbilansowany pod kątem udziału w złożu. Częsteczek o rozmiarze do $35\mu\text{m}$ jest 71,41%. Frakcja kulek większych powyżej $35\mu\text{m}$ stanowi 8,16% udziału a dopełnieniem jest zbiór cząstek globularnych odpowiednio 16,33% w rozmiarze do $35\mu\text{m}$ i 4.08% w rozmiarze powyżej $35\mu\text{m}$. Na uwagę zasługuje fakt, że nie stwierdzono większych obiektów powyżej $55\mu\text{m}$ oraz brak cząstek z widocznymi przebarwieniami.

- **Złoże Z2**

Złoże proszkowe po 10 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowego proszku.

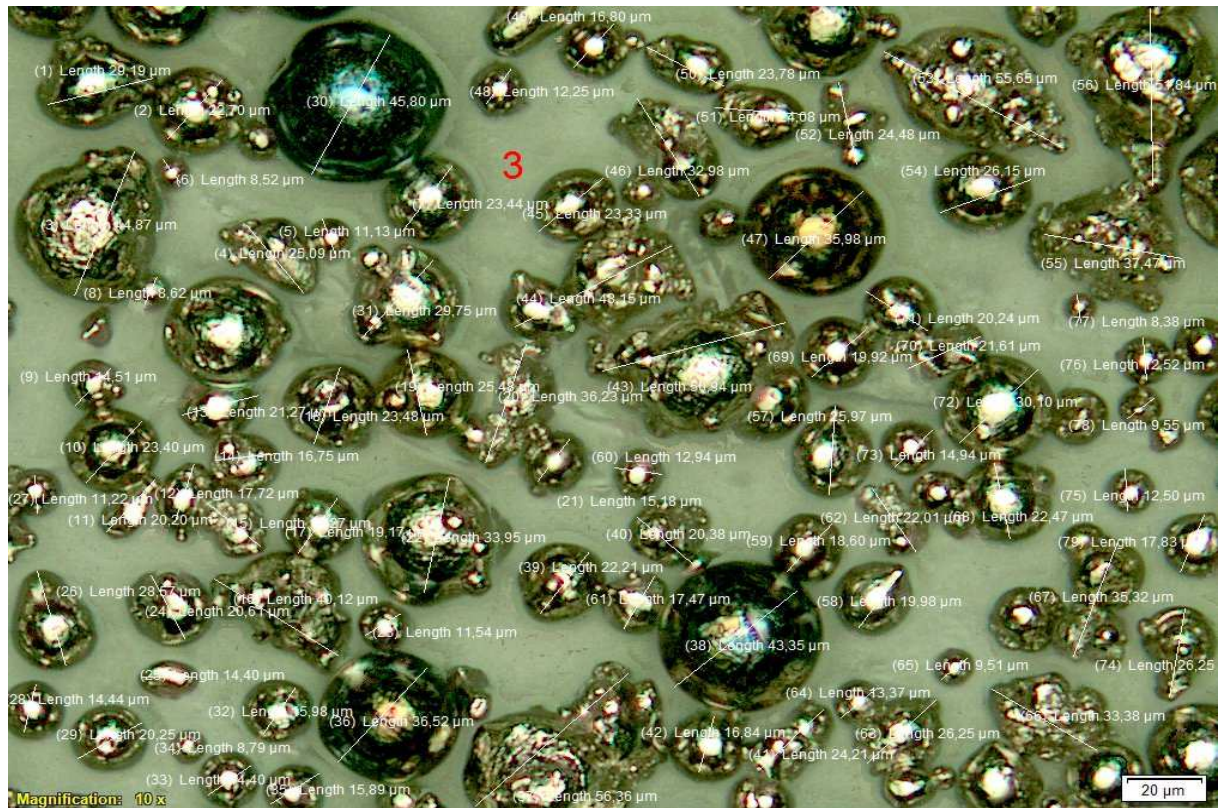


Rys. 5.17. Obraz proszku dla złoża Z2

Dla próbki proszku oznaczonego jako Z2 (rys.5.17.) można zaobserwować spadek frakcji kulistej tak dla rozmiaru do $35\mu\text{m}$ (59,26%) jak i powyżej $35\mu\text{m}$ (7,41%). Zwiększeniu ulega frakcja cząstek globularnych. Największy wzrost notujemy dla rozmiaru do $35\mu\text{m}$ (19,75%) nieco mniejszy dla frakcji $35\mu\text{m}$ - $55\mu\text{m}$ (12,35%) i odnotowany na poziomie 1,23% udział cząstek globularnych powyżej $55\mu\text{m}$ których ponad wszelką wątpliwość nie stwierdzono w złożu nowym.

- **Złoże Z3**

Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowym proszkiem.



Rys. 5.18. Obraz proszku dla złoża Z3

Na zdjęciu próbki proszku Z3 (rys. 5.18.) oraz danych z jego analizy wynika że proszek ulega degradacji. Spada udział frakcji kulistej na rzecz glonularnej oraz pojawiają się cząsteczki, których barwa świadczy oddziaływaniu termicznym. Stwierdzono odpowiednio udział frakcji kulistej do 35µm (53,16%), do 55µm (6,32%) powyżej (0%). Udział frakcji globularnej do 35µm (27,86%), do 55µm (10,13%) powyżej 55µm (2,53%). Proszek przebarwiony stanowił 5,06% w badanym złożu Z3.

- **Złoże Z4**

Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu bez wzbogacania nowym proszkiem.



Rys. 5.19. Obraz proszku dla złoża Z4

Próbka z analizy złoża Z4 przedstawiona została na rysunku (rys. 5.19.). Wyniki udziału procentowego poszczególnych frakcji zapisano w tabeli (tab. 5.16.). Z zebranych danych wynika postępujący proces zubożenia frakcji kulistej. Stanowi ona już odpowiednio 47,06% dla kulek mniejszych niż 35µm, 5,88% dla kulek pomiędzy rozmiarem 35µm a 55µm. Obserwowany jest wzrost udziału cząstek globularnych. Do rozmiaru 35µm stanowią one 19,12%, pomiędzy 35µm a 55µm ich udział zmierzono na 23,53% a większych niż 55µm jest 4,41%. Proszku z widocznym przebarwieniem jest 10,29%. Można zaobserwować że stopień przebarwienia jest większy niż zaobserwowany na złożu Z3 a istniejące „zlepy” charakteryzują się porowatą powierzchnią.

5.2.2. Badanie porowatości próbek otrzymanych ze złożeń Z1, Z2, Z3, Z4

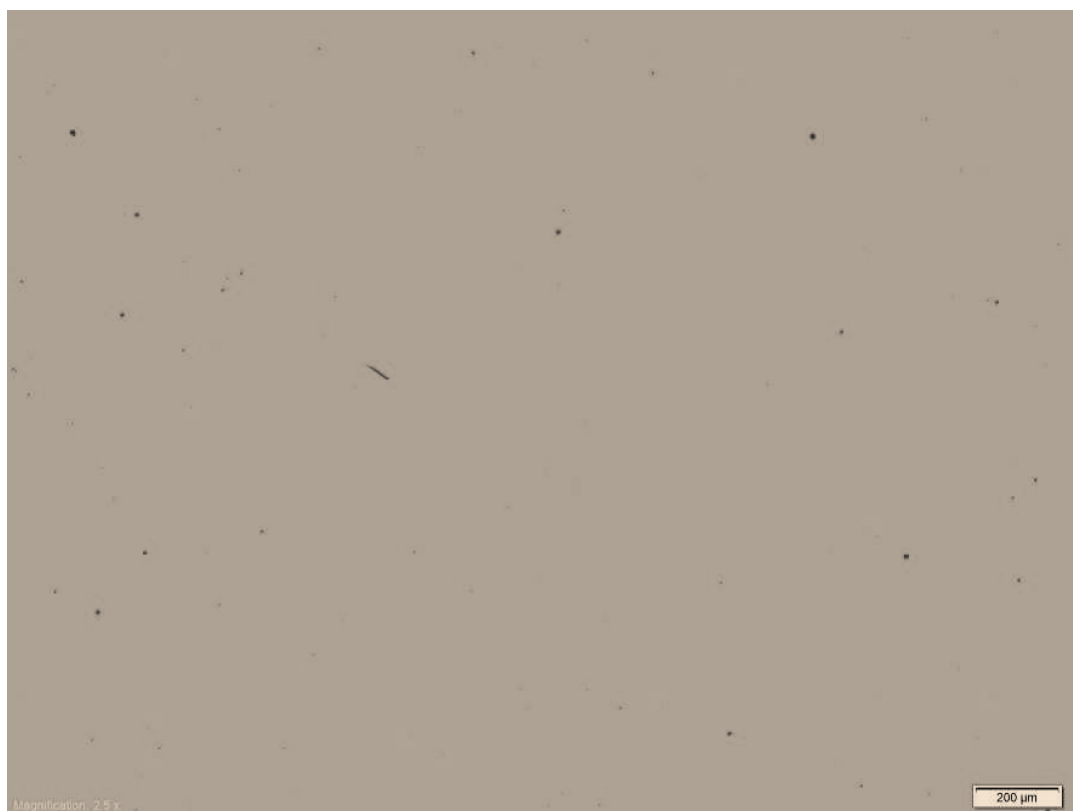
Badanie przeprowadzono podobnie jak to miało miejsce w rozdziale 5.1.1. Różnica polegała na sposobie uzyskania próbek. W badaniu wcześniejszym zmieniano parametry wiązki skanującej lasera podczas zachowania niezmienności użytego materiału (proszek MS1 w stanie dostawy). Natomiast w badaniach poniżej zastosowano niezmiennie parametry skanowania a zmienną stała się jakość złoża proszkowego. Przebadano 4 wybrane złoża proszkowe stali MS1 oznaczone odpowiednio Z1, Z2, Z3, Z4. Ustawienia parametrów skanowania przedstawiono w tabelach (tab.5.13. do tab.5.16.). W kolumnach od 2 do 5 zawarto nastawy procesowe natomiast w kolumnie 1 uzyskane wartości porowatości. Na rysunkach od 5.20 do 5.23 przedstawiono zglądy metalograficzne wykorzystane do wyznaczenia porowatości badanych złożeń Z1, Z2, Z3, Z4.

- **Złoże Z1**

Proszek stali maraging 1.2709 (EOS MS1) w stanie dostawy, nowy.

Tab. 5.13. Porowatość próbki wykonanej w procesie DMLS dla złoża Z1

Udział porów w badanym obszarze	Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy
%	[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]
0,06	100	210	90	50



Rys. 5.20. Porowatość próbki wykonanej w procesie DMLS dla złoża Z1

- **Złoże Z2**

Złoże proszkowe po 10 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacane 20% nowego proszku.

Tab. 5.14. Porowatość próbki wykonanej w procesie DMLS dla złoża Z2

Udział porów w badanym obszarze	Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy
%	[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]
0,09	100	210	90	50



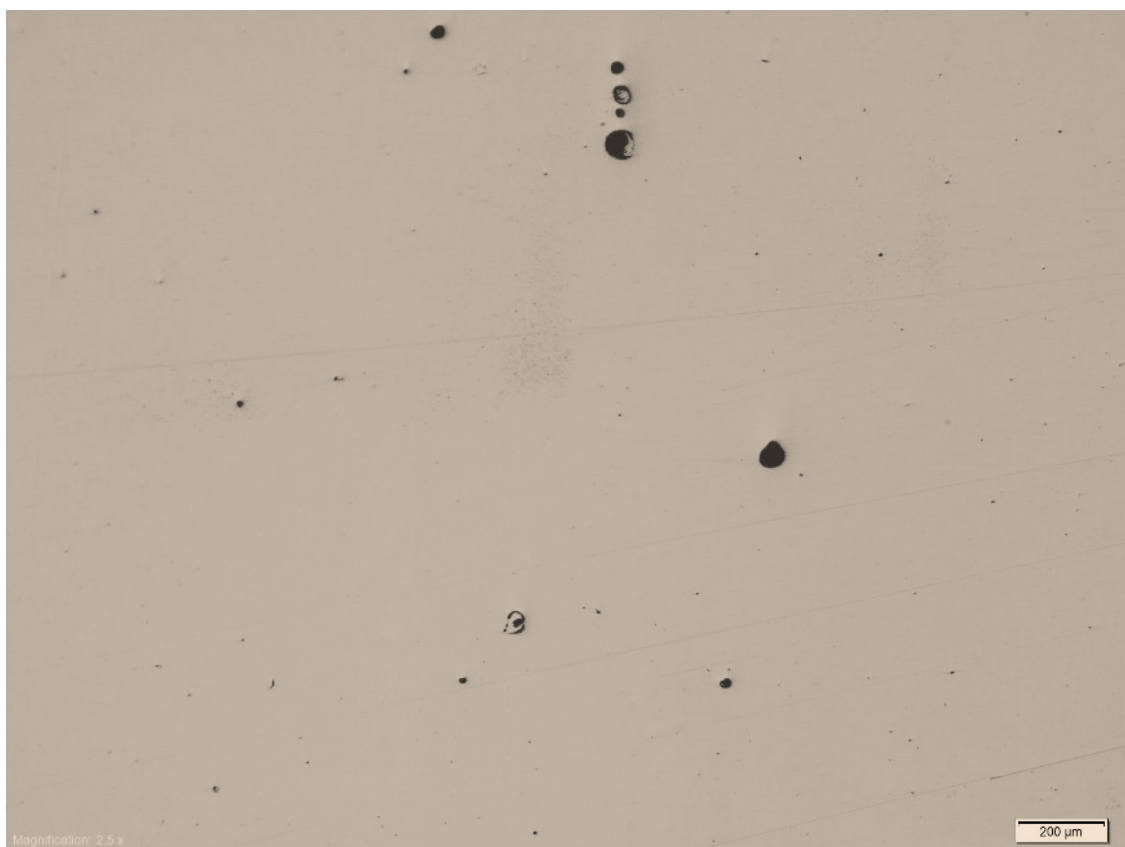
Rys. 5.21. Porowatość próbki wykonanej w procesie DMLS dla złoża Z2

- **Złoże Z3**

Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowym proszkiem.

Tab. 5.15. Porowatość próbki wykonanej w procesie DMLS dla złoża Z3

Udział porów w badanym obszarze	Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy
%	[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]
0,20	100	210	90	50



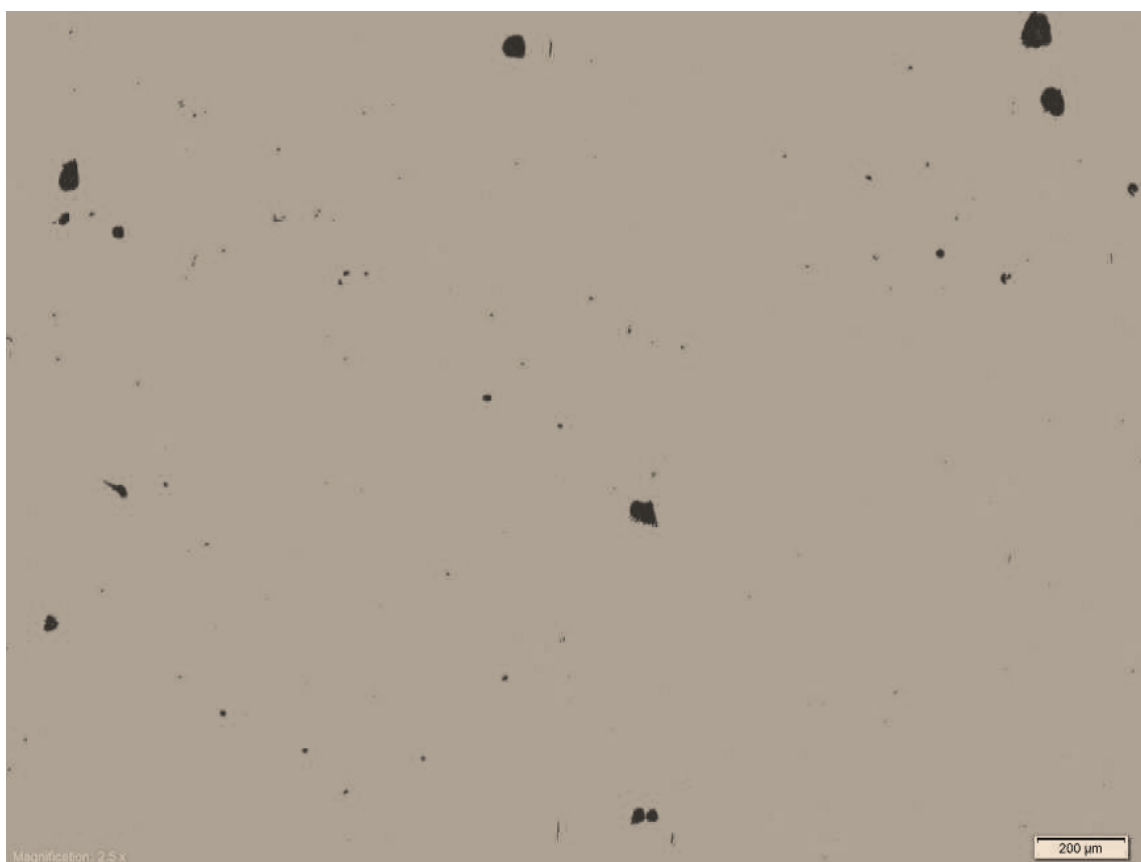
Rys. 5.22. Porowatość próbki wykonanej w procesie DMLS dla złoża Z3

- **Złoże Z4**

Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu bez wzbogacania nowym proszkiem.

Tab. 5.16. Porowatość próbki wykonanej w procesie DMLS dla złoża Z4

Udział porów w badanym obszarze	Moc wiązki	Prędkość skanowania	Odległość pomiędzy liniami skanowania	grubość warstwy
%	[W]	[mm/s]	[μm]	[μm]
0,49	100	210	90	50



Rys. 5.22. Porowatość próbki wykonanej w procesie DMLS dla złoża Z4

5.2.3. Badanie próbek otrzymanych ze złożeń Z1, Z2, Z3, Z4, obciążonych cyklicznie zmiennym obciążeniem ciśnieniowym

Badanie obejmowało określenie liczby cykli przy zadanym obciążeniu ciśnieniem czynnika roboczego jakim był olej hydrauliczny. Specjalnie zaprojektowane stanowisko do badań zmęczeniowych dostarczało ustawioną wartość obciążenia w postaci pulsującego ciśnienia czynnika roboczego do strefy przewężenia próbki badawczej. Próbki badawcze pochodziły z platformy startowej zaprojektowanej tak aby wraz z wydrukami korpusów serwozaworu uzyskać 4 próbki badawcze odpowiadające konkretnej platformie a tym samym charakterystyce złoża PBF odpowiadającego danej platformie drukowania. Materiałem złoża PBF był proszek stali 1.2709 w dostawie z firmy EOS o nazwie własnej MS1. Skład chemiczny proszku przedstawiono w tabeli (tab. 5.17.).

Tab. 5.17. Skład chemiczny proszku MS1

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti	Co
0-0.03	0-0.1	0-0.15	0-0.01	0-0.1	0-0.25	4.5-5.2	17.0-19.0	0.8-1.2	8.5-10.0

Do procesu wydruku DMLS zastosowano parametry skanowania uzyskane w trakcie badań nad porowatością w podrozdziale 5.1.1. Z uwagi na najmniejszy udział porów zastosowano zestaw parametrów nr 8 przedstawiony w tabeli (tab. 5.8.). Rozmieszczenie próbek na platformie drukowania przedstawia rysunek (rys. 5.23.).



Rys. 5.23. Płyta druku komponentów L050: 1 płyta startowa; 2 korpus serwozaworu, 3 rozdzielacz serwozaworu, 4 próbka do badań ciśnieniowych, 5 próbka do badań obrotowo giętych, 6 próbka do badań porowatości, 7 złożo proszkowe

Na przedstawionym rysunku (rys. 5.23.) oprócz próbek do ciśnieniowych badań zmęczeniowych (4) znajdowały się próbki do badań zmęczeniowych w cyklu obrotowo giętym (5), próbki do analizy porowatości (6) i próbki pobrane ze złoża PBF (7). Do badania wytypowano 4 platformy startowe różniące się między sobą stanem

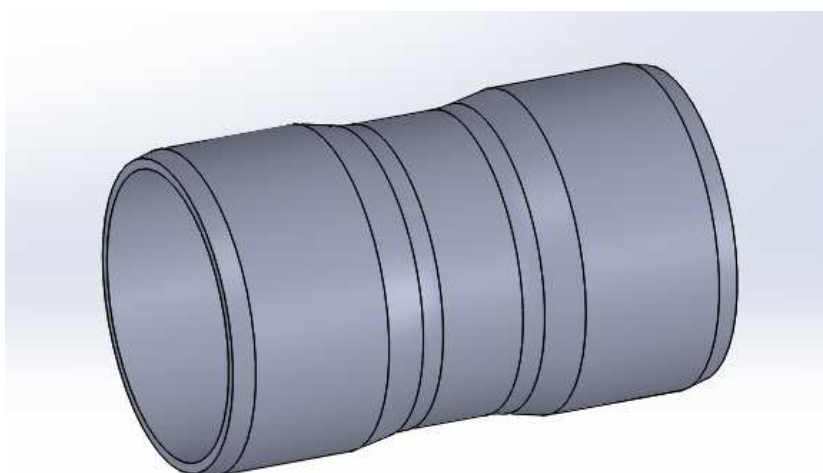
złoża proszkowego. Stan złóż proszkowych Z1, Z2, Z3, Z4, zbadano w rozdziale 5.2.1.a udział porowatości odpowiadający złożom w rozdziale 5.2.2. Wszystkie elementy umieszczone na platformie startowej zostały poddane obróbce cieplnej w tych samych warunkach. Zastosowano obróbkę cieplną w temperaturze 490°C i 6h wygrzewania, studzenie zrealizowano przez wyjęcie z pieca i swobodne wychłodzenie w temperaturze otoczenia. Próbkę do badań została poddana obróbce wykończającej szlifowaniem średnic współpracujących celem zapewnienia właściwego montażu na stanowisku badawczym. Obszary próbek poddane badaniom pozostały w stanie po procesie DMLS.

W celu dostarczenia danych porównawczych przygotowano próbki do badań nie pochodzące z procesu DMLS. W tym celu wykonano serię 9 próbek z pręta stali 1.2709. Skład chemiczny materiału w postaci pręta o średnicy 32 mm wg certyfikatu wytopu przedstawiał się jak na załączonej tabeli (tab.5.18.)

Tab. 5.18. Skład chemiczny pręta do wykonania próbek

Materiał 1.2709 pręt o średnicy 32 mm									
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Ti	Co	S max	P max
0	0	0	0	4,5	17	0,8	8,5	-	-
0,03	0,1	0,15	0,25	5,2	19	1,2	10	0,01	0,01

Pręt o średnicy 32mm został poddany obróbce ubytkowej poprzez toczenie. Próbkę toczoną do badań ciśnieniowych wykonano wg tego samego rysunku co próbki drukowane (rys 5.24.). Grubość ścianki obszaru ekspozycji na ciśnienie wynosiła 0,5 mm +/- 0,02. Próbkę różniły się od próbek z procesu DMLS jakością wykończenia powierzchni w strefie oddziaływania. Dla próbek po procesie DMLS chropowatość w strefie oddziaływania wynosiła Ra10 zaś dla próbek po obróbce skrawaniem Ra1,25.



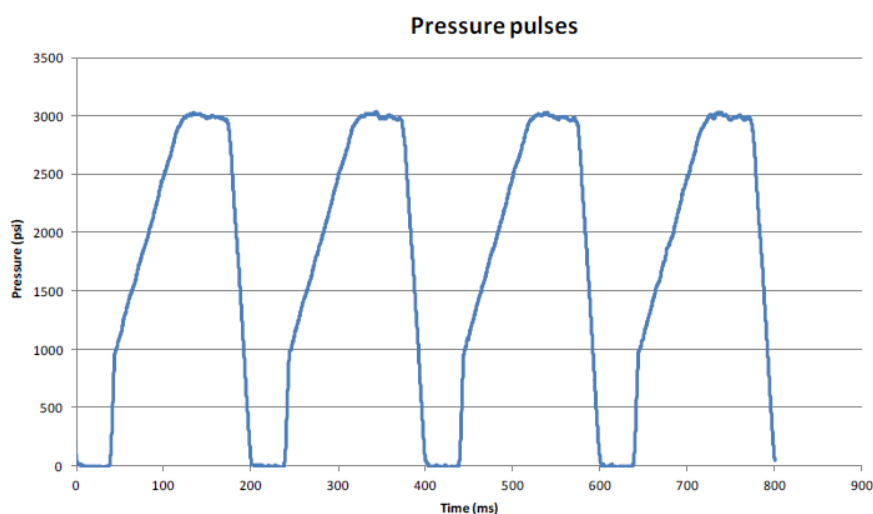
Rys. 5.24. Model 3D-CAD do wykonania próbki z pręta metodą obróbki skrawaniem

Próbki po toczeniu zostały poddane obróbce cieplnej w procesie identycznym jak dla próbek DMLS a następnie szlifowane. Próbki do ciśnieniowych badań zmęczeniowych wykonane w procesie DMLS oraz próbki uzyskane metodą obróbki skrawaniem oznakowano i opisano w tabeli (tab.5.18.).

Tab. 5.18. Numery próbek wraz z opisem użytego złoza materiału i jego stanu

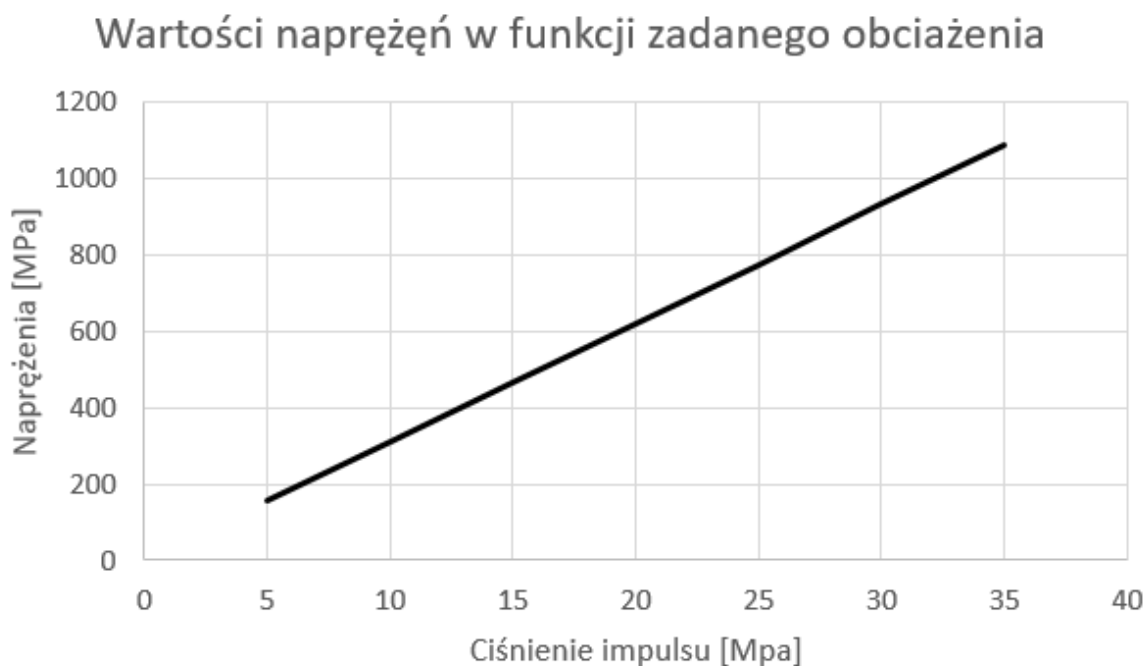
Próbka nr	Nazwa materiału	Opis stanu
PM_01-PM_09	1.2709 metalurgiczny	Próbki wykonane z pręta stali 1.2709 klasyczną metodą obróbki skrawaniem.
PZ1_11-PZ1_14	Z1	Złoże proszkowe w stanie dostawy, proszek EOS MS1.
PZ2_21-PZ2_24	Z2	Złoże proszkowe po 10 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowym proszku
PZ3_31-PZ3_34	Z3	Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowym proszkiem
PZ4_41-PZ4_44	Z4	Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu bez wzbogacania nowym proszkiem

Próbki zostały poddane obciążeniom o zmiennym w czasie charakterze. Charakterystykę obciążenia przedstawia rysunek (rys. 5.25.). Jest to przykładowy obraz zarejestrowany na oprogramowaniu badawczym. Wartość 3000 psi odpowiada 20.68 MPa a częstotliwość pulsacji wynosi 5Hz. W przeprowadzonych badaniach, w celu wyznaczenia krzywej Wohlera S-N (stres vs liczbie cykli , to znaczy zadana wartość maksymalnego naprężenia szczytowego i uzyskana przy nim liczba cykli”) stosowano różne wartości amplitudy obciążenia pozostawiając częstotliwość na niezmiennym poziomie 5Hz.



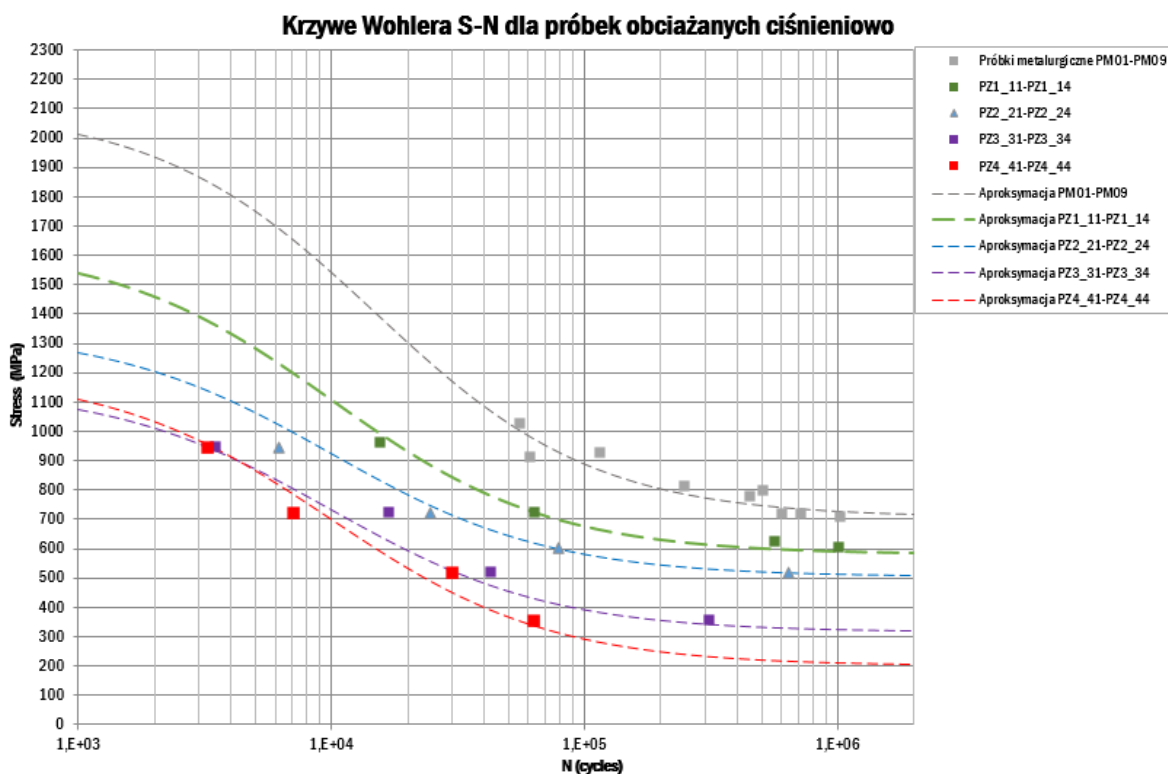
Rys. 5.25. Przykładowa charakterystyka przebiegu obciążenia próbki badawczej

W celu określenia wartości amplitudy impulsu potrzebnego do wywołania wymaganych naprężeń w badanej próbce ciśnieniowej posłużono się funkcją liniową odpowiadającą wartości naprężeń wewnętrznych uzyskiwanych w próbce do zadanej amplitudy obciążenia. Wykres przygotowano na podstawie analizy MES dla wybranych wartości ciśnienia testowego czynnika roboczego i przedstawiono na rysunku (rys. 5.26.).



Rys. 5.26. Wykres wartości uzyskiwanych naprężeń wewnętrznych w funkcji zadanego ciśnienia impulsu

Dla każdego zestawu próbek pochodzącego z jednej rodziny, czyli scharakteryzowanego wg sposobu wykonania, przeprowadzono ciśnieniowe badania zmęczeniowe. Wykonano 16 prób, 4 dla złoza nr Z1, 4 dla złoza nr Z2, 4 dla złoza nr Z3 i 4 dla złoza nr Z4. Ponadto wykonano 9 testów dla próbek odniesienia uzyskanych w procesie obróbki skrawaniem. Wyniki badań przedstawiono w postaci rysunku (rys. 5.27.) przedstawiającego punkty określające liczbę uzyskanych cykli dla panujących zmiennych naprężeń wewnętrznych. Dla osi cykli zastosowano skalę logarymiczną. Dla wyznaczonych punktów wykreślono krzywe Wohlera S-N.

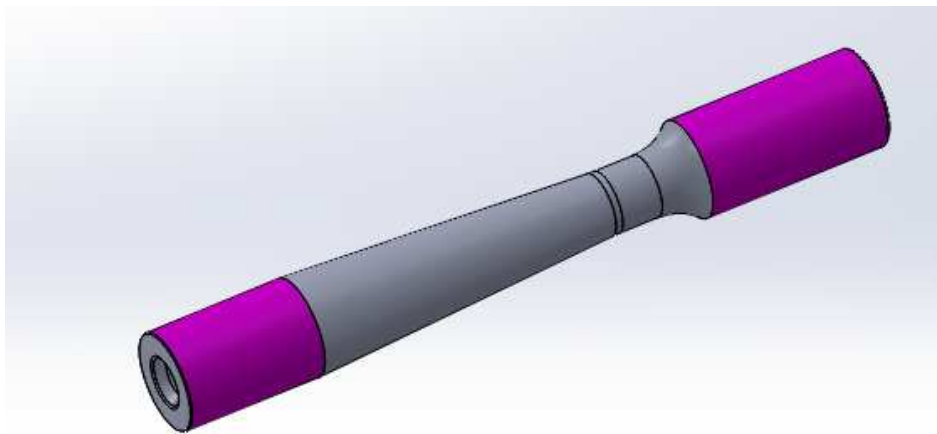


Rys. 5.27. Wykres wartości uzyskiwanych naprężeń wewnętrznych w funkcji zadanego ciśnienia impulsu

Z przeprowadzonych badań można zaobserwować spadek liczby uzyskanych cykli dla złożeń proszkowych ulegających zmianom w procentowym udziale poszczególnych frakcji proszku. Dla złoża proszkowego opisanego jako Z1, stanowiącego nowy proszek MS1 złoża PBF stwierdzono mniejszą wytrzymałość zmęczeniową w odniesieniu do próbek uzyskanych z materiału metalurgicznego. Zmniejszona wytrzymałość może być efektem zastosowania technologii DMLS lub jakości wykończenia powierzchni jakie uzyskano dla próbek obrabianych skrawaniem. Różnice w chropowatości próbek po DMLS i po obróbce skrawaniem odpowiadają stosunkowi Ra10 do Ra1. Można stwierdzić, że potrzebne są dodatkowe badania w tym obszarze, jednak wykraczałoby to znacznie poza obszar zakresu badań przyjęty w dysertacji.

5.2.4. Badanie próbek otrzymanych ze złożeń Z1, Z2, Z3, Z4, obciążonych cyklicznie zmiennym momentem obrotowym

Badanie przeprowadzono na zaprojektowanym i zbudowanym w tym celu stanowisku do badań. Obciążenie obrotowym momentem gnącym realizowane było poprzez zawieszenie obciążnika o znanej masie na końcu próbki umieszczonej w obrotowym uchwycie. Poprzez dobranie prędkości obrotowej uchwytu zrealizowano funkcję cyklicznie zmiennego obciążenia momentem obrotowym. Liczbie cykli odpowiadała ilość zliczonych przez licznik obrotów do chwili zerwania próbki i zatrzymania próby. Wartość obciążenia i liczba cykli posłużyły do wyznaczenia krzywej zmęczeniowej. Próbki do badań pochodziły z wydruku DMLS zaprojektowanej w tym celu platformy startowej zawierającej elementy serwozaworu. Wydruk obejmował 4 platformy startowe wykonane dla 4 wariantów badanego złożeń proszkowego proszku stali 1.2709 w dostawie z EOS i nazwie własnej MS1 oraz składem pierwiastków stopowych wg tabeli (tab. 5.17.). Uzyskano 4 próbki z złożeń Z1, 4 próbki ze złożeń Z2, 4 próbki ze złożeń Z3 i 4 próbki ze złożeń Z4. Parametry skanowania użyte do procesu DMLS to zestaw parametrów nr 8 (tab.5.8.). Rozmieszczenie próbek na platformie drukowania przedstawiono na rysunku (rys.5.23.). Wszystkie elementy otrzymane z wydruku zostały poddane obróbce cieplnej w tych samych warunkach. Zastosowano obróbkę cieplną w temperaturze 490°C i 6h wygrzewania, studzenie zrealizowano przez wyjęcie z pieca i swobodne wychłodzenie w temperaturze otoczenia. Próbki do badań zostały podane obróbce wykończającej, szlifowaniem średnic współpracujących, celem zapewnienia właściwego montażu na stanowisku badawczym. Obszary próbek poddane badaniom pozostały w stanie po procesie DMLS. Na rysunku (rys. 5.28.) przedstawiono szkielet próbki do badań w cyklu obrotowo giętym. Szlifowane powierzchnie cylindryczne, oznaczone kolorem indygo, służą mocowaniu w przyrządzie badawczym. Strefa oczekiwanego pęknięcia charakteryzuje się ścianką o grubości 0,5 mm i chropowatością powierzchni po procesie DMLS na poziomie Ra10.



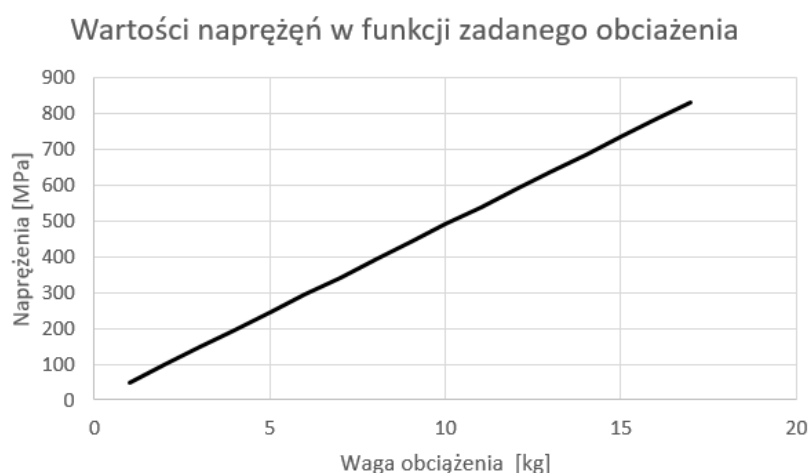
Rys. 5.28. Model 3D-CAD próbki do badań obrotowo giętych

Próbki do zmęczeniowych badań w cyklu obrotowo giętym oznaczono i opisano w tabeli (tab.5.19.). Badania przeprowadzono dla 4 próbek uzyskanych ze złoża Z1, 4 próbek uzyskanych ze złoża Z2, 4 próbek uzyskanych ze złoża Z3 i 4 próbek uzyskanych ze złoża Z4. Łącznie przebadano 16 próbek.

Tab. 5.19. Numery próbek wraz z opisem użytego złoża materiału i jego stanu

Próbka nr	Nazwa materiału	Opis stanu
RZ1_11 RZ1_12 RZ1_13 RZ1_14	Z1	Złoże proszkowe w stanie dostawy, proszek EOS MS1.
RZ2_11 RZ2_12 RZ2_13 RZ2_14	Z2	Złoże proszkowe po 10 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowym proszku
RZ3_11 RZ3_12 RZ3_13 RZ3_14	Z3	Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu wzbogacone 20% nowym proszkiem
RZ4_11 RZ4_12 RZ4_13 RZ4_14	Z4	Złoże proszkowe po 30 krotnym użyciu i przesiewaniu bez wzbogacania nowym proszkiem

W celu określenia wartości obciążenia zawieszzonego na lince potrzebnego do wywołania wymaganych naprężeń w badanej próbce posłużono się funkcją liniową odpowiadającą wartości naprężeń wewnętrznych uzyskiwanych w próbce po przyłożeniu obciążenia. Wykres przygotowano na podstawie analizy MES przy wybranych wartościach obciążenia roboczego i przedstawiono na rysunku (rys. 5.29.).



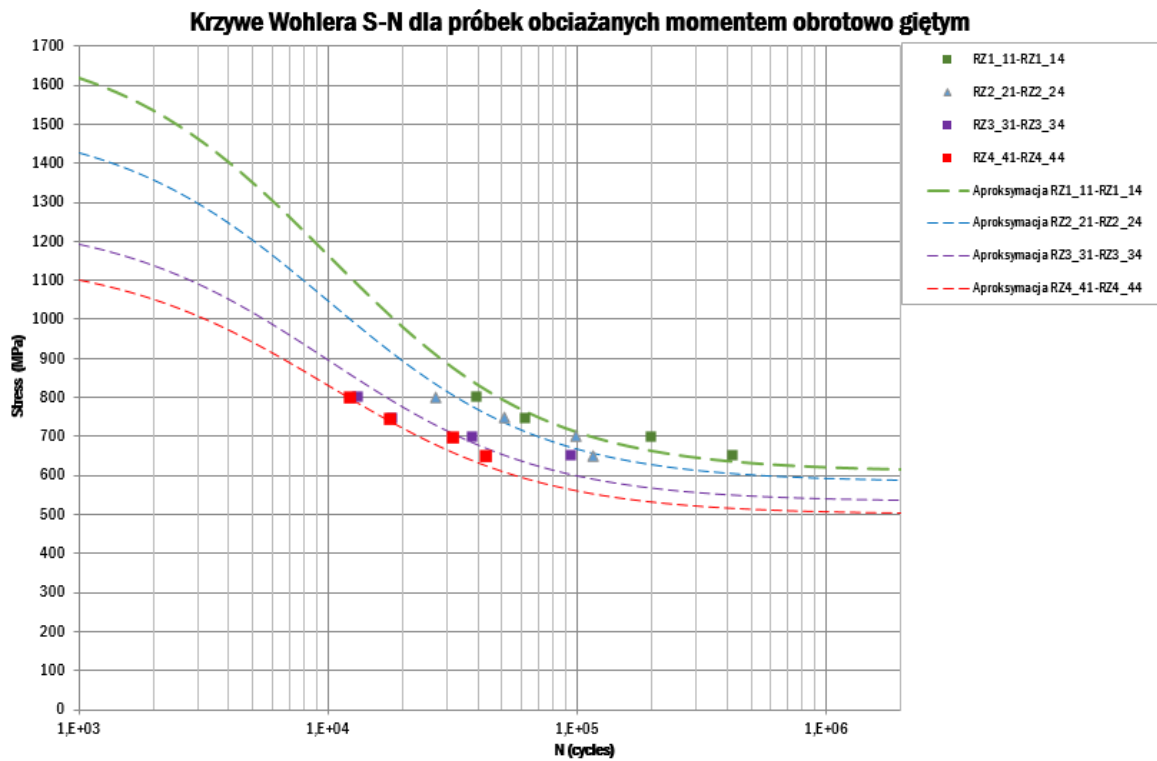
Rys. 5.29. Wykres wartości uzyskiwanych naprężeń wewnętrznych w funkcji przyłożonego obciążenia

Próbki testowano poprzez zakładanie obciążenia na próbkę w postaci odważników krążkowych za pomocą linki umocowanej na rolce obrotowej z jednej strony a z drugiej w uchwycie obrotowym wrzeciona obrotowego (rys.5.30.).W celu ograniczenia wpływu tętnień momentu wynikającego z położenia osi głównej obrotu próbkę osiowano w uchwycie. Ramię momentu gnącego było niezmiennie dla wszystkich próbek. Zapewniał to warunek zachowania wymiaru 41[mm] (rys.4.11.) od strefy przewężenia do końca powierzchni cylindrycznej na której osadzano obrotowy krążek z łożyskiem.



Rys. 5.30. Próbkę do badań obrotowo giętych umieszczoną na stanowisku badawczym

Z uwagi na charakter obciążenia próbki poddawane były sinusoidalnemu rodzajowi obciążenia realizowanego z częstotliwością 7,5 Hz. Amplituda obciążenia zależała od wartości zawieszono obciążnika. Stosowano 4 wartości obciążenia wywołujące naprężenia w badanej próbce odpowiednio 16,25 kg dla $\sigma_{max}=800\text{MPa}$, 15 kg dla $\sigma_{max}=750\text{MPa}$, 14 kg dla $\sigma_{max} 700\text{MPa}$ i 13.5 kg dla $\sigma_{max} 650\text{MPa}$. Wyniki uzyskanych liczby cykli i odpowiadających im naprężeń przedstawiono na wykresie (rys.5.31.). Są one przedstawione jako punkty charakterystyczne przyporządkowane kolorem do numeru złoza proszkowego zgodnie z opisem na wykresie. Na podstawie punktów charakterystycznych wykreślono krzywe zmęczeniowe dla każdego złoza proszkowego. Krzywe te odpowiadają wartościom naprężeń S w funkcji uzyskanej liczby cykli N.



Rys. 5.31. Wykres naprężeń wewnętrznych S do wartości cykli N dla badań zmęczeniowych w cyklu obrotowo giętym

Na podstawie wykonanych badań i wykonanego wykresu można stwierdzić, że stan złoza proszkowego ma wpływ na ilość uzyskiwanej liczby cykli w badaniach zmęczeniowych obrotowo giętych.

6. Podsumowanie i wnioski

Głównym założeniem dla prowadzonych badań było opracowanie założeń metodyki projektowania i wytwarzania prototypu serwowozoru RL50 z wykorzystaniem badań i analizy parametrów procesu PBF w tym parametrów jakości i degradacji złoża proszkowego, których część była realizowana w ramach Programu Operacyjnego Polska Wschodnia, działania 1.3 Ponadregionalne powiązania kooperacyjne, nazwa projektu: „Nowa generacja zaworów dla lotniczych układów hydraulicznych” w Firmie YASA. Wielopłaszczyznowa analiza wymagań stawianych konstrukcji potrzebowała zorganizowania pracy nad zadaniami według charakterystyki problemu. Realizacja badań przedstawionych w dysertacji była istotnym zadaniem w przedmiotowym projekcie i dotyczyła analizy dostępnych technik PBF, określenie ich potencjału najpierw na podstawie przeprowadzonej analizy zagadnienia a następnie dokonanie weryfikacji poprzez przeprowadzenie badań doświadczalnych. Badania te pozwoliły określić charakterystyczne właściwości dla obiektów cienkościennych wykonywanych w technologii SLM i DMLS. Poznanie mechanizmów rządzących procesem addytywnym opartym na złożach proszku PBF pozwoliło na dobór technologii, którą zarekomendowano do zastosowania w procesie produkcyjnym.

Praca nad zastosowaniem technologii druku 3D do projektu nowej generacji serwowozorów dla lotnictwa stała się impulsem do podjęcia decyzji o poszerzeniu wiedzy w zakresie inżynierii mechanicznej w obszarze naukowym i również aplikacyjnym w ramach programu „doktorat wdrożeniowy”. Realizacja celów pracy była związana z uzyskaniem wyników pozwalających na zdobycie punktu odniesienia, zweryfikowaniu tez i założeń sformułowanych na podstawie analizy stanu zagadnienia. Stało się to podstawą do metodycznego i merytorycznego spojrzenia na zagadnienia w konstrukcjach z wykorzystaniem technologii druku 3D opartej na złożach proszkowych PBF.

Realizacja badań pozwoliła określić główne założenia metodyki konstruowania i wytwarzania elementów cienkościennych w procesie PBF. Wyznaczono cechy geometrii takie jak minimalna bezpieczna grubość ścianki dla portów ciśnieniowych, wymagane strefy podparcia niezbędne do druku w oparciu o złożo PBF (patent nr 227484: „Sposób wykonania bloku zaworu lotniczego”). Maksymalne nie wymagające struktur wsporczych otwory o osi równoległej do płaszczyzny płyty startowej. Strategię prowadzenia wiązki lasera (hatching), parametry skanowania konturów wewnętrznych i zewnętrznych, strategię dla tzw. upskin i downskin. Dobór mocy lasera dla cienkościennych elementów korpusu zaworu. Dobór prędkości skanowania dla elementów cienkościennych. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano sposób projektowania kompletnych płyt startowych z korpusami serwowozoru oraz próbkami do weryfikacji jakości otrzymywanych wydruków 3D. Opracowano metodykę doboru zabiegów post-procesowych, m.in. kolejność wstępnego oczyszczania z pozostałego proszku, dokładne wytrząsanie całej płyty startowej za

pomocą prototypu wytrząsarki zaprojektowanej w tym celu, odcinanie, metody obróbki powierzchni za pomocą obróbki piaskowaniem rodzaj korundu, kolejność piaskowania stref zaworu, obróbkę cieplną, kolejny zabieg piaskowania i obróbkę ubytkową na centrum CNC z zastosowaniem techniki przepłukiwania specjalnie zaprojektowaną dyszą dla chłodziwa pod ciśnieniem 4 MPa. Ostatni zabieg przepłukiwania zastosowano na końcowym etapie obróbki CNC i pozwolił on wypłukać pozostałości drobnych wiórów po obróbce skrawaniem. Parametry skrawania i geometria ostrza narzędzi również został dobrana tak by struktura powstającego wióra była możliwa do usunięcia. Cały proces postępowania z elementami drukowanymi dla korpusu serwowaworu RL050 został oparty na badaniach potwierdzających ich powtarzalność pod względem jakości i wytrzymałości. Badania przedstawione w drugim etapie jako badania DMLS to wyniki z analiz porowatości i wytrzymałości zmęczeniowej w których skupiono się na wpływie degradacji złoża PBF. Jak potwierdza to analiza stanu zagadnienia najwyższą jakość w aspekcie wytrzymałości zmęczeniowej jest możliwa do uzyskania na nowym proszku. Z dostępnych prac o podobnym charakterze nie spotkano się z opisem problemu dotyczącym degradacji złoża dla stali 1.2709. Przeanalizowane prace odnosiły się do złożów nowych i niezdegradowanych wcześniejszymi procesami DMLS w których występowały różne frakcje rozmiarowe materiału proszkowego. Mając na uwadze czynniki ekonomiczne i świadomość pytania: jak bardzo i w jaki sposób złożo może odbiegać od „idealnego”, nowego?, przeanalizowano i zebrano badania dla kilku wariantów jego degradacji w rozumieniu udziału charakterystycznych frakcji geometrycznych i wymiarowych pojedynczych cząsteczek proszku. Na podstawie tych badań zdefiniowano maksymalne wartości naprężeń w strukturach cienkościennych pozwalające zachować bezpieczne warunki konstrukcji. Dane te stały się wytycznymi, których należy przestrzegać w produkcji seryjnej korpusu serwowaworu RL50 jak również innych konstrukcji o podobnej specyfice.

6.1. Wnioski z badań z analizy procesy przyrostowego SLM

W tej części przedstawiono wnioski z badań uzyskanych dla próbek z procesu SLM. Badania obejmowały, określenie gęstości otrzymanych wydruków czyli badania porowatości, wytrzymałości zbadanej przy użyciu klasycznej próby rozciągania i znormalizowanych próbek, wytrzymałości zmęczeniowej również dla znormalizowanych próbek, badania trybologiczne i weryfikację twardości metodą Vickersa.

- **Badania porowatości**

W wyniku przeprowadzonych poszukiwań parametrów procesu SLM z pośród zebranych analiz porowatości uzyskanych dla nastaw procesowych można

zaobserwować, że koncentracja energii wiązki lasera procesu skanowania wpływa na gęstości otrzymywanego materiału. Potwierdza to analiza porowatości przebadanych próbek. Dla próbek uzyskanych odpowiednio dla zestawów parametrów skanowania od 1 do 4 porowatość wynosiła od 0,44% do 1,06%. Wartość energii dostarczanej do 1mm^3 proszku kształtował się na poziomie $204\text{J}/\text{mm}^3 \pm 3\text{J}/\text{mm}^3$. Dla próbek wykonanych odpowiednio dla zestawów parametrów od 5 do 8 porowatość wynosiła od 0,08% do 0,11%. Zakres energii dostarczony do 1mm^3 proszku kształtował się na poziomie $92 \pm 10\text{J}/\text{mm}^3$. Różnicę w koncentracji energii zrealizowano nie poprzez modulację mocy wiązki lasera a poprzez zmianę parametru dystansu pomiędzy kolejnymi liniami skanowania z $40\mu\text{m}$ do $90\mu\text{m}$ i grubościami warstw przetapianych z $40\mu\text{m}$ do $50\mu\text{m}$. Pozwoliło to obniżyć porowatość o 0,55%. W kwestii ilości dostarczanej energii do przetapianego obszaru materiału proszkowego, a co się z tym wiąże dynamiki procesu rozpraszania energii przez konwekcje przy SLM zaobserwowano, że w przypadku dużych koncentracji energii zaczynają odgrywać rolę procesy deformacyjne wynikające z szybkości rozpraszania energii. Dla obiektów masywnych gdzie warunki rozpraszania energii w głąb materiału już wydrukowanego i dalej do płyty startowej są dobre, efekty odkształceń termicznych są małe i mogą ujawnić się dopiero po odcięciu wydruku z płyty startowej. W przypadku konstrukcji lekkiego korpusu serwozaworu te same parametry wywołują znaczne naprężenia termiczne i powodują duże deformacje. Parametry dobrane doświadczalnie z zakresem koncentracji energii na poziomie $100\text{J}/\text{mm}^3$ dla stali 1.2709 i pozwalają uzyskiwać strukturę o porowatości w okolicach 0,1% przy bardzo małych odkształceniach. Zaobserwowano również, że wartości porowatości tak dla zestawu od 1-4 jak i od 5-8 odznaczają się rozrzutem wartości porowatości na poziomie 0,44% do 1,06% i od 0,08% do 0,11%.

- **Badania wytrzymałości w statycznej próbie rozciągania**

Z przeprowadzonego badania zestawu próbek wykonanych na wspólnej platformie startowej z parametrami skanowania dla zestawu parametrów nr 8 wynika, że próbki uzyskują różne wartości wytrzymałości na rozciąganie. Różnice mieszczą się w przedziale od 1287 MPa do 1603 MPa. Wartości granic plastyczności są zdefiniowane w przedziale naprężeń od 1204 MPa do 1530 MPa. Zebrane wartości pozwalają wnioskować, że mimo zachowania niezmiennych nastaw procesu skanowania istnieją czynniki wpływające na wartości otrzymywanych wyników naprężeń. Reasumując jedynym czynnikiem który mógł mieć wpływ na wyniki próby był proszek.

- **Badania zmęczeniowe**

Na podstawie zrealizowanych prób zmęczeniowych dla zestawu próbek wykonanych na wspólnej platformie startowej z parametrami skanowania dla zestawu parametrów nr 8 prognozuje się, że wytrzymałość zmęczeniowa stali 1.2709 w warunkach jednostronnego rozciągania ($R = 0,05$) dla granicznej liczby cykli $N_g = 300\ 000$ przyjmuje wartość w zakresie 210-250 MPa.

- **Badania trybologiczne**

Wyniki badań pozwoliły określić siły tarcia dla pary próbek wykonanych w procesie SLM z proszku stali MS1 (1.2709). Próby przeprowadzono z dodatkiem oleju hydraulicznego MIL PRF 5606H o klasie lepkości wg ISO VG 15 stosowanego w układach hydrauliki siłowej. Pozwoliło to określić wartości sił dla pracy w stanie zwilżonym. Wyniki dla próby wyznaczenia współczynnika tarcia kinetycznego w wariancie temperaturowym gdzie siła obciążenia pozostawała niezmienną, ustawioną na poziomie 50 N nacisku. W wyniku zadawania skokowo zmiennych warunków temperaturowych od 30°C do 100°C można zaobserwować spadek siły tarcia. Uzyskana wartość na poziomie $\mu_k = 0.1$ określa poziom odpowiadający siłom tarcia występujących w prototypie serwowozoru RL050. Temperatura pracy serwowozoru jest określona na poziomie 42°C +/- 5°C. W wariancie obciążeniowym natomiast zmianie ulegała wartość nacisku w prowadzonej próbie. Z przeprowadzonych badań wynika, że wartość współczynnika tarcia μ_k spadała wraz ze zwiększeniem obciążenia. Badania zatem potwierdzają możliwość zastosowania pary skojarzonej stal maraging 1.2709 ze stalą 1.2709 do zastosowania w budowie prototypu serwowozoru RL050.

- **Badania twardości**

Wyniki badań twardości wykazały, że otrzymywane wydruki z proszku stali MS1 (1.2709) poddane procesowi obróbki cieplnej w temperaturze 490°C i 6h wygrzewania, potwierdziły wartości oczekiwanych twardości. Zbliżone wartości twardości uzyskano tak dla obszarów grubościennych jak i dla struktur cienkościennych. Na podstawie badań twardości nie stwierdzono wpływu jakości złoża proszkowego na uzyskiwane wyniki.

6.2. Wnioski z badań z analizy procesy przyrostowego DMLS

• **Badania morfologii złożeń proszkowych Z1, Z2, Z3, Z4**

Na podstawie przeprowadzonych badań morfologii stwierdzono, że wraz z kolejnymi powtórzeniami procesu DMLS dla określonej metody odświeżania złoża PBF zachodzą zmiany w udziale frakcji rozmiarowych badanych próbek Z1, Z2, Z3, Z4. W odniesieniu do próbki Z1, która stanowi proszek nowy w stanie dostawy, pozostałe próbki Z2, Z3, Z4 odbiegały w rozkładzie wielkości pojedynczych kulek. Frakcja kulista o rozmiarach do 35 μ m zmniejszała swój udział w złożach Z2, Z3, Z4. Z uwagi na fakt użycia sita o rozmiarze oczka 45 μ m do przesiewania i przygotowywania kolejnego złoża oraz na wzbogacaniu złoża proszkiem nowym w określonym procentowo stosunku złoża od Z1 do Z4 zmniejszyły udział procentowy frakcji 0-35 μ m odpowiednio od Z1 do Z2 o 12,17%, od Z1 do Z3 o 18,17%, od Z1 do Z4 o 24,37%. Złoża od Z1 do Z4 zmniejszyły udział procentowy frakcji 35-55 μ m odpowiednio od Z1 do Z2 o 0,75%, od Z1 do Z3 o 1,84%, od Z1 do Z4 o 2,28%. Frakcja 55-100 μ m nie występowała z uwagi na jej brak w proszku nowym od producenta. Obserwowane zmniejszenie się frakcji kulistej zostało zastąpione frakcją globularną. Dla złoża nowego wynosiła ona 16,33% dla frakcji od 0 μ m do 35 μ m, 4,08% dla frakcji od 35 μ m do 55 μ m i 0% dla frakcji powyżej 55 μ m. Dla złoża Z2 19,75% dla frakcji od 0 μ m do 35 μ m, 12,35% dla frakcji od 35 μ m do 55 μ m i 1,23% dla frakcji powyżej 55 μ m. Dla złoża Z3 27,86% dla frakcji od 0 μ m do 35 μ m, 10,13% dla frakcji od 35 μ m do 55 μ m i 2,53% dla frakcji powyżej 55 μ m. Dla złoża Z4 19,12% dla frakcji od 0 μ m do 35 μ m, 23,53% dla frakcji od 35 μ m do 55 μ m i 4,41% dla frakcji powyżej 55 μ m. Zanieczyszczeń nie stwierdzono. Odnotowano natomiast zmianę zabarwienia cząsteczek. Dla Z1 i Z2 nie odnotowano zmiany barwy natomiast dla Z3 5,06% cząstek miało widoczne efekty oddziaływania termicznego a dla Z4 już 10,29%. Z przeprowadzonej analizy stanu złoża PBF dla 4 różnych wariantów jego przygotowania wynika prawidłowość, że im więcej razy złożo jest wykorzystywane w kolejnych procesach tym bardziej uboższe frakcja kulista 0-35 μ m co powoduje nierównomierne wypełnienie przestrzeni pomiędzy większymi, globularnymi cząsteczkami. Może to stanowić tworzenie się obszarów pustych, które w procesie DMLS przekształcają się w obszary porów.

• **Badania porowatości próbek uzyskanych ze złożeń Z1, Z2, Z3, Z4**

Z badania porowatości dla próbek z proszku MS1 w specyfikacjach Z1, Z2, Z3, Z4 uzyskano różne wartości porowatości. Różnice mieszczą się w zakresie od 0,06% do 0,49%. Z uwagi na zastosowanie tych samych parametrów skanowania dla procesu DMLS, zestaw nr 8, można zaobserwować spadek porowatości uzyskanych w badaniach SLM z wartości 0,08% do 0,06% dla DMLS udziału porów w badanej

strukturze. Jedynym czynnikiem który mógł ulec zmianie jest charakter morfologii złoza proszku. W badaniach SLM nie był on brany pod uwagę. Pozostając jedynie przy analizie wyników z procesu DMLS uzyskanych dla różnych złożeń proszkowych można stwierdzić że jakość złoza wpływa na otrzymywane wyniki porowatości wydruków. Jak potwierdza to badanie najniższy udział porów obserwujemy dla złoza Z1, proszek nowy, 0,06%. Co istotne złoże Z2 również cechuje się niskim udziałem porów w otrzymanej strukturze 0,09%. Dla złoza Z3 porowatość osiąga 0,2% a dla Z4 już 0,49%. Można zatem stwierdzić że zmniejszenie udziału kulek proszku o rozmiarze 0-35 μ m o około 12% i zwiększenie udziału frakcji globularnej o rozmiarach 0-35 μ m o 3,42% nie wpływa znacząco na niepożądane zjawiska występowania porowatości. W przypadku gdy zmiana dotyczy znacznego odejścia procentowego poszczególnych frakcji od charakterystyki złoza nowego udział porów staje się znaczący. Dla złoza Z3 wynosi on już rząd wielkości więcej w porównaniu dla Z2. Wykazana porowatość na poziomie 0,2% dla Z3 jest efektem pojawienia się przestrzeni między dużymi obiektami globularnymi, których zmniejszony udział proszku frakcji 0-35 μ m nie jest w stanie wypełnić, tworząc tym samym przestrzenie puste. Innym czynnikiem może być koncentracja energii wiązki lasera. W prowadzonych badaniach nie rozwijano tego aspektu badań i może być zasadnym przeprowadzenie w przyszłości badań z zastosowaniem większej energii na jednostkę objętości proszku o większym rozmiarze frakcji złoza PBF.

- **Badanie próbek otrzymanych ze złoza Z1, Z2, Z3, Z4, obciążonych cyklicznie zmiennym obciążeniem ciśnieniowym**

W przeprowadzonym badaniu zmęczeniowym próbek badawczych o kształcie cienkościennych tulei wykonanych z proszku MS1 charakteryzującego się morfologią proszku według opisu Z1, Z2, Z3, Z4, zebrano wyniki w postaci liczby cykli uzyskanych dla zadanego obciążenia. Dodatkowo w serii badawczej poddano analizie próbki uzyskane z materiału konwencjonalnego. Stanowiły one tuleje cienkościennie wykonane obróbką skrawaniem z pręta stali 1.2709. Celem ich wprowadzenia do badań było uzyskanie charakterystyki naprężeń S do liczby cykli N i odniesienia ich dla wyników uzyskanych w procesie DMLS. Zasadnicze obserwacje jakich dokonano po analizie wyników badań dotyczą obniżania się wytrzymałości zmęczeniowej próbek uzyskiwanych kolejno dla złożeń Z1 do Z4. Z analizy wykresów krzywych S-N (rys.5.26.) wynika, że próbki otrzymane z materiału rodzimego uzyskują wytrzymałość zmęczeniową na poziomie 1mln cykli przy obciążeniu 700 MPa. Próbki badawcze otrzymane w procesie DMLS dla zestawu parametrów 8 i stanie złoza proszkowego Z1 osiągają 1mln cykli przy obciążeniu 600 MPa. Próbki otrzymane w procesie DMLS dla zestawu parametrów 8 i stanie złoza proszkowego Z2 osiągają 1mln cykli przy obciążeniu 500 MPa. Próbki otrzymane dla zestawu parametrów 8 i stanie złoza proszkowego Z3 osiągają 1mln cykli przy obciążeniu 320 MPa natomiast dla złoza najbardziej zdegradowanego Z4 i zestawu parametrów 8 osiągają 1mln cykli przy obciążeniu 200 MPa. A zatem morfologia złoza proszku ma wpływ na defekty

w postaci porowatości co przekłada się na własności zmęczeniowe co potwierdza analiza stanu wiedzy w tym obszarze. To co jest istotne to określenie stopnia degradacji złoza i świadomość jaki ma wpływ na liczbę i wartość cykli obciążających próbkę. W przypadku złoza Z4, czyli po 30 krotnym przesiewaniu i bez dodatków nowego proszku z udziałem frakcji globularnej bliskiej 50% można uzyskać właściwości pozwalające na uzyskanie 1mln cykli przy zadanych obciążeniach na poziomie 200MPa. W odniesieniu do wartości ciśnienia wywołującego naprężenia wewnętrzne 200Mpa w badanych ściankach o grubości 0,5 mm, mówimy o ciśnieniach impulsu cieczy roboczej rzędu 6 MPa. W hydraulicznych układach niskociśnieniowych stosowanych w lekkich konstrukcjach jest to w zupełności wystarczający poziom ciśnienia operacyjnego.

- **Badanie próbek otrzymanych ze złoza Z1, Z2, Z3, Z4, obciążonych cyklicznie zmiennym momentem obrotowym**

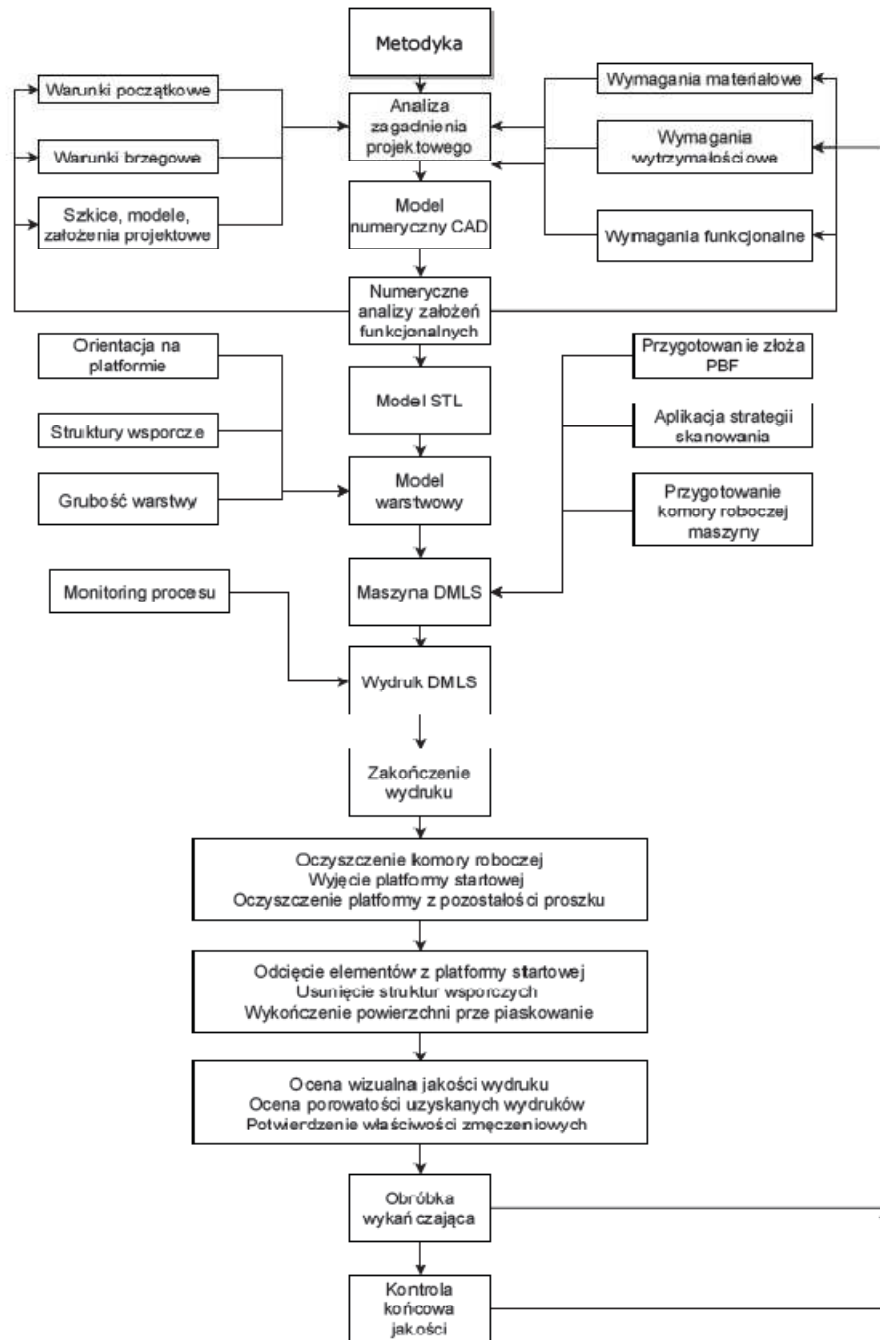
Wyniki dla próby obciążenia obrotowym momentem gnącym próbek uzyskanych w procesie DMLS z proszku stali MS1 w specyfikacji złożeń Z1, Z2, Z3, Z4 różniły się od wyników uzyskanych w próbie obciążenia ciśnieniowego. Uzyskane wyniki naprężeń wewnętrznych dla 1 mln cykli Dla próbki Z1 wynosiły około 600MPa a dla Z4 500 MPa. Różnica pomiędzy wynikami uzyskanymi w zmęczeniowej próbie ciśnieniowej a próbie obrotowo giętej może być spowodowana charakterem dynamiki obciążenia. Dla obciążenia ciśnieniowego, generowanego przez układ sterowania cyklem obciążenia, którego charakterystykę można porównać do przebiegu prostokątnego a zatem o udarowym charakterze w porównaniu do obciążenia w cyklu obrotowo giętym gdzie charakterystykę obciążenia można opisać przebiegiem sinusoidalny te różnice mogą mieć wpływ na wyniki. Aby wyeliminować wpływ charakterystyki obciążenia istnieje pole do badań ciśnieniowych z charakterystyką impulsu zbliżona do występującego w próbie obrotowo giętej.

6.3. Założenia metodyki wytwarzania korpusu serwozaworu

Na podstawie przeprowadzonych badań przeprowadzono implementację wyników do procesu produkcji zaworu RL50. Z wyników przeprowadzonych badań wynika, że stan złoza proszkowego wpływa na osiągnięte właściwości struktury a tym samym na wytrzymałość zmęczeniową obiektów uzyskiwanych w procesie DMLS. W celu zapewnienia powtarzalnych parametrów otrzymywanych struktur, na określonym poziomie wytrzymałościowym, należy zapewnić właściwe podejście procesowe na etapach produkcji. Konkluzją z wykonanych badań niech będzie zbiór rekomendacji do metodyki produkcji elementów hydrauliki siłowej w technologii addytywnej DMLS opartej na właściwym przygotowaniu i monitoringu złoza proszkowego PBF.

Metodyka procesu produkcji poprzez spiekanie DMLS powinna zapewniać wykonanie modeli o prawidłowej strukturze i dokładności wymiarowo kształtowej. Powinna uwzględniać stopień degradacji złoza. W punktowym pojęciu metodyka procesu druku 3D powinna składać się z kilku podstawowych elementów do których należą:

- opracowanie modelu 3D-CAD z uwzględnieniem naddatków wymiarowych dodanych do grubości cienkich ścianek, kompensujących wpływ degradacji złoza, usytuowanie względem kierunku wydruku, łatwości ewakuacji proszku niezwiązanego w procesie oraz implementacji struktur wsporczych możliwych do łatwego usunięcia,
- obróbka programowa danych w tym generowanie modeli STL powinna uwzględniać współczynnik dyskretyzacji tak by nie utracić cech dokładności geometrii przy zachowaniu minimalnych rozmiarów plików do procedowania w środowisku procesu DMLS,
- transfer danych do drukarki 3D,
- przygotowanie danych do procesu wytwarzania addytywnego z uwzględnieniem uzyskanych nastaw skanowania zgodnie z zestawem parametrów nr 8,
- przygotowanie złoza proszkowego poprzez zachowanie maksymalnej liczby powtórnych uzyć proszku nie większej niż 10 razy i zawsze domieszkowanej nowym proszkiem w stosunku 20%,
- przeprowadzenia procesu przy zachowaniu pełnej kontroli środowiska max 0,3% obecności tlenu i zjawisk towarzyszących takich jak nadmierne wibracje przy ruchu zgarniacza,
- zakończenie procesu i wyciągnięcie zestawu wydruków razem z platformą startową połączone z dokładnym odciążeniem pozostałego proszku,
- post processing obejmujący zastosowanie metod wytrząsania proszku z przestrzeni trudnodostępnych poprzez wprowadzenie wibracji i sekwencji obrotów pozwalających na swobodne wyprowadzenie proszku z użyciem siły grawitacji dla całego zestawu obejmującego płytę startową wraz z elementami drukowanymi,
- odcięcie elementów właściwych i poddanie ich obróbce strumieniowo ścierniej,
- przeprowadzenie obróbki cieplnej jeśli taka jest wymagana,
- ponowne przeprowadzenie obróbki strumieniowo ścierniej korundem w strumieniu sprężonego powietrza,
- przeprowadzenie niezbędnej obróbki ubytkowej takiej jak frezowanie, szlifowanie, polerowanie sekcji współpracujących wg procesu technologicznego,
- zabezpieczenie antykorozyjne na czas przed montażem końcowym elementów po druku 3D.



Rys. 6.1. Schemat procedury produkcji w technologii DMLS

Przedstawiona na rysunku (rys.6.1.) procedura może być rozszerzana w zależności od metody druku 3D. Selektywne warstwowe spiekanie proszków metali należy do najbardziej złożonych procesów budowy warstwowej zarówno pod względem przygotowania danych, przygotowania urządzenia i obróbki post-procesowej czy wykończeniowej. Wiele tych etapów wymaga analizy w trakcie realizacji, z tego względu konieczne jest zastosowanie rozbudowanej metodyki. Jest to szczególnie istotne w przypadku wytwarzania korpusów serwozaworów dla których założona jest obróbka wykończeniowa.

Literatura

- [1] Aerospace: Liebherr - First Metal 3D Printed Primary Flight Control Hydraulic Component Flies on an AIRBUS A380. Available online: <https://rmsiberia.com/aerospace-liebherr-first-metal-3d-printed-primary-flight-control-hydraulic-component-flies-on-an-airbus-a380/> (accessed on 15 March 2021).
- [2] Alfaify A., Saleh M., Abdullah F.M., Al-Ahmari A.M.: Design for Additive Manufacturing: A Systematic Review. *Sustainability* 2020, 12, 7936.
- [3] Anad M., Das, A.K.: Issues in fabrication of 3D components through DMLS Technique: A review. *Opt. Laser Technol.* 2021, 139, 106914.
- [4] Antaki G.A.: *Piping and Pipeline Engineering: Design, Construction, Maintenance, Integrity and Repair*, Marcel Dekker, Inc.: New York, NY, USA, 2003.
- [5] Antunes, F.; Santos, L.; Capela, C.; Ferreira, J.; Costa, J.; Jesus, J.; Prates, P. Fatigue Crack Growth in Maraging Steel Obtained by Selective Laser Melting. *Appl. Sci.* 2019, 9, 4412.
- [6] Badiru, A.B.; Valencia, V.V.; Liu, D. *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017; pp. 162–164.
- [7] Boeing 737 Infographic illustration, Interesting drawings, Fighter aircraft – Hydraulics
<https://shop54002.elishope.org/content?c=plane%20hydraulics&id=19>
- [8] Budzik G.: Raport o stanie obszaru szybkiego prototypowania w Polsce. *Stal, Metale & Nowe Technologie* 2016, nr 1-2, s. 18-24.
- [9] Budzik G., Tomaszewski K., Soboń A.: Opportunities for the Application of 3D Printing in the Critical Infrastructure System, *ENERGIES* 2022, 15, 1656.
- [10] Chambers B.: *Electrohydrostatic actuator EHA*; Utahstate University; ECE5320 Mechatronics; 2008
- [11] Cheng C.-W., Jian W.-Y.J., Makala B.P.R.: Selective Laser Melting of Maraging Steel Using Synchronized Three-Spot Scanning Strategies. *Materials* 2021, 14, 1905.
- [12] Collins A.: *Servo Actuators*. England Patent WO2016/075491 A1, 19 May 2016
- [13] Dana M. Zetkova I. Hanzl P.: Printing of Thin Walls using DMLS. In *Manufacturing Technology*. October 2016, Vol. 16, No.4. s. 883 -896. ISSN 1213–2489
- [14] Daňa M., Zetková I., Hanzl P.: The Influence of a Ceramic Recoater Blade on 3D Printing using Direct Metal Laser Sintering; Regional Technological Institute, University of West Bohemia – Faculty of Mechanical Engineering, Univerzita 8, Pilsen306 14, Czech Republic; February 2019,
- [15] da Silva, J.J.M.; de Vasconcelos, I.F.; da Silva, F.I.S.; Ribeiro, T.S.; de Abreu, H.F.G. An Atomic Redistribution Study of the 440 °C Ageing Kinetics in Maraging-300 Steel. *Mater. Res.* 2019, 22, e20180230.
- [16] DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski, J.O.; Beese, A.M.; Wilson-Heid, A.; De, A.; Zhang, W. Additive manufacturing of metallic components—Process, structure and properties. *Prog. Mater. Sci.* 2018, 92, 112–224.

- [17] Dietrych M.: Podstawy konstrukcji maszyn, t. III. WNT, Warszawa 1995 (1999).
- [18] Dilberoglu U.M., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M.: The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manuf.* 2017, 11, 545–554.
- [19] Di Rito G.: Experiments and simulations for the study of temperature effects on the performances of a fly-by-wire hydraulic actuator. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control. Eng.* 2011, 225, 1195–1206.
- [20] Di Rito G., Galatolo R.: Experimental assessment of the dynamic stiffness of a fault-tolerant fly-by-wire hydraulic actuator. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.* 2012, 226, 679–690.
- [21] Dobrzański L.A.: *Metalei ichStopy*; International OCSCO World Press: Gliwice, Poland, 2017
- [22] Doubenskaia M., Domashenkov A., Smurov I., Petrovskiy P.: Study of Selective Laser Melting of intermetallic TiAl powder using integral analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2018, 129, 1–14.
- [23] Dziubek T.: Egzemplifikacja możliwości zwiększenia dokładności geometrycznej złożonych części maszyn wytwarzanych z zastosowaniem metod addytywnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2019.
- [24] EADS APWorks, Airbus A320 Hingebracket, <https://www.sculpteo.com/blog/2015/11/02/3d-printed-mechanics>
- [25] Elakkad A.S.: 3D Technology in the Automotive Industry. *Int. J. Eng. Tech. Res.* 2019, 8, 248–251.
- [26] EPMA. Introduction to Additive Manufacturing Technology. Available online: https://futurerobotics.files.wordpress.com/2015/10/epma_introduction_to_additive_manufacturing_technology.pdf (accessed on 9 May 2020).
- [27] Fatemi, A.; Molaei, R.; Simsiriwong, J.; Sanaei, N.; Pegues, J.; Torries, B.; Nam, P.; Shamsaei, N. Fatigue behaviour of additive manufactured materials: An overview of some recent experimental studies on Ti-6Al-4V considering various processing and loading direction effects. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2019, 42, 991–1009.
- [28] Franchetti M., Kress C.: An economic analysis comparing the cost feasibility of replacing injection molding processes with emerging additive manufacturing techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* volume 88, pages 2573–2579 (2017)
- [29] Gisario A., Kazarian M., Martina F., Mehrpouya M.: Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *J. Manuf. Syst.* 2019, 53, 124–149.
- [30] Grzelak K., Bielecki M., Kluczynski J., Szachogłuchowicz I., Snieżek L., Torzewski J., Łuszczek J., Słoboda Ł., Wachowski M., Komorek Z., Małek M., Zygmuntowicz J.: A Comparative Study on Laser Powder Bed Fusion of Differently Atomized 316L Stainless Steel, *Materials* 2022, 15, 4938
- [31] Hagedorn-Hansen, D.; Bezuidenhout, M.B.; Dimitrov, D.M.; Oosthuizen, G.A. The effects of selective laser melting scan strategies on deviation of hybrid parts. *S. Afr. J. Ind. Eng.* 2017, 28, 200–212.
- [32] Hospodka J., Bínová H., Pleninger S.: Assessment of All-Electric General Aviation Aircraft. *Energies* 2020, 13, 6206.
- [33] ASTM E466-15 Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.

- [34] ISO 1143:2010(E): Metallic materials — Rotating bar bending fatigue testing, Second edition 2010-11-01
- [35] ISO/ASTM 52902:2019 Additive Manufacturing – Test Artifacts–Geometric Capability Assessment of Additive Manufacturing Systems.
- [36] ISO/ASTM 52910:2018, Additive manufacturing. Design. Requirements, guidelines and recommendations.
- [37] ISO/ASTM 52900:2015, Additive manufacturing – General principles – Terminology.
- [38] ISO/ASTM 52921:2013, Standard terminology for additive manufacturing – Coordinate systems and test methodologies.
- [39] ISO/ASTM 52915:2016, Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2
- [40] ISO/ASTM 52901:2017, Additive manufacturing – General principles – Requirements for purchased AM parts.
- [41] ISO/ASTM/DIS 5290:2018, Additive manufacturing – General principles – Part 1: Terminology.
- [42] ISO/TR 10771-2:2008, Hydraulic fluid power — Fatigue pressure testing of metal pressure-containing envelopes — Part 2: Rating methods
- [43] Jani D.B., Ashish, S., Aditya S., Yash S., Bishambhar S., Nikhil S., Manmohan S.: An overview on aircraft hydraulic system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 6, 29–35.
- [44] Jarfors, A.E.W.; Shashidhar, A.C.G.H.; Yepur, H.K.; Steggo, J.; Andersson, N.-E.; Stolt, R. Build Strategy and Impact Strength of SLM Produced Maraging Steel (1.2709). *Metals* 2021, 11, 51.
- [45] Kim, H.; Lin, Y.; Tseng, T.-L.B. A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyp. J.* 2018, 24, 645–669.
- [46] Kretek R.: Układ hydrauliczny. Zasadniczy I dodatkowy sprzęt wózków. <https://slideplayer.pl/slide/413474> , 2014.
- [47] Królczyk G., Kacalak W., Wieczorowski M.: 3D Parametric and Nonparametric Description of Surface Topography in Manufacturing Processes, *Materials*. 2021; 14(8):1987
- [48] Królczyk G., Maruda R.W., Królczyk J.B., Wojciechowski S., Mia M., Niesłony P., Budzik G.: Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production - A review. *Journal Of Cleaner Production* Volume: 218 Pages: 601-615, MAY 1 2019.
- [49] Kucerova, L. Zetkova, I. (2016). Metallography of 3D Printed 1.2709 Tool Steel. In *Manufacturing Technology*. February 2016, Vol. 16, No.1. s. 140 -144.
- [50] Kučerová, L.; Zetková, I.; Jeníček, Š.; Burdová, K. Production of Hybrid Joints by Selective Laser Melting of Maraging Tool Steel 1.2709 on Conventionally Produced Parts of the Same Steel. *Materials* 2021, 14, 2105.
- [51] LLT, Multi Spot Machine Center, www.iop.rwth-aachen.de
- [52] Li, X.D.; Yin, Z.D.; Li, H.B.; Lei, T.C.; Liu, M.L.; Liu, X.W.; Jin, M.Z. Mössbauer study of the early stages of aging in 18Ni(350) maraging steel. *Mater. Chem. Phys.* 1993, 33, 277–280.
- [53] Li, X.; Yin, Z. Mössbauer study of the aging behavior of 18Ni(350) maraging steel. *Mater. Lett.* 1995, 24, 235–238.

- [54] Li, Z.; Xu, R.; Zhang, Z.; Kucukkoc, I. The influence of scan length on fabricating thin-walled components in selective laser melting. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2018, 126, 1–12.
- [55] Liou W.: *Rapid Prototyping and engineering applications – a toolbox for prototype development.* Taylor & Francis Group, 2008.
- [56] Lu Y., Badarinath R., Lehtihet E.A.; De Meter, E.C.; Simpson, T.W. Experimental sampling of the Z-axis error and laser positioning error of an EOSINT M280 DMLS machine. *Addit. Manuf.* 2018, 21, 501–516.
- [57] Mashlan M., Linderhof F., Davidova M., Kubickova H., Zemtsova E.: Changes of phase composition of maraging steel 1.2709 during selective laser melting. *Hyperfine Interact.* 2020, 241, 1–8.
- [58] Mazur D., Paszkiewicz A., Bolanowski M., Budzik G., Oleksy M.: Analysis of possible SDN use in the rapid prototyping process as part of the Industry 4.0, 2019, *BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES-TECHNICAL SCIENCES*, t.67, z.1, s.21-30
- [59] Meneghetti, G.; Rigon, D.; Cozzi, D.; Waldhauser, W.; Dabala, M. Influence of build orientation on static and axial fatigue properties of maraging steel specimens produced by additive manufacturing. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD 2017, Lecco, Italy, 19–22 September 2017.*
- [60] Meneghetti, G.; Rigon, D.; Gennari, C. An analysis of defects influence on axial fatigue strength of maraging steel specimens produced by additive manufacturing. *Int. J. Fatigue* 2019, 118, 54–64.
- [61] MOOG; www.moog.com
- [62] Moon, W.; Kim, S.; Lim, B.-S.; Park, Y.-S.; Kim, R.J.-Y.; Chung, S.H. Dimensional Accuracy Evaluation of Temporary Dental Restorations with Different 3D Printing Systems. *Materials* 2021, 14, 1487.
- [63] Mooney, B.; Kourousis, K.I. A Review of Factors Affecting the Mechanical Properties of Maraging Steel 300 Fabricated via Laser Powder Bed Fusion. *Metals* 2020, 10, 1273.
- [64] Mooney B., Kourousis K.I., Raghavendra R.: Plastic anisotropy of additively manufactured maraging steel: Influence of the build orientation and heat treatments. *Addit. Manuf.* 2019, 25, 19–31.
- [65] Mutua, J.; Nakata, S.; Onda, T.; Chen, Z.C. Optimization of selective laser melting parameters and influence of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel. *Mater. Des.* 2018, 139, 486–497.
- [66] Nguyen, Q.B.; Luu, D.N.; Nai, S.M.L.; Zhu, Z.; Chen, Z.; Wei, J. The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2018, 18, 948–955.
- [67] Olina A., Píška M., Petrevec M., Hervoches C., Beran P., Pechoušek J. Král P.: Assessment of Retained Austenite in Fine Grained Inductive Heat Treated Spring Steel. *Materials* 2019, 12, 4063.
- [68] Osiński J.: *Obliczenia wytrzymałościowe elementów maszyn z zastosowaniem metody elementów skończonych.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [69] Osiński Z.: *Podstawy konstrukcji maszyn.* PWN, Warszawa 1999.

- [70] Paszkiewicz, A.; Bolanowski, M.; Budzik, G.; Przeszlowski, Ł.; Oleksy, M. Process of Creating an Integrated Design and Manufacturing Environment as Part of the Structure of Industry 4.0. *Processes* 2020, 8, 1019.
- [71] Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M.: Analysis of surface texture of plateau-honed cylinder liner – a review, *Precision Engineering - 2021*, vol. 72, s. 807-822
- [72] Piątek Z. Rynek druku 3D coraz bardziej dojrzały, www.przemysl-40.pl, 2018
- [73] Pisula J.M., Budzik G., Przeszlowski L.: An Analysis of the Surface Geometric Structure and Geometric Accuracy of Cylindrical Gear Teeth Manufactured with the Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Method. *Strojnicki Vestnik - Journal Of Mechanical Engineering* Volume: 65 Issue: 2 Pages: 78-86, Published: 2019
- [74] PN/EN ISO/ASTM 52900:2017-06 Additive Manufacturing – General Principles– Terminology. Available online: <http://www.pkn.pl> (accessed on 11 December 2020).
- [75] PN/EN ISO/ASTM 52901:2019-01 Additive Manufacturing–General Principles– Requirements Relevant to Parts Manufactured by Means of Additive Manufacturing (AM) Processes. Available online: <http://www.pkn.pl> (accessed on 18 December 2020).
- [76] PN/EN ISO 17296-2:2016-10 Additive Manufacturing–General Principles–Part 2: Overview of Process Categories and Feedstock. Available online: <http://www.pkn.pl> (accessed on 21 December 2020).
- [77] PN/EN ISO 17296-3:2016-10 Additive Manufacturing–General Principles–Part 3: Principal Characteristics and Appropriate Research Methods. Available online: <http://www.pkn.pl> (accessed on 21 December 2020).
- [78] PN/EN ISO 17296-4:2016-10 Additive Manufacturing–General Principles–Part 4: Overview of Data Processing. Available online: <http://www.pkn.pl> (accessed on 21 December 2020).
- [79] PN-EN ISO 6982-1 Badanie właściwości wytrzymałościowych stopów metali w temperaturze pokojowej.
- [80] Pytka J., Józwick J., Budzyński P., Łyszczuk T., Tofil A., Gnapowski E., Laskowski J., Wheel dynamometer system for aircraft landing gear testing, *Measurement* Volume 148, December 2019, 106918.
- [81] Rayna, T.; Striukova, L. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 2016, 102, 214–224.
- [82] Redwood B., Schoffer F., Garret B.: *The 3D Printing Handbook. Technologies, design and applications*, 3D Hubs B.V. Amsterdam 2017.
- [83] Ribezzo, A.; Calignano, F.; Salmi, A.; Atzeni, E.; Pietrobono, F.; Trovalusci, F.; Rubino, G. Finishing of metal additive manufactured parts by abrasive fluidized bed machining. In *Proceedings of the Euspen's 18th International Conference, Venice, Italy, 4–8 June 2018*; pp. 271–272.
- [84] Rokicki, P.; Budzik, G.; Kubiak, K.; Bernaczek, J.; Dziubek, T.; Magniszewski, M.; Nowotnik, A.; Sieniawski, J.; Matysiak, H.; Cygan, R.; et al. Rapid prototyping in manufacturing of core models of aircraft engine blades. *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 2014, 86, 323–332.
- [85] Rokicki, P.; Budzik, G.; Kubiak, K.; Dziubek, T.; Zaborniak, M.; Kozik, B.; Bernaczek, J.; Przeszlowski, L.; Nowotnik, A. The assessment of geometric

- accuracy of aircraft engine blades with the use of an optical coordinate scanner. *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 2016, 88, 374–381.
- [86] Rzucidło A., Budzik G., Przeszłowski Ł.: Wspomaganie procesu decyzyjnego w szybkim prototypowaniu. Modelowanie – Wytwarzanie – Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa 16-18 września 2015, s. 165-168.
- [87] Saigopal N, Shapiro V.: Representation and analysis of additively manufactured parts. *Computer-Aided Design* 2015, no. 67-68, pp. 13-23.
- [88] Santos, L.M.S.; Ferreira, J.A.M.; Borrego, L.P.; Costa, J.D.; Capela, C.; de Jesus, J. Fatigue crack propagation along interfaces of selective laser melting steel hybrid parts. *Fract. Eng. Mater. Struct.* 2019, 42, 2431–2440.
- [89] Saracyakupoglu, T. The Qualification of the Additively Manufactured Parts in the Aviation Industry. *Am. J. Aerosp. Eng.* 2019, 6, 1–10.
- [90] Sendecyk, G.P. Constant life diagrams—A historical review. *Int. J. Fatigue* 2001, 23, 347–353.
- [91] Shipley, H.; McDonnell, D.; Culleton, M.; Coull, R.; Lupoi, R.; O'Donnell, G.; Trimble, D. Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2018, 128, 1–20.
- [92] Siemiński P., Budzik G.: Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.
- [93] Stern, F.; Kleinhorst, J.; Tenkamp, J.; Walther, F. Investigation of the anisotropic cyclic damage behavior of selective laser melted AISI 316L stainless steel. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2019, 42, 2422–2430.
- [94] Suryawanshi, J.; Prashanth, K.G.; Ramamurty, U. Tensile, fracture, and fatigue crack growth properties of a 3D printed maraging steel through selective laser melting. *J. Alloys Compd.* 2017, 725, 355–364.
- [95] Szumiata, T.; Rachwał, M.; Magiera, T.; Brzózka, K.; Gzik-Szumiata, M.; Gawroński, M.; Górka, B., Kyzioł-Komosińska J.: Iron-containing phases in metallurgical and coke dusts as well as in bog iron ore. *Nukleonika* 2017, 62, 187–195.
- [96] Tan, C.; Zhou, K.; Ma, W.; Zhang, P.; Kuang, T. Microstructural evolution, nanoprecipitation behavior and mechanical properties of selective laser melted high-performance grade 300 maraging steel. *Mater. Des.* 2017, 134, 23–34.
- [97] Thapa, N.; Ram, S.; Kumar, S.; Mehta, J. All electric aircraft: A reality on its way. *Mater. Today Proc.* 2021, 43, 175–182.
- [98] Thomson, Thomsonlinear, www.thomsonlinear.com
- [99] Tyczyński, P.; Siemiątkowski, Z.; Bąk, P.; Warzocha, K.; Rucki, M.; Szumiata, T. Performance of Maraging Steel Sleeves Produced by SLM with Subsequent Age Hardening. *Materials* 2020, 13, 3408.
- [100] Tyczynski, P.; Siemiątkowski, Z.; Rucki, M. Analysis of the drill base body fabricated with Additive Manufacturing technology. In Proceedings of the Euspen's 18th International Conference, Venice, Italy, 4–8 June 2018; pp. 287–288.
- [101] Vincze I., Campbell A.: Mossbauer measurements in iron based alloys with transition metals. *J. Phys. F Metal Phys.* 1973, 3, 647–663.
- [102] Vock S., Klöden B., Kirchner A., Weißgärber T., Kieback B.: Powders for powder bed fusion: A review. *Prog. Addit. Manuf.* 2019, 4, 383–397.

- [103] Wang X., Liao R., Shi C., Wang S.: Linear Extended State Observer-Based Motion Synchronization Control for Hybrid Actuation System of More Electric Aircraft. *Sensors* 2017, 17, 2444.
- [104] Wang X., Liu Y., Li L., Yenusah C.O., Xiao Y., Chen L.: Multi-scale phase-field modeling of layer-by-layer powder compact densification during solid-state direct metal laser sintering. *Mater. Des.* 2021, 203, 109615.
- [105] Wauthle R., Vrancken B., Beynaerts B., Jorissen K., Schrooten J., Kruth J.-P., Van Humbeeck J.: Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures. *Addit. Manuf.* 2015, 5, 77–84
- [106] Warzocha K., Bąk P.: Method for Manufacturing the Aircraft Valve Block. Poland Patent PL227484, 23 June 2017.
- [107] Wimpenny D.I., Pandey P.M., Kumar L.J.: *Advances In 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, Springer Science+Business Media, Singapore Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry 2017.
- [108] Wohlers Report 2018, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report.
- [109] www.3dcenterpolska.pl
- [110] www.3dphoenix.pl
- [111] www.3dsystems.com
- [112] www.centrumdruku3d.pl
- [113] www.colmex.com.pl
- [114] www.drukarki3d.pl
- [115] www.eos.info
- [116] www.pclab.pl
- [117] www.przyrostowo.pl
- [118] www.stratasys.com
- [119] www.tiertime.com
- [120] www.voxeljet.com
- [121] Xia M., Gu D., Yu G., Dai D., Chen H. Shi Q.: Porosity evolution and its thermodynamic mechanism of randomly packed powder-bed during selective laser melting of Inconel 718 alloy. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2017, 116, 96–106.
- [122] Xue L.: Chapter 16 - Laser Consolidation - A Rapid Manufacturing Process for Making Net-Shape Functional Components. In *Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications*, 2nd ed.; Lawrence, J., Ed.; Woodhead Publishing: London, UK, 2018; pp. 461–505.
- [123] Yasa Flight Control. Available online: <http://yasa-motors.com/wp-content/uploads/2017/05/FBW-brochure.pdf> (accessed on 15 March 2021).
- [124] Yoo S.-Y., Kim S.-K., Heo S.-J., Koak J.-Y., Kim J.-G.: Dimensional Accuracy of Dental Models for Three-Unit Prostheses Fabricated by Various 3D Printing Technologies. *Materials* 2021, 14, 1550.
- [125] Yoshida Y., Langouche G.: *Mössbauer Spectroscopy: Tutorial Book*; Yoshida, Y., Langouche, G., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013.
- [126] Zhang J., Tai W.G., Wang H., Kumar, A.S., Lu W.F., Fuh J.Y.H.: Magnetic abrasive polishing of additively manufactured 316L stainless steel parts. In *Proceedings of the Euspen's 18th International Conference*, Venice, Italy, 4–8 June 2018; pp. 401–402.

- [127] Zhao Z., Yu X., Zhang Z., Shu W., Li J.: Attempting AG-Doped Diamond-Like Carbon Film to Improve Seal Performance of Hydraulic Servo-Actuator. *Materials* 2020, 13, 2618.
- [128] Ziółkowski G., Chlebus E., Szymczyk P., Kurzac J.: Application of X-ray CT method for discontinuity and porosity detection in 316L stainless steel parts produced with SLM technology. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2014, 14, 608–614.