

Poznań, 06.03.2023

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski
Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
tel.: +48 61 6653570
e-mail: michal.wieczorowski@put.poznan.pl

Ocena rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Piotr Bąka

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

Podstawa recenzji

Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza numer RM-530-07-02/2022 z dnia 30 listopada 2022 roku.

1. Wprowadzenie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest związana z wytwarzaniem przyrostowym, a więc technologią, która zdobywa sobie coraz większe uznanie i popularność. Od szeregu już lat okazała się interesująca nie tylko a punktu widzenia badawczego, ale także użytkowego. Technologia DMLS (Direct Metal Laser Sintering), jako podstawowa stosowana w pracy, to metoda druku 3D, która umożliwia produkcję części metalowych dzięki wykorzystaniu lasera, który topi proszek i w ten sposób inkrementalnie tworzy trójwymiarowy przedmiot. Technologia ta ma zastosowanie w wielu branżach, w tym w przemyśle lotniczym, medycznym, motoryzacyjnym, obróbce metali i innych. Jedną z głównych zalet technologii DMLS jest jej elastyczność - umożliwia ona produkcję pojedynczych egzemplarzy lub niewielkich serii.

Ponadto, dzięki temu, że technologia ta umożliwia tworzenie przedmiotów o bardzo złożonych kształtach, pozwala na projektowanie i produkcję części optymalizowanych pod kątem swojego zastosowania, co prowadzi do oszczędności czasu i kosztów. Mimo tych ograniczeń kosztowych i tego, że części produkowane przy użyciu DMLS wymagają dalszej obróbki, technologia ta jest jedną z najbardziej zaawansowanych i obiecujących metod druku 3D, co w przyszłości będzie zapewne prowadzić do jej dalszego rozwoju oraz zastosowania w coraz szerszym zakresie branż.

W pracy Doktorant zastosował technologię DMLS do trudnej i wymagającej stali 1.2709 z gatunku maraging (od angielskiego wyrażenia "martensitic aging", które odnosi się do procesu utwardzania stali). Zawiera ona dodatki niklu, manganu, miedzi oraz wolframu, i charakteryzuje się bardzo wysoką wytrzymałością i odpornością na korozję. Ze względu na swoje właściwości, stal ta jest bardzo odporna na zużycie i odkształcenia, co czyni ją świetnym materiałem do produkcji elementów, narażonych na wysokie obciążenia mechaniczne i do stosowania w wielu branżach, w tym w przemyśle lotniczym, kosmicznym, obróbce metali, a także w produkcji narzędzi i form wtryskowych. Jednakże wadą omawianej stali jest (oprócz wysokiej ceny) trudność w obróbce skrawaniem, co wymusza stosowanie nietuzinkowych narzędzi i technik obróbki. Jest to więc materiał bardzo dobrze sprawdzający się przy wytwarzaniu przyrostowym.

Biorąc powyższe pod uwagę, podjęta przez Doktoranta tematyka jest bardzo aktualna, a sama praca doskonale wpisuje się w całokształt prac od wielu lat prowadzonych w Politechnice Rzeszowskiej na tematy związane z szybkim prototypowaniem. Podjęcie tematu rozprawy należy zatem uznać za jak najbardziej uzasadnione i trafne zarówno pod względem naukowym, jak i użytecznym. To ostatnie jest jeszcze o tyle istotne, że praca jest finalizacją działań prowadzonych w ramach programu ministerialnego Doktorat Wdrożeniowy, a więc jej nieodzownym elementem jest wdrożenie wyników w praktyce.

2. Omówienie rozprawy

Przedstawiona do recenzji dysertacja złożona jest z 6 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz nienumerowanych rozdziałów czyli wykazu ważniejszych oznaczeń i literatury. Manuskrypt w całości liczy 119 stron. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów tworzy układ spójny i logiczny. Zawartość merytoryczna jest poprawnie i bogato ilustrowana, co zdecydowanie pomaga w interpretacji toku rozumowania Autora.

Rozdział pierwszy (Wprowadzenie) stanowi wstęp do pracy i przedstawia informacje wprowadzające czytelnika w zagadnienia związane z dysertacją związane m.in. technologiami

przyrostowymi, rozwiązaniami w przemyśle lotniczym i prognozowaniem rozwoju rynku druku 3D.

W rozdziale drugim Autor przeprowadził szeroką analizę stanu zagadnienia w odniesieniu do technik przyrostowych. Omówiono w nim różne technologie, a szczególnie skupiono się na tych, które wykorzystują materiał proszkowy. Podkreślono duży potencjał technologiczny i aplikacyjny w obszarze spajania przyrostowego proszków metali zaznaczając wszelako bardzo istotny fakt, a mianowicie, że w standardowych parametrach procesu udostępnianych przez producentów nie są uwzględniane zmiany właściwości stosowanych proszków w obrębie określonych materiałów. W rozdziale krótko odniesiono się też do tworzenia modeli i problemów kontroli jakości elementów wytworzonych.

Rozdział trzeci jest wynikiem analizy przedstawionej w rozdziałach poprzednich i przedstawia sformułowaną tezę, a także jej cel i zakres. Weryfikacji podlega stwierdzenie, że parametry procesu i degradacja po procesowa wpływają istotnie na właściwości wytrzymałościowe. Celem natomiast było znalezienie zależności pomiędzy tymi parametrami i właściwościami dla elementu stosowanego w lotniczej hydraulice siłowej (serwozawór hydrauliczny).

Począwszy od rozdziału czwartego rozpoczyna się część badawcza pracy. W tym rozdziale omówiono obiekty badawcze - korpus serwozaworu hydraulicznego i specjalnie przygotowane próbki do badań wytrzymałościowych, mikrostruktury i porowatości oraz złoza. Krótko opisano metodykę badawczą. W części dotyczącej analizy parametrów procesu przyrostowego SLM opisano badania porowatości, wytrzymałości w próbie statycznego rozciągania, zmęczenia, tribologiczne i twardości. W części związanej z próbkami badawczymi DMLS przedstawiono system, na którym je wykonywano oraz zaprezentowano procedury: badania morfologii złoza proszkowego, badania zmęczeniowego próbek obciążonych cyklicznie zmiennym obciążeniem ciśnieniowym i badania zmęczeniowego próbek obciążonych cyklicznym obrotowym momentem zginającym.

Rozdział piąty przedstawia wyniki zrealizowanych badań i ich wstępną analizę. Wyniki dotyczyły dwóch etapów: pierwszy - próbek otrzymanych przy użyciu w technologii SLM oraz drugi z próbkami wykonanymi z zastosowaniem procesu DMLS. Badania po procesie SLM obejmowały określenie porowatości otrzymywanych wydruków, wytrzymałości w próbie rozciągania, wytrzymałości zmęczeniowej, analizę tribologiczną i pomiary twardości. Badania efektów zastosowanej technologii DMLS dotyczyły określenia morfologii złoza proszkowego, porowatości otrzymywanych wydruków i wytrzymałości zmęczeniowej.

W rozdziale szóstym znajduje się syntetyczna analiza wyników przeprowadzonych badań sformułowana w postaci podsumowania oraz wniosków. Tak jak w poprzednim rozdziale

podzielono je na wnioski z badań próbek otrzymanych przy użyciu w technologii SLM oraz dla próbek wykonanych z zastosowaniem procesu DMLS. W tym rozdziale znajdujemy także założenia metodyki wytwarzania korpusu serwozaworu zawierające m.in. schemat procedury produkcji w technologii DMLS.

Jak już wspomniano, rozdziałem nienumerowanym zamykającym pracę jest literatura, obejmująca 128 pozycji w tym książki, artykuły, normy i strony internetowe. Publikacje te stanowią szeroki i aktualny przegląd związany z tematyką pracy. Są wśród nich także współautorские opracowania Autora ocenianej rozprawy.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny praca doktorska jest interesująca i zawiera wiele cennych informacji z punktu widzenia możliwości aplikacyjnych procesu DMLS w przemyśle. Zagadnienia przedstawione przez Doktoranta pozwalają pozytywnie ocenić jego wiedzę i doświadczenie. Są one poparte wynikami pomiarów i analiz, które umożliwiły na opracowanie założeń metodyki wytwarzania korpusu serwozaworu jako przykładowego przedmiotu istotnego z punktu widzenia wdrożenia. Analizując założenia rozprawy doktorskiej stwierdzam, że postawiona przez Doktoranta teza pracy została udowodniona, parametry procesu i degradacja po procesowa wpływają istotnie na właściwości wytrzymałościowe. W mojej ocenie osiągnięto również główny cel pracy, którym było znalezienie zależności pomiędzy parametrami i właściwościami dla elementu stosowanego w lotniczej hydraulice siłowej

Ważnym elementem pracy są badania porowatości, wytrzymałości i twardości, pozwalające ocenić parametry procesu. Ale nie mniej istotne są badania związane ze złożem. Degradacja złoża w wytwarzaniu przyrostowym jest zjawiskiem, które występuje w procesie produkcji niejako naturalnie. Podczas procesu drukowania jakość i wydajność proszkowego złoża wytwarzającego, ulega stopniowemu pogorszeniu. Degradacja ta w ogólności jest wynikiem m.in. zmiany właściwości fizycznych i chemicznych proszku, tworzeniem się niepożądanych faz strukturalnych, zanieczyszczeniem, a także - a może przede wszystkim - erozją złoża spowodowaną ciągłym przepływem i ogrzewaniem. Jej wynikiem jest np. zwiększenie liczby błędów i defektów w produkowanym przedmiocie, a także pogorszenie jakości powierzchni wydruku. Należy też mieć na uwadze, że w skrajnych przypadkach, degradacja złoża może doprowadzić do całkowitego zablokowania przepływu proszku i zatrzymania procesu produkcji. Aby zminimalizować degradację złoża konieczne jest przygotowanie proszku przed użyciem, kontrolo-

wanie temperatury i ciśnienia w komorze drukującej, stosowanie specjalnych filtrów i zabezpieczeń, a także monitorowanie parametrów drukowania w czasie rzeczywistym. Zjawisko to stosunkowo rzadko poddawane jest głębszej analizie, przez co oceniana praca nabiera dodatkowego pozytywnego zabarwienia.

Zapoznając się z treścią manuskryptu nasunęły mi się pewne uwagi w stosunku do treści, które mogą być dla Doktoranta punktem wyjścia do dalszego doskonalenia warsztatu naukowego i edytorskiego, a także do przemyśleń odnośnie dalszych publikacji. Wśród takich uwag są następujące:

- 1) Strona 21. Mowa o absorpcji a nie absorbcji.
- 2) Autor często powołuje się na wiele pozycji literaturowych w miejscach, gdzie trudno sobie wyobrazić ich aż tyle. Warto się zastanowić nad tym faktem. Przy licznych powołaniach w analizie literatury warto też rozwinąć, co w każdej z nich jest istotnego.
- 3) Strona 43. Jeśli praca jest związana z doktoratem wdrożeniowym, to byłoby dobrze podać jaka firma jest firmą współpracującą i kto jest z jej ramienia opiekunem pomocniczym.
- 4) Jeśli praca jest związana z doktoratem wdrożeniowym to w rozdziale 6.3 przydałoby się podać, co konkretnie jest wdrożeniem, jaki to ma wpływ na rozwój przedsiębiorstwa.
- 5) Rys 4.16. Przedstawiona maszyna to bardziej elektrodrażarka drutowa niż wycinarka elektroerozyjna.
- 6) Rys. 4.21. W opisie podano: zgląd z widocznymi punktami. Jakimi? To wymaga bardziej szczegółowego wyjaśnienia.
- 7) Strona 48. Podano, że wyniki badań zostały zawarte w raporcie. Co to za raport? Nie ma na niego powołania. Podobnie na stronie 49. Na stronie 79 jest tajemniczy raport RU-P1-651-136/17.
- 8) Strona 50. Badania są raczej tribologiczne a nie trybologiczne, dotyczą tribologii jako nauki, a nie trybów.
- 9) Strona 50. Co to jest tarcie wiertne?
- 10) Strona 62. Oscyloskop oparty na komputerze PC to nie jest pikoskop. Pikoskop to nazwa własna oscyloskopu firmy Pico.
- 11) Strona 63. Posługując się terminem krzywa S-N, należy opisać, jak to Autor rozumie i skąd takie oznaczenie.
- 12) Rysunki strona 76 i poprzednie. Czy analizowano średnią wielkość pora? Jest bardzo istotna różnica pomiędzy jednym, dużym porom a serią małych. Udział porów w obszarze tego nie pokazuje.
- 13) Strona 82. Podano, że próbki osiągnęły wymaganą twardość. Czyli ile?

- 14) Strona 83. Czy nie lepiej stosować termin zgarniacz zamiast wycieraczka?
- 15) Strona 83. To jest raczej moment obrotowo zginający a nie gięty.
- 16) Strona 86. Pojawia się frakcja glonularna?
- 17) Strona 87. Czy nie lepiej użyć bardziej naukowego określenia niż zlepy?
- 18) Strona 193. Ra ma swoją nazwę i definicję, to nie jest chropowatość, ale jej parametr.
- 19) W rozdziale 6 jest nie tylko podsumowanie i wnioski, ale także fragment analizy wyników.
Albo należałoby dopisać to do tytułu rozdziału, albo tą część przenieść do rozdziału 5.
- 20) Praca jak się domyśliłem była ukoronowaniem działań w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy. W związku z tym byłoby dobrze poświęcić trochę miejsca opisowi wdrożenia i napisać chociaż kto był opiekunem pomocniczym ze strony podmiotu współpracującego (firmy).
- 21) W rozdziale 6 czytamy, że zawór jest elementem programu Polska Wschodnia. Warto wyraźnie odróżnić co powstało jako doktorat wdrożeniowy i czego ta praca jest efektem, a co jest wynikiem innych programów, dla czystości zapisów i raportów z punktu widzenia Ministerstwa.

Oceniając stronę edytorską należy podkreślić, że praca napisana została w ogólności poprawnym językiem polskim, chociaż ze stosunkowo licznymi błędami i niekonsekwencjami literowymi (np. ważne dla pracy słowo maraging raz pisane wielką literą a raz małą), z których większość można było wykryć słownikiem edytora. Zdarzają się również brakujące lub nadmierne spacje i przecinki. Rysunki w większości wykonane są z dbałością i starannością. Wśród uwag edytorskich warto zwrócić uwagę na następujące:

- 1) W pracy występują tzw. teksty wiszące, czyli teksty znajdujące się np. pomiędzy tytułem rozdziału głównego a tytułem podrozdziału (np. na początku rozdziału 5). Zasady edytorskie stanowią, że przy numeracji cyfrowej wielorzędowej np. po tytule rozdziału 5 powinien od razu następować tytuł podrozdziału 5.1. a tuż np. po tytule podrozdziału powinien być tytuł podrozdziału kolejnego rzędu itd. Między nimi nie powinno być żadnych tekstów (zwanych wiszącymi). Teksty te to z reguły ogólne wprowadzenia do rozdziałów, omówienia czy streszczenia. Jeżeli tekst wiszący jest cennym i niezbędnym wprowadzeniem do tematu – powinien mieć numer i tytuł, natomiast jeśli zawiera ogólniki lub omówienie dalszej części rozdziału – powinien zostać usunięty przez Autora.
- 2) Rysunki mają często opisy w języku angielskim. Ponieważ praca jest napisana i broniona jako polskojęzyczna, opisy powinny również być w języku polskim, niezależnie od źródła oryginalnego.

- 3) Pojawiają się często zbędne odnośniki do języka angielskiego. Dla słów przyjętych już w języku polskim nie jest to uzasadnione.
- 4) Pisząc liczby z jednostkami powinno się przyjąć tą samą regułę: albo spacja rozdzielająca, albo jej brak. Pod tym względem w pracy nie ma konsekwencji.
- 5) Praca zawiera rozdziały nienumerowane, dla porządku można było przyjąć systematykę całościowo.
- 6) Strona 24. Laser a nie Leser.
- 7) Strona 42. Spośród a nie z pośród.
- 8) Do elementów policzalnych stosujemy "liczba", a nie "ilość".
- 9) Strona 93 i 94, zdublowana tabela 5.18. Następne mają zatem numery o jeden za małe.
- 10) Strona 95 i 98, opisy wykresów. Zamiast naprężeń w funkcji obciążenia, powinno być naprężeń w funkcji obciążenia.

Przedstawione powyżej uwagi w niczym nie umniejszają wartości opiniowanej rozprawy, a część z nich ma charakter zagadnień i tematów do dyskusji. Niemniej, zwłaszcza w takiej pracy jak doktorat pisanej na ogół raz w życiu, warto zwrócić szczególną uwagę na poprawność językową i poświęcić więcej czasu na korekcję błędów literowych.

4. Wnioski

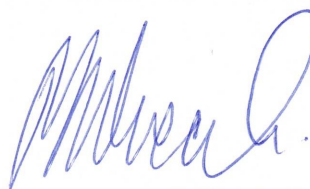
Zaprezentowana rozprawa doktorska jest dziełem zawierającym bardzo ciekawe informacje na temat możliwości aplikacji wytwarzania przyrostowego w przemyśle i sposobu postępowania ze złożem proszkowym. Jej Autor poprawnie podszedł do tematu, wykazując się wiedzą i umiejętnością prowadzenia badań naukowych. Zaplanował i przeprowadził eksperymenty, które potwierdziły wysuniętą hipotezę. Określił cel i zakres pracy, co również zrealizował w stopniu niezbędnym do przygotowania dysertacji. Biorąc pod uwagę nowoczesne trendy w przemyśle opartym na strukturze Industry 4.0, zagadnienia w niej opisane trafnie wpisują się również w obecną sytuację rynkową. Praca napisana jest w sposób jasny i przejrzysty bogato ilustrowana graficznie.

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej stwierdzam, że tematyka pracy jest żywa i aktualna, została wybrana w sposób trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Dysertacja w wielu elementach wnosi treści nowe. Cel pracy został osiągnięty w zakresie przyjętym przez Autora. Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne.

5. Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana 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 złoża w odniesieniu do właściwości rodzimych tejże stali*, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski



Politechnika Poznańska