

Dr hab. inż. Marcin Kot, prof. AGH
Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Jarosława Sienickiego

pt.: „Mikrostruktura i właściwości natryskiwanych zimnym gazem powłok tytanowych do zastosowania w technologiach przyrostowych”

Recenzję wykonałem na zlecenie Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Świętokrzyskiej dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk, którą otrzymałem 3 sierpnia 2023r.

Dokumentację merytoryczną do wykonania recenzji stanowił otrzymany egzemplarz monografii będącej rozprawą doktorską pt.: „Mikrostruktura i właściwości natryskiwanych zimnym gazem powłok tytanowych do zastosowania w technologiach przyrostowych”. Promotorem pracy jest dr. hab. inż. Wojciech Żórawski, prof. PŚk, a promotorem pomocniczym dr hab. Medard Makrenek, prof. PŚk.

1. Charakterystyka pracy

Praca doktorska Jarosława Sienickiego realizowana była w Politechnice Świętokrzyskiej, gdzie od wielu lat prowadzone są prace z obszaru natryskiwania powłok zimnym gazem pod kierunkiem dr hab. inż. Wojciecha Żórawskiego i PZL Mielec w ramach projektu AMphora i programu Innolot. Dodatkowo zaznaczyć należy, że nakładanie powłok i badania prowadzono w kilku ośrodkach naukowych w kraju i za granicą.

Tematyka jej związana jest z wytwarzaniem elementów z tytanu i jego stopów dla przemysłu lotniczego metodami przyrostowymi natryskiwania zimnym gazem. Proces ten ma, podobnie jak inne technologie z grupy wytwarzania przyrostowego (AM), duży potencjał aplikacyjny, gdyż pozwala na wytwarzanie elementów tytanowych o złożonym kształcie przy znacznie mniejszej ilości usuwanego materiału w stosunku do obróbki skrawaniem oraz możliwości znacznego zmniejszenia czasu od projektu do wytworzenia gotowego elementu. Przyczynia się to do potencjalnie dużego obniżenia kosztów produkcji. Doktorant podjął tematykę analizy wpływu parametrów technologicznych natryskiwania na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne powłok z tytanu i stopów tytanu natryskiwanych zimnym gazem.

W pracy poszukiwano optymalnych parametrów natryskiwania w celu podniesienia właściwości mechanicznych i odporności na korozję otrzymanych powłok. Rozprawa doktorska zawiera wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych dla warstw z tytanu technicznego i stopu Ti6Al4V. Ciekawa jest niezbyt często spotykana podjęta próba analizy ekonomicznej zmiany klasycznych technologii ubytkowych na proponowaną technologię przyrostową. Bardzo ważny jest aplikacyjny charakter pracy, co widać w ostatnich rozdziałach, gdzie powłoki natryskiwane były na konkretne elementy statku powietrznego PZL M28.

Tematykę pracy oceniam jako nowoczesną i wpisującą się w ogólnościowy nurt poszukiwania technologii przyrostowych pozwalających na szybkie i tańsze wytwarzanie elementów maszyn i pojazdów w stosunku do dotychczas stosowanych technologii. Dotyczy to między innymi tytanu i stopów tytanu, które są trudne do obróbki skrawaniem. Dodatkowo są one bardzo drogie, więc zmniejszanie odpadów produkcyjnych ma silne uzasadnienie ekonomiczne. Opracowywanie technologii natryskiwania zimnym gazem, wraz z optymalizacją parametrów natryskiwania ukierunkowane na uzyskiwanie pożądanych właściwości, w tym wypadku mikrostruktury, a przez to wytrzymałości statycznej, zmęczeniowej, twardości i odporności na korozję, może pozwolić na szerokie jej wprowadzenie do wielu branż przemysłu. Wpływ analizowanych parametrów natryskiwania na te właściwości jest trudny do predykcji i wymaga prowadzenia wielu badań eksperymentalnych i taki też ma charakter praca doktorska mgr inż. Jarosława Sienickiego.

Rozprawa doktorska liczy 263 strony i jest napisana poprawnym językiem. Praca podzielona jest na 13 rozdziałów obejmujących kolejno: wprowadzenie, przegląd literatury dotyczącej analizowanego zagadnienia, genezę, cel i tezę pracy, program i metodykę badań, wyniki wraz z ich dyskusją oraz podsumowanie i wnioski końcowe. Spis literatury zawiera 178 pozycji, ale tylko jednej z nich współautorem jest Doktorant. Na początku pracy zamieszczono także wykaz symboli i skrótów.

We wprowadzeniu Autor precyzyjnie umiejscowił technologię którą się zajął w pracy, motywację prowadzenia badań na potrzeby przemysłu lotniczego, w tym także motywację ekonomiczną. W części omawiającej aktualny stan wiedzy przedstawił przegląd materiałów tytanowych charakteryzując ich podział i wynikające z mikrostruktury właściwości mechaniczne. Zestawił także technologie przyrostowe pozwalające kształtować elementy tytanowe wraz z krytyczną analizą ich wad i zalet. Na tym tle scharakteryzował technologię natryskiwania zimnym gazem. W rozdziale 4 przedstawił jaki wpływ ma takie natryskiwanie na mikrostrukturę uzyskiwanego materiału tytanowego.

Doktorant dużą uwagę zwrócił na efekty strukturalne i rozkład naprężeń powstający w powłoce w wyniku takich procesów technologicznych oraz ich wpływ na porowatość powłok, ich odporność na korozję, wytrzymałość statyczną i zmęczeniową. Analizę oparł o przytoczone wyniki wielu najnowszych prac prezentowanych w literaturze. Zwrócił uwagę na brak systematycznych analiz wpływu parametrów natryskiwania na właściwości takich powłok. Szeroki przegląd literatury stanowi solidną podstawę do optymalizacji procesu natryskiwania tytanu i stopu Ti-6Al-4V badanych w ramach pracy i prowadzonych w różnych warunkach operacyjnych oraz wskazuje na rozległą wiedzę teoretyczną Doktoranta w obszarze tak inżynierii mechanicznej jak i materiałowej.

Następnie w rozdziale 5 Autor rozprawy przedstawił genezę pracy, tezę oraz cele i zakres pracy. Doktorant postuluje, że zastosowanie procesu wysokociśnieniowego natryskiwania zimnym gazem umożliwi wytworzenie wielowarstwowej powłoki i wykorzystanie jej do kształtowania przestrzennych struktur. Mają one posiadać właściwości przynajmniej zbliżone do właściwości elementów wytwarzanych konwencjonalnymi metodami. Celem była analiza wpływu parametrów procesu na mikrostrukturę i właściwości tytanu oraz stopu Ti-6Al-4V i w konsekwencji opracowanie metodyki optymalizacji natryskiwania zimnym gazem i wytworzenie demonstracyjnych elementów dla samolotu PZL M28 05 z wykorzystaniem tej technologii.

W celu udowodnienia powyższej tezy pracy Autor zrealizował bardzo szeroki program badań finansowany z projektu AMphora i wykonanych w wielu ośrodkach naukowych. Program ten w przejrzysty sposób przedstawiono na rysunku 5.6

W rozdziale 6 zaprezentował aparaturę jaką stosował do badań oraz metodykę badawczą. Opis jest bardzo precyzyjny poza tym, że brakuje opisu systemu natryskiwania oznaczonego jako Impact 5/11. Jest on co prawda opisany w dalszej części pracy, ale powinien moim zdaniem być umieszczony w tym rozdziale. W badaniach nanoindentacji powłok użyto obciążenia 40mN bez komentarza dlaczego akurat takie? Najczęściej stosuje się obciążenia 20, 50 i 100 mN.

W rozdziale 7 przedstawiono plan eksperymentu oparty o procedurę optymalizacji Taguchi'ego. Przedstawiono cele i założenia optymalizacyjne, a zastosowania takiej procedury pozwoliło zmniejszyć ilość badanych powłok do 9 przy aż 4 zmienianych parametrach jak: temperatura i ciśnienie gazów, odległość dyszy od podłoża i prędkość przesuwu dyszy. W dalszej części pracy Doktorant przedstawił analizy mikrostruktury powłok oraz wyniki pomiarów ich porowatości. Na tym etapie badając powłoki nakładane na podłoża dodatkowo piaskowane, określił czy taka obróbka przygotowująca podłoża przed nakładaniem powłoki ma wpływ na uzyskiwane właściwości powłok. W ciekawy sposób Autor rozprawy przedstawia zmiany wpływu analizowanych parametrów na poszczególne właściwości powłok. Przykładem tego jest rysunek 7.30 przedstawiający wpływ parametrów natryskiwania powłoki na jej porowatość. Wyniki wykazały, że im większa temperatura, ciśnienie gazów i odległość dyszy od podłoża tym porowatość jest mniejsza. Powstaje zatem pytanie, czy nie należało by jeszcze zwiększać tych parametrów, aby uzyskać powłoki o jeszcze mniejszej porowatości? Podobne pytanie można zadać analizując wyniki testów zarysowania. Pewną wątpliwość budzi natomiast przyjęcie jako parametr porównawczy sumy szerokości i głębokości rysy skoro są one silnie ze sobą skorelowane. Bardzo ciekawe ze względów poznawczych jest to, że testy twardości wykonano w skali mikro i nano. Pozwoliło to określić jakie są właściwości powłoki oraz samej zewnętrznej warstwy powłoki, które ze względu na specyfikę procesu natryskiwania mogą być znacząco różne. Na końcu tego rozdziału poddano statystycznej analizie wpływ poszczególnych parametrów wytwarzania powłok na ich właściwości oraz określono zależność analityczną pozwalającą przewidywać ich porowatość i nanotwardość. Program badań umożliwił także określenie czy zmiana gazu ochronnego z azotu na dużo droższy hel daje korzystne efekty i czy jest zatem uzasadniona ekonomicznie. Efektem szerokiego zakresu badań, którego wyniki przedstawiono w rozdziale 7, jest określenie optymalnych parametrów natryskiwania, które wykorzystano do natryskiwania już na elementy rzeczywistego elementu statku powietrznego łącznika w ramach tzw. demonstratora technologii. Na tym etapie zastosowano dwa proszki stopu tytanu Ti6Al4V o nieregularnym i sferoidalnym kształcie. Trochę trudno zrozumieć dlaczego na etapie badań podstawowych nie określono, który z nich będzie pozwalał uzyskiwać powłoki o lepszych właściwościach. I tu także zastosowano jako gaz hel lub mieszaninę helu z azotem. Zastosowanie helu skutkowało znaczącym zmniejszeniem porowatości powłok, ale co pozostawił Autor bez odpowiedzi, także zmniejszeniem twardości. Podobnie bez komentarza pozostawił wyniki bardzo dużego wzrostu porowatości dla helu przy zastosowaniu proszku o sferoidalnym kształcie. Kolejny rozdział 10 zawiera wyniki badań kwalifikacyjnych, niezbędnych aby można było zastosować technologię, materiały, rozwiązania konstrukcyjne w przemyśle lotniczym. Obejmowały one w ramach pracy badania porowatości, odporności na korozję oraz testy wytrzymałości statycznej jak i zmęczeniowej. Dla tych badań wykorzystano inny system natryskiwania oraz inne parametry osadzania, co sprawia wrażenie, że poprzednie wyniki nie mają przeniesienia na końcowy efekt prac w postaci finalnych powłok do testów kwalifikacyjnych. Ze względu na czasochłonność badań zmęczeniowych wykonano tylko testy przy 3 poziomach średnich naprężeń i amplitudach testu, niestety bez powtórzeń, co sprawia że wiarygodność uzyskanych wyników jest niewielka i przed rzeczywistym zastosowaniem tej technologii trzeba będzie przeprowadzić szerszy program badawczy.

Końcowe rozdziały to podsumowanie pracy i wnioski końcowe. Autor w syntetyczny sposób opisał wyniki swoich badań. Nie ustrzegł się jednak wniosku, którego nie potwierdził badaniami. Dotyczy to stwierdzenia, że na właściwości mechaniczne powłok natryskiwanych zimnym gazem ma wpływ stan naprężeń własnych w powłokach, których nie badano.

2. Ocena pracy

Praca doktorska mgr inż. Jarosława Sienickiego przedstawiona do oceny napisana jest zwięzłym językiem, dobrą polszczyzną. Ma logiczny układ składający się z przeglądu literatury z omawianej tematyki, szerokiego zakresu badań wraz z ich starannym opisem, analizą i wynikającymi z niej wnioskami. Praca zawiera wartościowe i oryginalne wyniki badań powłok z tytanu i stopu tytanu Ti6Al4V wytwarzanych techniką natryskiwania zimnym gazem. Program badań był starannie przemyślany i przeprowadzony z wykorzystaniem trafnie dobranych, nowoczesnych technik badawczych.

Do najważniejszych osiągnięć i wartościowych elementów pracy zaliczam:

- analizę możliwości wytwarzania elementów z tytanu i stopu tytanu Ti6Al4V w technologii przyrostowej natryskiwania zimnym gazem oraz porównanie jej z innymi technologiami zaliczanymi do grypy AM,
- bardzo szeroki zakres badań eksperymentalnych, oparty o procedurę optymalizacyjną Taguchi'ego, umożliwiającą wyznaczenie optymalnych parametrów natryskiwania zimnym gazem przy aż czterech zmiennych parametrach natryskiwania,
- opis wpływu dodatkowych parametrów jak przygotowanie podłoża oraz gaz użyty do natryskiwania na możliwą poprawę właściwości użytkowych powłok,
- wytworzenie powłok na rzeczywistych elementach statków powietrznych w ramach demonstratora technologii i badań kwalifikacyjnych.

Pragnę podkreślić, że badania nad technologią natryskiwania zimnym gazem tytanu i stopów tytanu nie są dotychczas zbyt często publikowane w literaturze światowej. Poza tym kompleksowy sposób analizy wpływu parametrów technologicznych na właściwości natryskiwanych powłok mogą być podstawą do projektowania elementów w technologii additive manufacturing, dla których ilość użytego materiału, a więc i koszty samych elementów konstrukcyjnych są znacząco mniejsze niż w klasycznych technologiach ubytkowych. Wszystko to sprawia, że praca ma silnie aplikacyjny charakter.

Do słabszych stron pracy zaliczam:

- Brak konsekwencji w programie badawczym od badań podstawowych do badań kwalifikacyjnych. W kolejnych etapach zmieniano np. proszek, który był używany do natryskiwania oraz urządzenie natryskujące.
- Autor przedstawił wiele wyników badań, ale część z nich pozostawił bez komentarza jak np. zmiany porowatości powłok dla różnej geometrii wykorzystywanego do natryskiwania proszku, co pozostawia pewien niedosyt.
- W końcowej części pracy brakuje podjęcia analizy na temat rzeczywistych kosztów wytworzenia jednego z elementów konstrukcyjnych i porównania ich do kosztów wynikających z użycia klasycznej obróbki skrawaniem.

- Doktorant przedstawił szeroką analizę dotychczasowego stanu wiedzy na podstawie literatury, chociaż w analizie wyników swoich badań niewiele jest porównań do osiągnięć przedstawianych przez innych naukowców.

Autor nie ustrzegł się błędów edytorskich i językowych, ale co chciałbym podkreślić jest ich bardzo mało, a niektóre z nich przytaczam poniżej:

- strona 47 wielkość porów podano w mm zamiast μm ,
- strona 103 – „poprzez porównanie ze obrazami..”,
- strona 214 – maszynę do badań wytrzymałości zmęczeniowej nazwano „zmęczeniówką”,
- strona 235 – „ obróbka cieplna umacniająca wykazała przemożny wpływ...”

Przedstawione powyżej uwagi, często o charakterze dyskusyjnym i uwagi redakcyjne nie zmieniają mojej wysokiej pozytywnej oceny pracy. Uwagi te należy rozpatrywać raczej jako sugestie, czy wskazówki do dalszej pracy naukowo-badawczej.

3. Ocena końcowa

Na podstawie szczegółowej analizy rozprawy doktorskiej stwierdzam, że wnioski w niej przedstawione potwierdzają postawioną tezę badawczą. W mojej opinii praca doktorska mgr inż. Jarosława Sienickiego jest ciekawa i zawiera wiele interesujących i wartościowych wyników badań, a także elementy nowatorskie, co jest oryginalnym dorobkiem Doktoranta.

Recenzowana praca pt. „Mikrostruktura i właściwości natryskiwanych zimnym gazem powłok tytanowych do zastosowania w technologiach przyrostowych” spełnia także wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone ustawą o stopniach i tytułach naukowych z dnia 14 marca 2003r (Dziennik Ustaw RP nr 65 poz. 595 z późn. zm).

Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Świętokrzyskiej o przyjęcie rozprawy doktorskiej i o dopuszczenie Pana mgr inż. Jarosława Sienickiego do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.