

prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK
ul. Lazurowa 185C m 122
01-476 Warszawa

Warszawa, dn. 6.03.2023 r.

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra BAŁKA
pt. „Badania porównawcze własności stali 1.2709 z gatunku maraging
uzyskanej w technologii przyrostowej DMLS z uwzględnieniem
wpływu parametrów procesu AM i degradacji złoża w odniesieniu
do właściwości rodzimych tejże stali”

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowiło pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, Pana dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz, nr RM-530-07-01/2022 z dnia 30 listopada 2022 r.

1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat kształtowanie przyrostowe stało się jedną z najszybciej rozwijających się technik wytwarzania zarówno materiałów, jak i różnego typu elementów konstrukcyjnych. Dzieje się tak przede wszystkim za sprawą przystępności użytkowania coraz liczniejszej grupy urządzeń do wytwarzania przyrostowego oraz coraz większej dostępności różnorodnych materiałów budulcowych w postaci metali, ceramiki, żywic, grafenu i wielu innych. W wielu gałęziach przemysłu technologia addytywna pozwala przede wszystkim na skrócenie czasu projektowania poprzez możliwość szybkiego wytworzenia prototypu lub gotowego elementu o często bardzo skomplikowanym kształcie, niekiedy niemożliwym do otrzymania z użyciem konwencjonalnych technik wytwarzania, np. implantów stosowanych w chirurgii rekonstrukcyjnej czy form wtryskowych z chłodzeniem konformalnym. W tym drugim przypadku, dla przykładu, wkładki formujące wykonane w technologii SLM przynoszą wymierne korzyści w postaci skrócenia czasu cyklu wytwarzania, poprawy jakości detalu i wydłużenia żywotności rdzeni. Mimo coraz większej popularności wykorzystywania urządzeń przyrostowych zarówno w sferze naukowo-badawczej jak i produkcyjnej, ciągle newralgicznym problemem napotykanym przez wytwórców jest brak dostatecznych informacji w zakresie wpływu parametrów wytwarzania technikami przyrostowymi na właściwości użytkowe wyrobów. Zadawane jest również coraz

częście pytanie: Czy do wytwarzania przyrostowego można ponownie wykorzystać użyte wcześniej proszki metali? Ponowne wykorzystanie takich proszków z pewnością może skutkować zmniejszeniem ilości odpadów i oszczędnością kosztów, lecz nie są rozpoznane wynikające z tego ryzyka związane na przykład z nierównomiernym ułożeniem proszków a w konsekwencji możliwością znaczącego wzrostu porowatości struktury i osłabienia wytrzymałości wyrobu. W ostatnich latach coraz liczniejsza grupa ośrodków naukowych podejmuje badania w tym obszarze, o czym świadczy również tematyka recenzowanej pracy doktorskiej, w której podjęto próbę kompleksowego zbadania wpływu degradacji złoża proszkowego na jakość materiału w postaci stali 1.2709 wytworzonej za pomocą dwóch technik typu Power Bed Fusion, tj. SLM i DMLS. Podjęcie badań mających na celu weryfikację w zakresie strukturalnym i wytrzymałościowym, w szczególności zmęczeniowym wytworzonych w ten sposób wyrobów, uważam za bardzo ważką i w pełni uzasadnioną inicjatywę.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Bąka składa się z 6 rozdziałów, wykazu literatury zawierającego 128 pozycji prac, na które Autor powołał się w tekście oraz streszczeń rozprawy w języku polskim i angielskim zmykających opracowanie.

Praca na 119 stronach jest bogato ilustrowana rysunkami i fotografiami porowatości struktur wytworzonych przyrostowo i poddanych badaniom próbek, aparatury oraz stanowisk badawczych wykorzystywanych podczas badań własnych. Łącznie w rozprawie zamieszczono 95 rysunków i 20 tabel.

W pięciostronicowym wprowadzeniu, stanowiącym pierwszy rozdział rozprawy, Doktorant w sposób syntetyczny opisuje znaczenie technik przyrostowych w obszarze wytwarzania pełnowartościowych wyrobów z proszków metalicznych. Szczególną uwagę skupiono na uzasadnieniu wyboru przedmiotu badań w postaci serwozaworu, jako jednego z elementów układu automatycznej regulacji położenia, prędkości oraz siły poprzez sterowanie natężeniem i kierunkiem przepływu czynnika roboczego w postaci płynu hydraulicznego MIL PRF 5606H. Nakreślono obszerny zakres jego zastosowań, uzasadniając wdrożenie technik przyrostowych do wytwarzania tego elementu systemów sterowania układami hydrauliki siłowej statków latających, mogących zaowocować zmniejszeniem ich masy.

W rozdziale drugim poświęconym analizie danych literaturowych, na 18 stronach, w oparciu o 68 pozycji literaturowych, dokonany został monolityczny przegląd opracowań

dotyczących technik wytwarzania przyrostowego. W znaczącej części uwaga Doktoranta skupiona została na ogólnym opisie technik, w których stosowany jest materiał w postaci proszku metalu, jako najczęściej perspektywicznych do zastosowań na skalę przemysłową. Wyróżnia tutaj m.in. odmiany procesów addytywnych opartych na stapianiu proszku jako materiału wyjściowego za pomocą wiązki elektronów EBM (Electron Beam Melting) i wiązki promieniowania laserowego SLM (Selective Laser Melting) oraz DMLS (DirectMetal LaserSintering). W tej części pracy przytoczone zostały również opublikowane wyniki badań o charakterze szczegółowym, dotyczących m.in. ustalenia wpływu wybranych parametrów procesów PBF na powstawanie porowatości i wybrane właściwości zmęczeniowe materiału, kontroli szybkości zjawiska przetopu i krystalizacji, skanowania i dostarczania energii do strefy przetopu czy dynamiki oddziaływania wiązki lasera na proszek, a także związku między zmianami wartości parametrów stapiania proszku a swoistą odpowiedzią na wprowadzone modyfikacje w postaci zmiany właściwości użytkowych wytworzonych elementów. Na podkreślenie zasługuje fakt, że 43 z przywołanych publikacji ukazało się w ciągu ostatnich 10 lat, 13 to źródła internetowe, a 11 to normy PN/EN i ISO/ASTM.

Wyniki przeprowadzonej analizy danych literaturowych oraz sprecyzowana we wprowadzeniu konieczność podjęcia prac nad możliwością zastosowania technologii Powder Bed Fusion (PBF) do wytwarzania korpusów hydrauliki siłowej uzasadniają podjęcie próby weryfikacji właściwości wytrzymałościowych uzyskanych tą drogą elementów modelowych z uwzględnieniem porowatości ich struktury spowodowanej w głównej mierze degradacją złoza proszkowego. To legło u podstaw sprecyzowania w następnym, trzecim rozdziale tezy, celu i zakresu rozprawy. Doktorant formułując tezę rozprawy założył, że parametry procesu przyrostowego oraz degradacja poprocesowa złoza proszku stali 1.2709 podczas zastosowania metody Direct Metal Laser Sintering (DMLS) wpływają na wytrzymałość zmęczeniową elementów cienkościennych wykonanych z proszku ponownie wykorzystanego. Wdrożeniowy charakter rozprawy znalazł swoje odzwierciedlenie w sprecyzowanym celu pracy, którego realizacja ma zaowocować opracowaniem założeń metodyki badań wytrzymałościowych wytworzonych elementów modelowych oraz metodyki wytwarzania przyrostowego prototypów rozdzielaczy hydraulicznych przeznaczonych do samolotowych systemów sterowania. Założono, że cel rozprawy, skoncentrowany na znalezieniu zależności pomiędzy parametrami procesu przyrostowego DMLS, w tym degradacji złoza, a wytrzymałością elementów cienkościennych, w odniesieniu do modelu stosowanego w elementach lotniczej hydrauliki siłowej, zostanie osiągnięty w wyniku realizacji nakreślonego zakresu pracy obejmującego szereg analiz teoretycznych i badań

doświadczalnych. W zakresie tym ujęto, z niewiadomych przyczyn, jedynie badania dotyczące elementów wytworzonych z zastosowaniem procesu DMLS, pomijając opisane w zasadniczej części pracy, na 16 stronach, badania elementów wytworzonych z zastosowaniem procesu SLM. Oczywiście treść przytoczonej tezy oraz celu pracy w pełni ujmują zamierzenia Doktoranta, nie mniej zalecana precyzja formułowania zapisów na tym etapie realizacji rozprawy skłania do dyskusji nad uściśleniem części zapisów dotyczących zakresu tejsze pracy.

Rozdział czwarty liczący 34 strony poświęcono opisowi metodyki badań doświadczalnych i teoretycznych w zakresie numerycznych analiz przepływów i wytrzymałościowych konstrukcji korpusu serwowaworu hydraulicznego wytworzonego techniką przyrostową. W rozdziale tym dokonano szczegółowej identyfikacji zarówno przedmiotu badań jak i zastosowanych podczas realizacji pracy licznych metod i technik badawczych. Z punktu widzenia czytelnika przejrzystość opisu zastosowanej metodyki zaburza nie do końca czytelny podział badań na dwa etapy. W oryginalnym zapisie pierwszy etap obejmuje (cyt.) „... badania nad wykazaniem i potwierdzeniem zasadności druku 3D-PBF w prototypowaniu i produkcji elementów hydrauliki siłowej, w tym korpusów serwowaworów.”, a etap drugi obejmuje (cyt.) „... badania potwierdzające zasadność wyboru wskazanej technologii addytywnej w produkcji seryjnej”. Zdaniem recenzenta, dalsza część opisu metodyki badań zamieszczonej na str. 43⁵⁻²³, w korelacji z nakreślonym w pkt. 3.2 zakresem pracy nie naświetla jednoznacznie wizji układu rozprawy.

Podczas analizy wartości przepływu czynnika roboczego wykorzystano oprogramowanie PumpLinks®, a obliczenia wytrzymałościowe korpusu serwowaworu przeprowadzono za pomocą oprogramowania CREO. Bardzo szeroki zakres badań doświadczalnych dotyczy zarówno elementów modelowych wytworzonych z wykorzystaniem procesu przyrostowego SLM, jak i wyrobów w postaci próbek wytworzonych z wykorzystaniem procesu przyrostowego DMLS i obejmuje m.in.: badania strukturalne – w tym badania porowatości, badania właściwości mechanicznych, badania wytrzymałości zmęczeniowej w warunkach osiowego rozciągania, obrotowego zginania i obciążenia ciśnieniowego oraz badania tribologiczne. Do realizacji zaplanowanych, obszernych badań wykorzystano między innymi: systemy przyrostowe SLM250 firmy REALIZER i M290 DMLS firmy EOS, mikroskopy świetlne OLYMPUS BX51M i SC30, maszyny wytrzymałościowe INSTRON 3382 i INSTRON 8801, tester tribologiczny OPTIMOL SRV5, stanowisko do ciśnieniowych testów zmęczeniowych z przyrządem do ciśnieniowej próby zmęczeniowej AM EOSM290 oraz stanowisko do badań w cyklu obrotowo giętym.

Zasadniczą część rozprawy stanowi rozdział piąty zatytułowany *Realizacja badań i wyniki badań*, liczący 34 strony. W rozdziale tym przedstawiono, zachowując logiczny układ, wyniki szeroko nakreślonych badań, które można podzielić na dwa obszary badawcze:

- 1) Badania wpływu parametrów procesu wytwarzania SLM na wybrane właściwości strukturalne, wytrzymałościowe i tribologiczne stali 1.2709. Rozpatrzono w tym przypadku: porowatość struktury, wytrzymałość w warunkach jednoosiowego monotonnego rozciągania, wytrzymałość zmęczeniową w warunkach jednostronnie zmiennego rozciągania, współczynnik tarcia w wariantach temperaturowym i obciążeniowym oraz twardość wytworzonego materiału, jako wskaźnik oceny efektów wprowadzonej postprocesowej obróbki cieplnej.
- 2) Badania wpływu parametrów procesu wytwarzania DMLS oraz morfologii złoża proszkowego na gęstość otrzymywanych wydruków i wybrane właściwości strukturalne oraz zmęczeniowe stali 1.2709. Rozpatrzono w tym przypadku: porowatość struktury, wytrzymałość zmęczeniową cylindrycznych próbek cienkościennych w warunkach promieniowego obciążenia ciśnieniem płynu hydraulicznego oraz obrotowego zginania.

W praktyce realizacja powyższych punktów posłużyła do osiągnięcia celu o charakterze utylitarnym, tj. opracowania metodyki wytwarzania prototypów rozdzielaczy hydraulicznych przeznaczonych do samolotowych systemów sterowania, jako planowanego obiektu wdrożenia przemysłowego.

Doktorant dążąc do jednoznacznej identyfikacji efektów zastosowania konkretnych technik przyrostowych SLM i DMLS w odniesieniu do parametrów opisujących właściwości użytkowe elementów modelowych wytworzonych ze stali 1.2709 dokonał licznych pomiarów i badań parametrów funkcjonalnych generowanego materiału. Uzyskany materiał badawczy, jego obróbka i opracowanie zapewnia zrealizowanemu procesowi badawczemu wymóg intersubiektywnej kontroli i stanowi bazę do obszernego wnioskowania.

Opisane z należytą starannością, w rozdziale piątym, wyniki badań zapewniły możliwość obszernego wnioskowania, które Doktorant przedstawił w rozdziale szóstym, zatytułowanym *Podsumowanie i wnioski*. Zamieszczenie wyczerpującego syntetycznego podsumowania ułatwia czytelnikowi możliwość płynnego zapoznania się ze sformułowanymi wnioskami zarówno poznawczymi, jak i utylitarnymi. Rozdział ten zamyka opis ujętej w celu rozprawy metodyki oraz schemat procedury produkcji z wykorzystaniem techniki DMLS serwozaworu hydraulicznego RL50.

3. Ocena rozprawy

Ustawiczny rozwój technik przyrostowego wytwarzania materiałów i gotowych wyrobów dostosowanych do rosnących wymagań różnorodnych gałęzi przemysłu musi iść w parze z pracami zapewniającymi ich aplikacje w postaci elementów konstrukcyjnych i połączeń tych elementów. Przemawiają za tym coraz wyższe oczekiwania eksploatacyjne, a spełnienie ich jest możliwe dzięki stosowaniu innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych lub technik wytwarzania, w szczególności w zaawansowanych konstrukcjach inżynierskich. Całość recenzowanej pracy pod względem merytorycznym zasługuje na pozytywną ocenę i nie budzi istotnych zastrzeżeń. Nieliczne uwagi dotyczące obszaru merytorycznego rozprawy wynikają przede wszystkim z woli uściślenia niektórych zagadnień. Mogą one stanowić przyczynek do dyskusji podczas obrony recenzowanej rozprawy dotyczącej następujących problemów:

- 1) W tytule, tezie, celu i zakresie pracy wspomina się o badaniach wpływu parametrów procesu przyrostowego Direct Metal Laser Sintering (DMLS), w tym degradacji złoza, na właściwości wytrzymałościowe elementów cienkościennych w odniesieniu do modelu wybranego elementu lotniczej hydrauliki siłowej. Część badań dotyczących w szczególności porowatości, wytrzymałości na rozciąganie, wytrzymałości zmęczeniowej w warunkach jednostronnego rozciągania, współczynnika tarcia w wariantach temperaturowym i obciążeniowym oraz twardości wytworzonego materiału przeprowadzono na próbkach wykonanych techniką Selective Laser Melting (SLM). W jakim stopniu wyniki tych badań posłużyły do wnioskowania w zakresie efektów druku DMLS. Z jakiego powodu cały zakres badawczy pracy nie został oparty na materiale i elementach modelowych wytworzonych tą techniką?
- 2) Do oceny skutków zastosowanej obróbki postprocesowej w postaci wygrzewania w temperaturze 490 °C przez 6 godzin, a następnie powolnego chłodzenia w powietrzu, wykorzystano wyniki badań twardości metodą Vickersa. Z jakiego względu nie przeprowadzono badań strukturalnych materiału zarówno tuż po wydruku, jak i po obróbce cieplnej. Dlaczego nie przeprowadzono badań mikrotwardości struktury? Jak należy rozumieć zapis: „Na podstawie pomiaru twardości <<w dwóch punktach>> można stwierdzić, że próbki w procesie obróbki cieplnej uzyskały wymaganą twardość”?
- 3) Wyniki ciśnieniowych badań zmęczeniowych i badań zmęczeniowych w warunkach obrotowego zginania przedstawiono w postaci wykresów w półlogarytmicznym układzie współrzędnych (rys. 5.27 i rys. 5.31). Uzasadnione uwagi w tym przypadku musi budzić bliżej nie opisany sposób aproksymacji wyników badań za pomocą

krzywych, które dodatkowo wybiegają znacząco poza naniesione punkty. Trudno w tym przypadku mówić o „... wykreśleniu krzywych Wöhlera S-N” (str. 95₁)

Pewne uwagi mogą budzić kwestie natury edytorskiej, Jedną z poważniejszych uwag w tym przypadku jest niewłaściwy opis poziomej osi wykresu 5.14, na której powinny się znaleźć zamiast wartości temperatury, wartości przykładanej siły/nacisku. Słowa krytyki muszą zostać sformułowane odnośnie pojawiających się miejscami semantycznych niedoskonałości tekstu. Uwagi edytorskie o mniejszym znaczeniu dotyczą:

- niektórych zapisów, np.: „... można sformułować tezę pracy, która mówi, że ...” - str. 31₁₆, czy „Idąc od początku, czyli przygotowania procesu ...” – str. 23⁶,
- podpisów pod rysunkami próbek w brzmieniu „, Szkic próbki ...” - Rys. 4.9, Rys.4.11
- anglojęzycznych opisów rysunków zaczerpniętych z literatury (np. rys. 2.1, rys. 2.4, rys. 2.6),
- zakończenia punktu podpisem pod rysunkiem (np. rys. 5.22) i braku numeracji zależności (str. 62)

W trakcie czytania pracy zauważono również nieliczne błędy interpunkcyjne, które przekazano bezpośrednio Doktorantowi do wykorzystania podczas przygotowywania publikacji.

Przytoczone uwagi nie wpływają na ogólnie pozytywną ocenę poziomu recenzowanej rozprawy, zawierającej szereg wartościowych wyników i analiz. Doktorant wykazał się dużym opanowaniem występujących w pracy zagadnień teoretycznych i metodyk badawczych oraz bardzo dużą wiedzą w zakresie nowoczesnych technologii wytwarzania, a do jego oryginalnych osiągnięć zaliczam:

- 1) Przeprowadzenie wieloetapowych analiz przepływów i wytrzymałościowych korpusu serwozaworu hydraulicznego z uwzględnieniem zmian topologii wprowadzonych podczas wytwarzania przyrostowego techniką DMLS,
- 2) Ustalenie związku między porowatością stali 1.2709 a wybranymi parametrami procesu wytwarzania SLM, takimi jak: moc wiązki, prędkość skanowania, odległość między liniami skanowania oraz grubość przetopionej warstwy,
- 3) Zbadanie wytrzymałości zmęczeniowej w zakresie ograniczonej trwałości stali 1.2709 wytworzonej techniką SLM o najmniejszej uzyskanej porowatości w warunkach stałoaamplitudowego, jednostronnie zmiennego rozciągania,

- 4) Wyznaczenie wartości współczynnika tarcia między elementami wytworzonymi techniką SLM ze stali 1.2709 w zależności od temperatury otoczenia i obciążenia tychże elementów.
- 5) Zbadanie morfologii złożeń proszkowych stali 1.2709 pod względem udziału procentowego frakcji zdefiniowanych przez rozmiar i kształt cząstek proszku nowego, po dziesięciokrotnym i trzydziestokrotnym użyciu z uwzględnieniem wzbogacenia tych złożeń proszkiem nowym oraz zbadanie porowatości materiałów wytworzonych z tych proszków techniką DMLS.
- 6) Wyznaczenie trwałości zmęczeniowej cienkościennych elementów modelowych wytworzonych ze stali 1.2709 techniką DMLS w warunkach promieniowego obciążenia ciśnieniem płynu hydraulicznego oraz odniesienie uzyskanych wyników do materiału referencyjnego, wytworzonego konwencjonalnie,
- 7) Wyznaczenie trwałości zmęczeniowej w warunkach obrotowego zginania cienkościennych elementów modelowych wytworzonych ze stali 1.2709 techniką DMLS,
- 8) Opracowanie uniwersalnej procedury wytwarzania z wykorzystaniem procesu przyrostowego DMLS uwzględniającej stopień degradacji złożeń i mogącej znaleźć zastosowanie podczas wytwarzania korpusów rozdzielaczy hydraulicznych


4. Wniosek końcowy

Z przedstawionej wyżej oceny rozprawy Pana mgr. inż. Piotra Bąka wynika, że:

- wybór tematyki pracy został przeprowadzony w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki,
- Doktorant posiada umiejętność zaprojektowania złożonych zadań naukowych i zagadnień praktycznych oraz ich realizacji nowoczesnymi metodami,
- podjęte w rozprawie trudne zadania zostały zrealizowane na właściwym poziomie,
- przeprowadzone analizy skomplikowanych zjawisk, opracowanie wyników i forma wniosków nie budzą istotnych zastrzeżeń,
- treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na odpowiednim poziomie dokumentację z badań własnych.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą. Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Piotra Bąka pt.: „*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” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku oraz dodatkowo Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Jednocześnie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned on the right side of the page.