

dr hab. inż. Tomasz Dziubek, prof. uczelni  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska  
Al. Powstańców Warszawy 8  
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 12.08.2020

## **RECENZJA**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Janusza Mariana KLUCZYŃSKIEGO pt. „KSZTAŁTOWANIE WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH ELEMENTÓW ZE STALI 316L WYTWORZONYCH PRZYROSTOWĄ TECHNIKĄ SLM”**

**Podstawa opracowania:** pismo prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej "Inżynieria Mechaniczna" Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego z siedzibą w Warszawie z dnia 24.06.2020 nr 21/RDN IM/2020 dotyczące opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Janusza Mariana Kluczyńskiego.

#### **1. Wprowadzenie**

Addytywne metody wytwarzania wyrobów znajdują coraz więcej zastosowań w wielu obszarach nauki ale również procesach wytwarzania elementów maszyn ze stopów metali. Dostępne opracowania z zakresu procesów projektowania wyrobów wytwarzanych technikami przyrostowymi, samych procesów wytwarzania oraz obróbki post-procesowej tego typu prototypów, wykazują spory deficyt informacji dotyczących właściwości wytrzymałościowych elementów otrzymywanych w wyniku spiekania warstwowego proszków metali. Prace związane z tymi zagadnieniami są szczególnie uzasadnione potrzebami przemysłu, który coraz częściej i chętniej wykazuje nimi spore zainteresowanie. W ramach zespołów roboczych ISO trwają obecnie intensywne prace nad normalizacją procesów związanych z technologiami przyrostowymi.

Zauważalne jest pojawienie się niszy badawczej w tym zakresie, a powyższe informacje dowodzą, że tematyka pracy jest aktualna, w związku z tym jej podjęcie jest uzasadnione. Wyniki badań zawartych w rozprawie mają potencjał aplikacyjny możliwy do zastosowania w praktyce przemysłowej w branżach związanych z budową i eksploatacją maszyn, przemysłem AGD oraz lotniczym, jak również w medycynie.

## 2. Struktura pracy doktorskiej

Dysertacja doktorska mgr inż. Janusza Mariana Kluczyńskiego pt. „Kształtowanie właściwości wytrzymałościowych elementów ze stali 316L wytworzonych przyrostową techniką SLM” opisuje kompleksowo w sposób teoretyczny i doświadczalny zagadnienia przedstawione w tytule i sformułowane jako cel i zakres pracy.

Rozprawa składa się ze 181 stron, zawartych w 11 ponumerowanych rozdziałach oraz wprowadzenia, które nie jest objęte numeracją podobnie jak zawarta w pracy bibliografia. Na końcu pracy zamieszczone zostały załączniki w postaci atlasu mikrostruktur. Dysertacja zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń, natomiast brak jest streszczenia zarówno w języku polskim, jak i w języku angielskim. Bibliografia obejmuje 110 pozycji ze źródeł krajowych i zagranicznych w tym publikacje zwarte, czasopisma i strony internetowe oraz 5 norm, które właściwie zostały przywołane w tekście rozprawy. Wątpliwości mogą budzić powołania na niektóre portale internetowe, szczególnie związane z tzw. drukiem 3D, na których zamieszczone informacje często nie mają charakteru naukowego tylko reklamowy. Proporcje pomiędzy artykułami naukowymi i pozycjami książkowymi są właściwe i odpowiadają aktualnemu stanowi zagadnienia.

Pracę rozpoczyna krótkie wprowadzenie, które jest propedeutyką do podjętego w pracy tematu. Rozdział pierwszy dotyczy zastosowania przyrostowych metod wytwarzania dedykowanych dla struktur metalowych, który stanowi część analizy stanu zagadnienia kontynuowanej w rozdziale drugim jako przegląd literatury z zakresu użytkowych właściwości komponentów wytwarzanych z zastosowaniem metody SLM na bazie stali 316L. W rozdziale tym Autor (na str. 27) nie ustrzegł się powtórzenia tekstu: "*Schematyczne ujęcie mechanizmu TGM przedstawiono na rys. 2.6*". Rozdział trzeci zawiera podsumowanie oraz wnioski analizy stanu zagadnienia podjętej w pracy problematyki.

Pojawia się tu pytanie czy połączenie tych trzech rozdziałów i zatytułowanie np. analiza stanu zagadnienia byłoby uzasadnione. Przedstawiony w tej części materiał jest obszerny i kompleksowo ujmuje zagadnienia dotyczące przyrostowych technik wytwarzania oraz wpływu metody i parametrów procesu na właściwości wytrzymałościowe wytwarzanych elementów.

Analiza stanu zagadnienia opracowana na podstawie literatury pozwoliła na sformułowanie w rozdziale czwartym właściwego naukowego celu pracy dotyczącego oceny wpływu parametrów wytwarzania oraz post-procesowej obróbki cieplnej na wybrane właściwości wytrzymałościowe części wykonanych ze stali 316L metodą druku 3D z zastosowaniem technologii SLM. Jako cel użyteczny zdefiniowano określenie możliwości kształtowania użytkowych właściwości elementów wytworzonych metodą SLM uzyskiwanych w wyniku wprowadzenia do procesu wytwórczego dodatkowych zabiegów cieplnych. W rozdziale tym

wyodrębniono również szczegółowe zadania składające się na zakres niniejszej pracy.

Rozdział piąty precyzuje zaplanowany program badań, w którym określono wstępne parametry procesu wytwarzania oraz kształt próbek badawczych. Sprecyzowano również metody badawcze oraz dedykowane do nich urządzenia, jak również przedstawiono zadania wykonane w ramach post-procesu łącznie z użytą w tych działaniach aparaturą.

W rozdziale szóstym zawarty został dobór oraz wpływ parametrów procesu i realizacja wytwarzania prototypów badawczych zgodny z zastosowaną techniką SLM oraz badania mikrostruktury próbek zamieszczone w załączniku, jako atlas mikrostruktur. W rozdziale tym Autor popełnił błąd stylistyczny (str. 73): "*Próbki wytworzone przy użyciu parametrów proponowanych w nie wykazywały mniejszej porowatości oraz korzystniejszymi wartościami mikrotwardości*". Błąd ten ma charakter wyłącznie edycyjny oraz stylistyczny i nie wpływa to na wartość merytoryczną rozprawy. W oparciu o przeprowadzone badania Autor dokonał selekcji w postaci pięciu grup parametrów wytwarzania, które zostały zastosowane do wykonania zestawu próbek badawczych dedykowanych do dalszych badań (wytrzymałościowych).

Rozdział siódmy poświęcony jest badaniom właściwości mechanicznych oraz naprężeń własnych. Zawarte zostały w nim wyniki pomiarów twardości, analiza stanu naprężeń własnych oraz badania wytrzymałości statycznej. W rozdziale tym Doktorant, 2-krotnie błędnie powołuje się na rysunek 7.3 (właściwy rys. 7.7, str. 90 i 93). Błędy te mają charakter wyłącznie edycyjny i nie wpływa to na wartość merytoryczną rozprawy. Rozdział kończy analiza powierzchni przełomów po statycznej próbie rozciągania.

W rozdziale ósmym Autor przedstawił badania z zakresu niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej. Proces badawczy wykonany został dla pięciu serii próbek, wytworzonych z zastosowaniem wyselekcjonowanych na wcześniejszym etapie realizacji badań, parametrów wytwarzania. Rozdział ten opisuje badania własne Doktoranta, które stanowią bardzo szeroki materiał z przeprowadzonych badań oraz ich szeroką analizę zilustrowaną przy pomocy szeregu czytelnych wykresów ułatwiających interpretację przeprowadzonych pomiarów. Można by się jednak zastanowić, czy zastosowanie takiej samej skali wartości dla liczby nawrotów obciążenia, nie zwiększyło by bardziej czytelności wyników. Analogiczna sytuacja dotyczy ujednoczenia skali szczegółów przedstawiającej mikrobudowę powierzchni przełomów.

Rozdział dziewiąty przedstawia wpływ przeprowadzonej obróbki post-procesowej (cieplnej) na właściwości mechaniczne i naprężenia własne. Badania wykonano dla próbek poddanych obróbce izostatycznego prasowania, przesycania oraz wykonanego w kolejności połączenia izostatycznego prasowania i przesycania. Wykonano w tym zakresie realizacji pracy ponownie pomiary twardości, analizę stanu naprężeń własnych, wpływu obróbki cieplnej na wytrzymałość statyczną oraz przeprowadzono analizę powierzchni przełomów uzyskanych po statycznej próbie rozciągania próbek po obróbce cieplnej. Szkoda, że Autor nie wykonał tutaj bezpośredniego zestawienia wyników badań

z próbkami przed obróbką cieplną. Mogło by to zwiększyć czytelność zmian uzyskanych w wyniku przeprowadzonego postprocessingu.

W rozdziale dziesiątym przedstawiony został wpływ, analizowanego w ramach realizacji niniejszej pracy postprocessingu, na niskocyklową wytrzymałość zmęczeniową. Analogicznie jak w rozdziale ósmym proces badawczy wykonany został dla pięciu serii próbek. Rozdział ten opisuje szeroki materiał z przeprowadzonych badań oraz ich szeroką analizę zilustrowaną przy pomocy szeregu czytelnych wykresów. Można by się jednak ponownie zastanowić, czy zastosowanie takiej samej skali wartości dla liczby nawrotów obciążenia, nie zwiększyło by bardziej czytelności wyników. Analogiczna sytuacja dotyczy ujednolicenia skali szczegółów przedstawiającej mikrobudowę powierzchni przełomów. Na końcu rozdziału (str. 149) występuje błąd formatowania tekstu. Błędy te mają charakter wyłącznie edycyjny i podobnie jak przedstawione uwagi nie wpływa to na wartość merytoryczną rozprawy.

W rozdziale jedenastym Autor przedstawił podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań. W pierwszej części podsumowania została przedstawiona ogólna analiza wynikająca z otrzymanych wyników. Druga część została podzielona na dwanaście sekcji, które precyzują i przedstawiają wnioski, opierające się na szczegółowej analizie uzyskanych wartości, dotyczące wpływu poszczególnych etapów procesu wytwórczego oraz postprocessingu na właściwości wytrzymałościowe elementów wytworzonych ze stali 316L addytywną metodą SLM. Wnioski mają charakter naukowy oraz, co jest równie istotne użyteczny.

Jako globalne uwagi dotyczące całości pracy dotyczą występowania tzw. tekstów wiszących, które pojawiają się na początku większości rozdziałów oraz formatowania w tekście powołań na rysunki oraz tabele. W odniesieniu do tych drugich wynikają one najprawdopodobniej z automatycznej numeracji rysunków i tabel, która często niesie ze sobą tyle samo korzyści, co i problemów. Błędy te mają charakter wyłącznie edycyjny i podobnie jak przedstawione uwagi nie wpływa to na wartość merytoryczną rozprawy, którą oceniam bardzo wysoko.

### **3. Charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Tematyka i zakres przeprowadzonych badań przedstawionych w rozprawie dotyczą technologii przyrostowych związanych z przetwarzaniem warstwowym proszków stopów metali oraz wpływu parametrów procesu, jak i wpływu obróbki cieplnej na właściwości wytrzymałościowe elementów wytwarzanych z zastosowaniem metod addytywnych, które należą do zagadnień szczególnie ważnych i aktualnych nie tylko z punktu widzenia rozwoju nauki ale również aplikacji przemysłowych. Badanie i ocena wybranych parametrów wytrzymałościowych wyrobów uzyskiwanych bezpośrednio w wyniku procesu przyrostowego ale również w wyniku post-procesowej obróbki cieplnej są istotne z punktu widzenia rozwoju technologii addytywnych ale również technologii hybrydowych skojarzonych bezpośrednio z przyrostowymi. W dostępnej

literaturze, można spotkać wiele opracowań dotyczących technologii szybkiego prototypowania wyrobów, najczęściej przedstawiających wyniki badań właściwości wytrzymałościowych oraz dokładności wymiarowej i kształtowej próbek normatywnych, jednak niewiele jest opracowań przedstawiających wyniki badań wpływu obróbki post-procesowej (cieplnej) próbek wykonanych przyrostowo ze stopów metali na właściwości wytrzymałościowe.

Praca w zasadniczej części wynikającej z założonych celów opiera się na badaniach, z których pierwsza część stanowi pewnego rodzaju wstęp do części zasadniczej, czyli badań twardości oraz zmęczeniowych próbek badawczych wykonanych z zastosowaniem wybranych parametrów procesu addytywnego oraz wpływu post-procesowej obróbki cieplnej na właściwości wytrzymałościowe.

Przedstawione w pierwszej części rozprawy syntetycznie zebrane informacje z zakresu zastosowania technik przyrostowych do wytwarzania struktur metalowych, jak i wykonany przegląd literatury dotyczący właściwości użytkowych elementów wytworzonych techniką SLM ze stali 316L, stanowi oryginalny wkład w część dotyczącą analizy stanu zagadnienia, ponieważ tego typu informacje generalnie nie są udostępniane i rzadko publikowane w opracowaniach naukowych.

Druga część rozprawy opiera się na poprawnie przygotowanym procesie badawczym oraz skrupulatnej analizie otrzymanych wyników z zakresu obejmującego podjętą tematykę. Z punktu widzenia programu badań, można tutaj wyróżnić szeroko rozwinięte zagadnienia dotyczące:

- szczegółowego doboru parametrów wytwarzania opartego o przegląd literatury oraz o konsultacje z liderem wśród producentów systemów do wytwarzania przyrostowego SLM Solutions A.G. Zaproponowana przez Autora zmiana parametrów wytwarzania w relatywnie niewielkim zakresie umożliwiła wnikliwą analizę wpływu zmiany poszczególnych zmiennych procesu na właściwości użytkowe wytworzonych przyrostowo próbek,
- wnikliwej selekcji dobranych parametrów wytwarzania opartej o szczegółową analizę porowatości, mikrotwardości i mikrostruktury,
- przeprowadzenia badań w zakresie statycznej wytrzymałości na rozciąganie poszerzonych mapami odkształceń uzyskanych na podstawie cyfrowej korelacji obrazu Digital Image Correlation (DIC),
- realizacji pomiarów naprężeń własnych opartych o metodę opracowaną przez Zespół z Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN pod przewodnictwem Prof. Bonarskiego, pozwalająca na szczegółową analizę wpływu zastosowanych parametrów wytwarzania i obróbki cieplnej na stan naprężeń własnych w poszczególnych próbkach,
- z punktu widzenia aplikacyjności niniejszej pracy doktorskiej, bardzo interesujące jest przeprowadzenie analiz wpływu obróbki cieplnej w postaci prasowania izostatycznego (HIP) na właściwości przyrostowo wytworzonych elementów w zakresie wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej,
- przeprowadzenia badań i obliczeń z zakresu niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej próbek poddanych trzem rodzajom obróbki cieplnej z uwzględnieniem trzech kombinacji parametrów wytwarzania

przyrostowego. Opracowane wyniki poddano dogłębnemu wnioskowaniu w odniesieniu do zastosowanych modyfikacji zarówno w przypadku różnych parametrów wytwarzania jak i zastosowanej obróbki cieplnej,

- wykonania analizy przełomów zmęczeniowych w oparciu o szczegółową dokumentację w postaci fotografii ze Skaningowego Mikroskopu Elektronowego (SEM),

Analizując wyniki przeprowadzonych badań można jednak sformułować kilka uwag dotyczących zagadnień, które mogłyby być rozwinięte:

- biorąc pod uwagę wykonane analizy, słusznym byłoby przeprowadzenie dodatkowych obróbek powierzchni (piaskowanie, elektropolerowanie) mających istotny wpływ na właściwości zmęczeniowe wytworzonych próbek,
- istotnym zagadnieniem byłoby poszerzenie opisu właściwości zmęczeniowych wytworzonych przyrostowo próbek o analizy prędkości pęknięcia zmęczeniowego,
- podobnie jak, realizacja dodatkowych badań z zakresu ściskania lub/i zginania, które mogłyby być poszerzone o analizę w warunkach obciążeń dynamicznych,
- można było również wykonać badania z zakresu wysokocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej (w niewielkim, pilotażowym obszarze) w celu rozwinięcia wnioskowania dotyczącego doboru poszczególnych parametrów wytwarzania i obróbki cieplnej.

Dysertacja oparta jest na badaniach i analizie wyników badań, przeprowadzonych w oparciu o założony program z zastosowaniem szerokiego spektrum nowoczesnej aparatury badawczej do przeprowadzenia badań ujętych w rozprawie doktorskiej. Doktorant w procesie badawczym potwierdził założony cel pracy.

Przedstawione uwagi w dużej mierze można uznać, że mają charakter dyskusyjny i nie wpływają znacząco na wartość merytoryczną rozprawy. Metodyka badań oraz opracowane modele badawcze stanowią w znacznej części oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”. Stwierdzam jednocześnie, że wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy ze względu na dużą liczbę przeprowadzonych badań oraz wykonanych na ich podstawie analiz, jak i znaczenie tematu ale również ze względu na intelektualny wkład Autora. Poziom edycyjny jest również na wysokim poziomie z ilustracjami i wykresami w sposób czytelny przedstawiającymi wyniki zrealizowanych badań.

#### **4. Podsumowanie**

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny dysertacji doktorskiej stwierdzam, że:

- tematyka pracy odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki objętej jej zakresem i wnosi nowe treści w wielu miejscach,

- wybór tematyki pracy został dokonany w sposób trafny, a zakres pracy spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim,
- struktura i formalny układ pracy są prawidłowe,
- zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Autora,
- założenia przyjęte w pracy, wyniki badań oraz przeprowadzone na ich podstawie analizy mogą być przedmiotem dalszych prac naukowych.

W rozprawie Autor podjął się realizacji złożonego zadania badawczego, które nie wyczerpuje całości tematyki związanej z możliwościami kształtowania właściwości wytrzymałościowych elementów ze stali 316L wytwarzanych addytywną technologią SLM oraz ich analizą. Można dodać że jest to dopiero początek dla badań celu otrzymania kolejnych rozwiązań dedykowanych do wdrożeń przemysłowych. Prace związane z tymi zagadnieniami są szczególnie uzasadnione potrzebami przemysłu.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego bardzo dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Janusza Mariana Kluczyńskiego pt.: „Kształtowanie właściwości wytrzymałościowych elementów ze stali 316L wytworzonych przyrostową techniką SLM” (promotor: prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK, promotor pomocniczy dr inż. Krzysztof GRZELAK) 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 03 lipca 2018 r. „Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, jednocześnie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej "Inżynieria Mechaniczna" Wojskowej Akademii Technicznej o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.

Dodatkowo, po zapoznaniu się z przedstawioną do oceny rozprawą doktorską stwierdzam, że stopień złożoności wykonanych badań oraz poziom merytoryczny pracy jaki został osiągnięty w wyniku jej realizacji jest podstawą do przyznania wyróżnienia.

*Tomasz Dziński*

