

Prof. dr hab. inż. Jarosław Sęp
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Chrzanowskiego nt.
„Badanie wybranych właściwości użytkowych napoin
wytworzonych przyrostową technologią laserową LMD
na stali 1.4923”

I. Podstawy formalne i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego.

Recenzowana rozprawa liczy 216 stron. Jej treść podzielona jest na 9 rozdziałów i oprócz tekstu zawiera 182 rysunki i 50 tabel. Rozdziały główne poprzedza spis treści oraz wykaz stosowanych skrótów i oznaczeń, a pracę zamyka wykaz literatury liczący 113 pozycji.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi liczące dwie strony „Wprowadzenie”. Jest to bardzo syntetyczne zarysowanie genezy i tematyki rozprawy. Zwrócono w nim uwagę na stosowanie technologii przyrostowych, w tym napawania przyrostową technologią laserową, w produkcji i regeneracji elementów maszyn. Wskazano na technologię przyrostową LMD (Laser Metal Deposition) jako dającą możliwość uzyskania skomplikowanego kształtu oraz podwyższania właściwości użytkowych. Przedstawiono także ogólną informację dotyczącą zakresu rozprawy doktorskiej oraz projektu w ramach którego realizowane były przedstawione w dysertacji badania.

W rozdziale drugim „Techniki przyrostowe do wytwarzania warstw wierzchnich i elementów maszyn” krótko scharakteryzowano najczęściej stosowane w przemyśle technologie przyrostowe, zwracając szczególną uwagę na technologie, które mogą być wykorzystywane do wytwarzania części metalowych. Są to następujące technologie:

- SLS (selective laser sintering) – selektywne spiekanie laserowe,
- SLM (selective laser melting) – selektywne stapianie laserowe,
- DMLS (direct metal laser sintering) – bezpośrednie spiekanie proszków metalu laserem,
- DMP (direct metal printing) – bezpośredni druk metalem,
- BJ (binder jetting) – strumieniowe natryskiwanie lepiszczem,
- NPJ (nanoparticle jetting) – strumieniowe natryskiwanie nanocząsteczek,
- EBM (electron beam melting) – stapianie proszku wiązką elektronów,
- EBAM (electron beam additive manufacturing) – wytwarzanie przyrostowe wiązką elektronów,
- LC (laser cladding) – laserowe napawanie,
- LMD (laser metal deposition) – laserowe osadzanie metalu,

- LENS (laser engineered net shaping) – przyrostowe wytwarzania gotowych elementów,
- DMD (direct metal deposition) – bezpośrednie osadzanie metalu.

Następnie dla wybranych metod (SLS/SLM, EBM, LMD/LENS, 3DP, SLA) zestawiono tabelarycznie ich zalety i wady realizując tym samym uproszczoną analizę tych uwarunkowań. Kolejnymi aspektami poruszonymi w ogólnej formule w rozdziale drugim, są czas i koszty wytwarzania przyrostowego oraz parametry promieniowania laserowego w kontekście jakości wyrobu. Zwrócono także uwagę na bardzo duży niedobór wiedzy na temat właściwości elementów wytwarzanych przyrostowo, co uzasadnia prowadzenie dalszych badań. Kontynuując w rozprawie ogólne rozważania dotyczące technologii przyrostowych zwrócono uwagę na ich przemysłowe zastosowania. Podano przykłady jej zastosowań, po czym wskazano na technologię LMD (laserowe osadzanie metalu) jako najkorzystniejszą z punktu widzenia aplikacyjnego zastosowania wyników pracy - wytwarzanie warstw na powierzchni łopat. Technologię wytwarzania przyrostowego LMD scharakteryzowano następnie dokładniej, zwracając uwagę na jej zastosowania, wady i zalety.

Rozdział trzeci „Budowa i analiza uszkodzeń łopat stopnia NP parowych turbin energetycznych” przedstawia konstrukcję i opis działania energetycznej turbiny parowej, proces produkcji łopat stosowanych w strefie NP turbiny, a także procesy zużycia łopat turbin. Poruszając zagadnienie zużycia zwrócono uwagę, że końcówki łopat są narażone na największe zużycie ze względu na największą prędkość liniową, co powoduje konieczność odpowiedniego ukształtowania warstwy powierzchniowej w trakcie procesu technologicznego wytwarzania. Stosuje się w tym celu hartowanie, nakładanie powłok lub stelitowych nakładek ochronnych. Do nakładania powłok najczęściej stosowana jest technologia natryskiwania cieplnego, jednak powłoki nie zapewniają wystarczającej odporności na eksploatacyjne zużycie erozyjne. Z tego powodu pojawia się konieczność odbudowania kształtu łopaty po eksploatacji, do czego stosuje się między innymi napawanie laserowe oraz nowoczesne technologie przyrostowe 3D. W podsumowaniu rozdziału Autor stwierdza, że metodą LMD można wytworzyć na łopatach turbin parowych warstwy ochronne o zwiększonej odporności na zużycie erozyjne, na co wskazuje przeprowadzona analiza literatury.

W rozdziale czwartym „Geneza, cel i zakres pracy” w syntetycznej formule przedstawiono genezę pracy oraz jej cele: naukowy i aplikacyjny. Jako cel naukowy wskazano „określenie wybranych właściwości użytkowych systemu warstw (napoin) wytworzonych technologią laserową Laser Metal Deposition (LMD) z wykorzystaniem proszku stopowego HS6-5-2c na podłożu stali 1.4923 stosowanej m.in. do produkcji łopat turbin parowych”. Natomiast jako cel aplikacyjny wskazano „opracowanie procesu wytwarzania napoin technologią laserową Laser Metal Deposition (LMD) z proszku HS6-5-2c na podłożu stali 1.4923 w obszarze najbardziej narażonym na zużycie erozyjne krawędzi natarcia łopaty części niskoprężnej turbiny parowej”. W rozdziale tym przedstawiono także zakres pracy oraz plan badań własnych.

Rozdział piąty zawiera metodykę badań własnych. Przedstawiono:

- metodykę wytwarzania napoin technologią LMD z proszku HS6-5-2c wraz z charakterystyką stanowisk wykorzystywanych do wytwarzania napoin przyrostową technologią laserową LMD,
- metodykę oceny topografii powierzchni realizowaną z wykorzystaniem mikroskopu optycznego ze światłowodową transmisją obrazu,
- metodykę badania twardości z wykorzystaniem metody Vickersa,
- metodykę badania mikrostruktury zrealizowaną na zglądach z wykorzystaniem mikroskopu optycznego,
- metodykę badania składu chemicznego wykonaną przy pomocy mikroskopu skaningowego ze spektrometrem rentgenowskim i przystawką „EDAX”,

- metodykę badania składu fazowego przeprowadzonego na dyfraktometrze rentgenowskim,
- metodykę badania strefy wtopienia, której udział procentowy obliczano na podstawie obserwacji realizowanych na mikroskopie optycznym,
- metodykę badania naprężeń własnych z wykorzystaniem dyfraktometru rentgenowskiego,
- metodykę badań nieniszczących, do których wykorzystano prądy wirowe,
- metodykę statycznej próby rozciągania, którą realizowano na maszynie wytrzymałościowej,
- metodykę zginania trójpunktowego, które realizowano na maszynie wytrzymałościowej,
- metodykę badania uderności, które realizowano na młocie uderowym,
- metodykę badania odporności na erozję, które realizowano na stanowisku własnej konstrukcji,
- metodykę badania odporności na korozję, które zrealizowano z wykorzystaniem metody potencjodynamicznej,
- metodykę oceny niepewności pomiaru.

Na podstawie zawartych w rozdziale 5 opisów można stwierdzić, że w rozprawie zaplanowano bardzo szeroki zakres badań, który obejmował warstwę wierzchnią oraz właściwości użytkowe.

W rozdziale szóstym „Badania wybranych właściwości stali 1.4923 przeznaczonej do wytwarzania łopat turbin parowych” przedstawiono wyniki badań martenzytycznej stali wysokostopowej 1.4923 (X22CrMoV12-1). Jest to materiał stosowany do produkcji łopat parowych. Rozdział przedstawia właściwości stali, jej mikrostrukturę (po hartowaniu i ulepszaniu cieplnym), twardość (w stanie dostawy, po hartowaniu i niskim odpuszczaniu i po ulepszaniu cieplnym), a także skład chemiczny i fazowy. Ponadto, z racji późniejszego procesu napawania, określono spawalność stali wyznaczając w sposób obliczeniowy zakres temperatury, do której należy podgrzać materiał podłoża przed napawaniem.

Rozdział siódmy „Badania wybranych właściwości użytkowych napoin wytworzonych przyrostową technologią laserową LMD na stali 1.4923”, najobszerniejszy w pracy (110 stron) zawiera wyniki przeprowadzonych badań warstwy wierzchniej napoin oraz ich właściwości użytkowych. W pierwszym etapie przeprowadzono badania proszku HS6-5-2c, który wytypowano do wytworzenia napoiny. Dokonano oceny wielkości i kształtu cząstek proszku oraz przeprowadzono analizę składu chemicznego.

W drugim etapie przeprowadzono badania napoin wykonanych na stali 1.4923 z wykorzystaniem proszku HS6-5-2c. Napoiny wykonywano na próbkach płaskich, ustalając parametry stałe oraz zmienne (sterowalne) procesu. Jako parametry zmienne wskazano: gęstość mocy wiązki laserowej, prędkość napawania (posuw) oraz ilość podawanego proszku. W trakcie realizowanych eksperymentów parametry te zmieniano w celu dobrania, jak to określono na str. 101, „optymalnych parametrów wytworzenia pojedynczych ściegów”. Dobór parametrów został przeprowadzony w oparciu o badania geometrii napoiny, analizę mikroskopową struktury napawanej warstwy, pomiary twardości i zmiany składu chemicznego pierwiastków stopowych w napawanej warstwie. W celu wyznaczenia najlepszych parametrów procesu wytwarzania napoin zmieniano parametry sterowalne. Trzykrotnie powtórzono działanie polegające na ustawieniu dwóch parametrów na średnim poziomie w obrębie przyjętego przedziału zmienności, a następnie zmienianiu trzeciego parametru w ramach przyjętego zakresu zmienności. Otrzymano w ten sposób 17 wariantów. Po przeanalizowaniu wymiarów geometrycznych uzyskanych napoin, strefy wtopienia oraz rozkładu twardości i składu chemicznego wytypowano do dalszych badań trzy warianty różniące się gęstością mocy wiązki laserowej przy ustalonym wydatku proszku oraz prędkości napawania. Dalsze analizy przeprowadzone dla trzech wyłonionych wariantów pozwoliły wybrać jeden z nich, który uznano za optymalny.

Następnie dla wybranego wariantu przebadano trzy stopnie nakładania się kolejnych ściegów na poprzedni. Ponownie przeprowadzono badania porównawcze i wyłoniono do dalszych

badan wariant z 50% stopniem pokrycia. Z tak dobranymi parametrami wytwarzania pojedynczych warstw wykonano kolejne napawania w celu określenia liczby niezbędnych warstw do otrzymania zakładanej grubości warstwy technologicznej. Zastosowano 1, 2 oraz 3 warstwy. Po dalszych analizach stwierdzono, że próbki do badania wybranych właściwości użytkowych muszą mieć 3 warstwy. Na podsumowanie przeprowadzonych rozważań wskazano (str. 141) dobrane najbardziej odpowiednie parametry wytwarzania technologią LMD napoin z proszku HS6-5-2c na stali 1.4923.

Dla napoin wykonanych z dobranymi parametrami przeprowadzono dalsze badania w celu określenia ich składu fazowego oraz naprężeń własnych. Dodatkowo wykonano badania nieniszczące w celu wykrycia ewentualnych nieciągłości w napoinie. Przeprowadzone badania potwierdziły korzystne właściwości napoin – ściskające naprężenia własne oraz brak nieciągłości.

Kolejnym etapem były badania porównawcze próbek z warstwą wytworzoną technologią LMD i z materiału podłoża. Przeprowadzono statyczną próbę rozciągania, próbę zginania trójpunktowego, badania udarności, badania odporności na erozję oraz badania odporności na korozję. We wszystkich przypadkach badano trzy warianty: próbki ze stali 1.4923 z napoiną, próbki ze stali 1.4923 po hartowaniu i próbki ze stali 1.4923 po ulepszaniu cieplnym. Przy badaniach korozyjnych przebadano jeszcze dodatkowo proszek z którego wykonywano napoiny.

Statyczna próba rozciągania umożliwiła wyznaczenie właściwości wytrzymałościowe trzech badanych wariantów. Najwyższą granicą wytrzymałości na rozciąganie (ponad 1400 MPa) charakteryzowały się próbki z materiału ze stali 1.4923 po hartowaniu. Próbki z napoiną miały granicę wytrzymałości o ponad 300 MPa niższą. Najniższą granicę wytrzymałości wynoszącą 1000 MPa uzyskano dla próbek wykonanych ze stali 1.4923 po ulepszaniu cieplnym. Po próbach wytrzymałościowych przeprowadzono także rozbudowane badania przełomów.

Próba zginania trójpunktowego wykazała, że średnia wartość naprężenia zginającego przy złamaniu dla próbek ze stali 1.4923 po hartowaniu wynosiła ponad 3100 MPa, dla próbek ze stali 1.4923 po ulepszaniu cieplnym wynosi prawie 2000 MPa, a dla próbek ze stali 1.4923 po ulepszaniu cieplnym z napoiną jest znacznie niższa i wynosi 1277 MPa. Przeprowadzono również optyczne obserwacje próbek po wykonaniu badań.

Wyniki badań udarności są również zróżnicowane. Największe wartości udarności uzyskano dla próbek ze stali 1.4923 po ulepszaniu cieplnym (12,12 - 18,81 J/cm²). Mniejsze wartości udarności (9,74 - 12,34 J/cm²) uzyskano dla materiału stali 1.4923 po ulepszaniu cieplnym z napoiną. Najmniejszą wartość udarności uzyskano dla stali 1.4923 po hartowaniu (6,02 - 7,23 J/cm²). Po próbach udarności również przeprowadzono analizę przełomów.

Badania odporności na erozję wykazały bardzo korzystne właściwości wytworzonych warstw. Stwierdzono ponad siedmiokrotne zmniejszenie zużycia erozyjnego warstw wykonanych technologią LMD z proszku HS6-5-2c w porównaniu z materiałem po ulepszaniu cieplnym oraz prawie trzykrotne zmniejszenie ubytku masy w stosunku do próbek z materiału stali 1.4923 po hartowaniu. Ocenę odporności na erozję uzupełniono badaniami powierzchni po próbach obejmującymi obserwacje mikroskopowe oraz pomiar chropowatości powierzchni.

Badania odporności na korozję nie dały jednoznacznego wyniku. Analizując wyniki potencjału korozji i gęstości prądu korozji stwierdzić można, że najwyższą odpornością na korozję w roztworze wody i NaCl o stężeniu 0,9% oraz 3,5% NaCl wykazał się materiał ze stali 1.4923 po hartowaniu. Najniższą odporność na korozję posiadał materiał HS6-5-2c wytworzony w sposób klasyczny. Natomiast napoina z proszku HS6-5-2c wytworzona metodą LMD oraz stal 1.4923 ulepszona cieplnie wykazały się zróżnicowaną odpornością na korozję. Dla stężenia 0,9% NaCl wyższą odporność posiadał materiał napoiny, a przy stężeniu 3,5% NaCl wyższą odporność uzyskiwała stal 1.4923 po ulepszaniu cieplnym. Ocenę

odporności na korozję również uzupełniono badaniami powierzchni po próbach obejmującymi obserwacje mikroskopowe oraz pomiar chropowatości powierzchni.

Rozdział ósmy „Aplikacja praktyczna napawania fragmentu łopaty” zawiera opis propozycji modyfikacji procesu wytwarzania łopat turbin parowych. Modyfikacja polegała na wytworzeniu warstwy z proszku HS6-5-2c metodą LMD w obszarach o największym zużyciu erozyjnym łopat turbiny parowej. Warstwę wytworzono na łopacie w miejscu największego zużycia erozyjnego, przyjmując parametry procesu, które dobrano we wcześniejszych badaniach na próbkach. Nałożona warstwa powinna podlegać jeszcze obróbce mechanicznej, ale w rozprawie nie ma już przedstawionych efektów finalnych takiego procesu. Poza fotografią nie ma także żadnych innych badań wytworzonej warstwy.

W rozdziale dziewiątym „Podsumowanie i wnioski końcowe” syntetycznie przedstawiono uzyskane w rozprawie wyniki badań podkreślając pełne zrealizowanie założonego planu badań. Wskazano także najważniejsze oryginalne osiągnięcia rozprawy oraz sformułowano 17 wniosków końcowych.

II. Ocena merytoryczna rozprawy

2.1. Aktualność i znaczenie podjętej tematyki

W pracy podjęto tematykę mającą swoje źródła w praktyce przemysłowej i wynikającą z eksploatacji parowych turbin energetycznych. W trakcie pracy łopaty strefy niskoprężnej turbiny są narażone na złożone zużycie w wyniku erozji, kawitacji i korozji. Wskutek tego, po przekroczeniu zużycia granicznego, może dochodzić do zmniejszenia sprawności, niewyrównoważenia, a nawet awarii turbiny, co ma bardzo znaczące konsekwencje. Za szczególnie niebezpieczne uznawane jest w tym kontekście zużycie erozyjne. W celu podwyższenia odporności erozyjnej łopatek turbin parowych stosuje się kulowanie, a także hartuje się powierzchnię piór łopat. Zwiększyć trwałość można także poprzez zabezpieczenie krawędzi natarcia łopatki powłokami lub specjalnymi stellitowymi nakładkami ochronnymi. Jednakże w wyniku ciągłego zwiększania wymagań stawianych nowoczesnym materiałom konstrukcyjnym cały czas trwają prace nad tworzeniem nowych rozwiązań warstw powierzchniowych, które będą bardziej odporne na występujące w praktyce narażenia eksploatacyjne. Oceniana rozprawa doktorska wpisuje się w ten nurt prac naukowo-badawczych. Jest ona kontynuacją wcześniejszych badań, dotyczących wpływu wytworzonych poprzez napawanie laserowe warstw na trwałość elementów maszyn, realizowanych w Instytucie Pojazdów i Transportu Wydziału Inżynierii Mechanicznej Wojskowej Akademii Technicznej. Wyniki tych prac wskazują, że wytworzenie warstw ochronnych przyrostową metodą laserowego osadzania metalu (LMD) może być umożliwić kształtowanie warstw wierzchnich zwiększających odporność na erozję. Jednak potwierdzenie takiej możliwości wymaga przeprowadzenia dalszych prac badawczych.

W rozprawie doktorskiej podjęto zatem uzasadnioną, aktualną i istotną z punktu widzenia naukowo-badawczego i wdrożeniowego tematykę. Jej aspekt naukowy dotyczy doboru parametrów wytwarzania oraz określenia wybranych właściwości użytkowych systemu warstw (napoin) wykonanych przyrostową technologią laserową LMD z wykorzystaniem proszku stopowego HS6-5-2c na podłożu stali 1.4923 stosowanej do produkcji łopat turbin parowych. Badania w tym zakresie są niezbędne do ewentualnego przyszłego zastosowania napoiny na rzeczywistym obiekcie. Przyrostowe napawanie laserowe niesie ze sobą potencjalnie wiele problemów, takich jak: brak właściwego połączenia napoiny z podłożem, pęknięcia, zbyt duże wymieszanie napoiny z podłożem, zmiany zachodzące w materiale podłoża, porowatość uzyskanej warstwy, duże wartości naprężeń własnych. Uzasadnia to przyjęty cel naukowy, z którego wynika cel wskazywany jako

aplikacyjny, polegający na opracowaniu procesu wytwarzania napoin przyrostową technologią laserową LMD z proszku HS6-5-2c na podłożu stali 1.4923 w obszarze najbardziej narażonym na zużycie erozyjne krawędzi natarcia łopaty części niskoprężnej turbiny parowej.

2.2. Realizacja badań i uzyskane rezultaty

Praca ma w przeważającej części charakter eksperymentalny. W jej ramach przeprowadzono nakierowane na uzyskanie celów pracy szeroko zakrojone badania obejmujące charakterystykę napoin wytworzonych przyrostową technologią laserową na stali 1.4923 oraz ich właściwości użytkowe. Badania napoin poprzedzono badaniami właściwości stali 1.4923. Obejmowały one: badania mikrostruktury, badania twardości, badania składu chemicznego i składu fazowego oraz określenie spawalności stali 1.4923. Występuje tu drobna niezgodność z planem badań znajdującym się na str. 47 rozprawy. W planie badań nie ujęto określenia spawalności.

Badania właściwości napoin poprzedzono doбором parametrów przyrostowego wytwarzania technologią LMD napoin z proszku HS6-5-2c. Na początku dobrano wartości dziesięciu parametrów stałych procesu. Nie sprecyzowano na jakiej podstawie określono wartości parametrów stałych, można domniemywać, że to efekt badań wstępnych, które nie zostały w pracy opisane. Wytypowano także trzy parametry zmienne/sterowalne, które zmieniano konfigurując warianty obróbkowe w celu doboru, jak to określono na str. 50, „optymalnych parametrów wytwarzania warstw”. Wskazanie na dobór optymalnych parametrów pojawia się jeszcze kilkakrotnie w rozdziałach piątym oraz siódmym. Do pełnej jasności brakuje wskazania, jaką metodę optymalizacji zamierzano stosować. Przyjętą metodykę doboru parametrów procesu można, z pewnym przybliżeniem, uznać optymalizację metodą iteracyjną, ale cała procedura kończy się (tab. 7.27, str. 141) doбором „najbardziej odpowiednich parametrów wytwarzania”. To określenie jest bliższe rzeczywistości wydaje się, że wybrano wariant najlepszy z przebadanych. Do określenia tych parametrów jako optymalne brakuje bardziej sformalizowanej procedury optymalizacyjnej.

Po ustaleniu najkorzystniejszych wartości trzech parametrów sterowalnych dobrano jeszcze wartości kolejnych parametrów procesu: stopnia zachodzenia kolejnych ściegów na poprzedni, liczby niezbędnych warstw do otrzymania zakładanej grubości warstwy technologicznej, kąta obrotu kolejnych warstw oraz temperatury podłoża. Na tym zakończono dobór parametrów procesu, a następnie przeprowadzono badania: składu fazowego, naprężeń własnych, oraz badania nieniszczące. Po stwierdzeniu poprawności wykonania napoin przeprowadzono badania właściwości użytkowych materiału podstawowego, a następnie próbek z napoiną z proszku HS6-5-2c wykonaną metoda LMD. Pracę zamknięto wykonaniem napoiny na najbardziej narażonym na zużycie erozyjne fragmencie łopaty turbiny parowej.

Analizując zrealizowane badania można stwierdzić, że w pracy założono i zrealizowano rozbudowany plan badań. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem nowoczesnej aparatury, bogato dokumentując otrzymane wyniki. Generalnie opis metodyki badań jest precyzyjny. Wydaje się jednak, że określenie obserwacji na mikroskopie optycznym jako ocenę topografii pomija jej ważne aspekty (np. chropowatość powierzchni). W ramach rozprawy realizowane były jednak także badania chropowatości powierzchni. Wykonywano je oceniając zużycie erozyjne oraz korozyjne. W obu przypadkach do pomiarów chropowatości powierzchni użyto różnych profilometrów.

Prezentacja wyników badań jest czytelna i obszerna. Objętościowo nieco więcej (60 stron) zajmuje prezentacja wyników badań warstwy wierzchniej. Prezentacja wyników badań właściwości użytkowych zajmuje 50 stron.

Przeprowadzone badania doprowadziły do następujących oryginalnych osiągnięć rozprawy, do których zaliczyć można:

- dobór parametrów wytwarzania przyrostową technologią laserową LMD napoin proszku HS6-5-2c na podłożu stali 1.4923,
- porównanie właściwości użytkowych (wytrzymałości na rozciąganie, wytrzymałości na zginanie, uderności, odporności erozyjnej i odporności korozyjnej) stali 1.4923 z napoiną z proszku HS6-5-2c z właściwościami użytkowymi stali 1.4923 w stanie po hartowaniu i niskim odpuszczaniu oraz stali 1.4923 po ulepszaniu cieplnym,
- opracowanie modyfikacji wykonania łopaty turbiny parowej tak, aby wytwarzana łopata miała na krawędzi natarcia w obszarze najbardziej narażonym na zużycie erozyjne warstwę wierzchnią z proszku HS6-5-2c wykonaną technologią laserową LMD.

Analiza efektów uzyskanych badań pozwala stwierdzić, że w pracy podjęto i rozwiązano oryginalny problem naukowy związany z doбором parametrów procesu wytwarzania oraz określeniem wybranych właściwości użytkowych warstw (napoin) wykonanych technologią laserową Laser Metal Deposition (LMD) z wykorzystaniem proszku stopowego HS6-5-2c na podłożu stali 1.4923 stosowanej do produkcji łopat turbin parowych. Autor rozprawy potwierdził także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Zakres i poziom naukowy spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Tematyka rozprawy zawiera się w ramach dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. Recenzowana praca może być zatem podstawą nadania stopnia naukowego doktora, oczywiście pod warunkiem pozytywnego wyniku jej obrony.

2.3. Strona edytorska i redakcyjna pracy

Generalnie praca napisana jest poprawnym i zrozumiałym językiem. Występują w niej nieliczne usterki o charakterze edytorskim, stylistycznym lub redakcyjnym. Przykładowo:

- str. 9 „Wiele wyrobów lub elementów maszyn eksploatowane są w podwyższonych temperaturach...”.
- str. 10 „Potencjał przyrostowych techniki wytwarzania jest duży”.
- str. 31 „Zastosowanie kulek ceramicznych uzasadnione jest wysokim wykończeniem obrabianej powierzchni oraz niskim poziomem osadzania narzucanych mikrokulek.” – to zdanie to najprawdopodobniej efekt zbyt dosłownego tłumaczenia.
- str. 39 „Również w trakcie udziału realizacji Autora w pracach badawczych...”.
- str. 40 „...a nawet w przypadku wystąpienia pęknięcia i oderwania fragmentu łopaty może doprowadzić do uszkodzenia całej turbiny gdy ulegnie.”.
- str. 43 „Wytworzenie warstw ochronnych metodą LMD (laserowe osadzania metalu) może być procesem produkcyjnym do osiągnięcia wzrostu odporności na erozję.”.
- str. 81 „5.2.5. Metodyka badanie odporności na korozję”.
- str. 197 „Uzyskane wynika badań...”.
- str. 206 „...nakładania się kojonych ściegów...”.

Oczywiście w przypadku recenzowanej rozprawy wskazywane usterki nie mają negatywnego wpływu na zrozumienie jej treści. Układ pracy generalnie jest poprawny, tylko w rozdziałach 2 i 3 na początku pojawia się tzw. „tekst wiszący”. Cytowana w rozprawie literatura jest aktualna, zdecydowana większość przywoływanych pozycji jest wydana po roku 2000. Pozycje literaturowe są zamieszczone w spisie w kolejności cytowania. Przy wskazywanych stronach internetowych brakuje daty dostępu. Z drobniejszych usterek redakcyjnych można jeszcze zwrócić uwagę na brak jednostek wielkości zawartych w wykazie stosowanych skrótów i oznaczeń, część opisów w języku angielskim na rys. 3.3 oraz 3.5, zakończenie rozdziału 4 rysunkiem.

2.4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Każda praca naukowa nasuwa pewne pytania i wątpliwości, jak również stanowi punkt wyjścia do dyskusji i wyznaczania kierunków dalszych badań. Mam w tym kontekście sformułowane poniżej uwagi do recenzowanej rozprawy.

1. Dobór materiału podstawowego jest zrozumiały. Jest to materiał z którego wykonywane są łopaty turbin. Dobór metody wykonywania napoin jest poprzedzony opisem analizą (uproszczoną) 12 metod wytwarzania przyrostowego. Natomiast w przypadku wyboru proszku do wytworzenia napoiny w podrozdziale 7.1.1 stwierdzono, że do badań wytypowano proszek HS6-5-2c wskazując na jego skład chemiczny i gęstość oraz bardzo dobrą odporność na erozję (w ostatnim przypadku jest to skrót myślowy – sam proszek nie ma bardzo dobrej odporności na erozję). Czy rozważano/badano inne proszki? Oprócz wskazywanych cech pozytywnych wytypowany proszek charakteryzuje się mniejszą odpornością na korozję od Stellitu Co-6, który ma zastąpić.

2. Na rys. 2.5 (str. 18) zamieszczono informację dotyczącą liczby publikacji w okresie 2005-2018 związanych z wytwarzaniem przyrostowym. Praca została ukończona w roku 2024, zatem można było przywołać bardziej aktualne informacje w tym zakresie.

3. Na str. 22 wskazując zalety metody LMD stwierdzono, że charakteryzuje się ona bardzo małą strefą wpływu ciepła oraz bardzo dużą dokładnością. Tego typu stwierdzenia warto uzupełniać danymi liczbowymi, wtedy informacja jest precyzyjniejsza. Szczególnie istotne byłoby wskazanie jaką dokładność można uzyskać przy wytwarzaniu i naprawach.

4. Na str. 45 znajduje się stwierdzenie „uzyskanie wysokich naprężeń wewnętrznych”. Zapewne chodzi tu o naprężenia własne.

5. Dobierając najlepsze parametry procesu wytwarzania oceniano także istotność wpływu przyjętych parametrów sterowalnych na wymiary geometryczne (szerokość i wysokość) napoin. Dokonywano w tym zakresie oceny na podstawie zmierzonych wartości szerokości i wysokości napoin oraz wykresów. Można było w tym zakresie wykorzystać bardziej sformalizowane metody oceny istotności wpływu bazujące na testach statystycznych (np. statystykę F Fishera-Snedecora). To pozwoliłoby uniknąć dyskusyjnych opinii dotyczących istotności wpływu. Na str. 109 stwierdzono że „wydatek proszku (rys. 7.14) w sposób istotny wpływa na wysokość napoiny, a w minimalnym stopniu na szerokość napoiny”. Przesłankami do tego stwierdzenia są dane liczbowe zawarte w tabeli 7.8. Ich analiza, przy uwzględnieniu zakresu zmienności, wskazuje, że zmiana wysokości napoiny występuje tylko przy zwiększeniu ilości podawanego proszku z 3,6 do 5,1 g/min (warianty 12 oraz 13). Następnie mimo zwiększania ilości podawanego proszku, przy uwzględnieniu podanych zakresów zmienności, wysokość napoiny nie zmienia się w sposób istotny.

6. Na str. 105, przy prezentacji wyników analizy kształtu i wymiarów napoin, stwierdzono, „że większość z wytworzonych napoin było wykonane poprawnie”. Rozważano siedemnaście wariantów, interesująca byłaby informacja ile konkretnie napoin było wykonanych poprawnie.

7. W tabeli 7.27 (str. 141), przy prezentacji najkorzystniejszych parametrów wytwarzania napoin, wskazano, że temperatura podłoża powinna wynosić 300°C. Natomiast na str. 96 na

podstawie wzoru 6.2 wyliczono, że przed spawaniem/napawaniem stal 1.4923 (materiał podłoża) powinno się podgrzać do temperatury z zakresu $T = 560 - 620^{\circ}\text{C}$. Skąd taka różnica?

8. W rozprawie zawarto bardzo szeroki zakres badań. Jednak trochę brakuje w niej interpretacji i analizy otrzymanych wyników. W szczególności dotyczy to badań właściwości użytkowych. Przebadane zostały właściwości wytrzymałościowe, odporność na zużycie erozyjne oraz odporność na korozję. Wytworzenie napoiny na stali poprawia niektóre właściwości (w szczególności odporność na erozję), niektóre pogarsza (wytrzymałość na zginanie), a co do niektórych (odporność na korozję) wyniki nie są jednoznaczne. Powstaje pytanie, jakie to ma konsekwencje dla pracy w warunkach eksploatacyjnych rzeczywistego elementu? Otwartą, nie badaną w pracy, kwestią jest wytrzymałość zmęczeniowa. Ciekawe byłyby także badania odporności erozyjnej po chociażby krótkotrwałym oddziaływaniu czynnika korozyjnego.

9. W rozdziale ósmym dotyczącym aplikacji praktycznej procesu napawania naniesiono napoinę na fragment łopaty parowej. Nie przeprowadzono jednak szerzej zakrojonych badań wytworzonej warstwy, ograniczając się tylko do fotografii łopaty i schematu pokazującego obszar naniesionej warstwy. Dlaczego nie przeprowadzono badań napoiny uwidaczniających przekrój wykonanej warstwy albo chociażby badań nieniszczących, tak jak realizowano to na płaskich próbkach? Takie badania byłyby bardzo istotne z punktu widzenia celu aplikacyjnego pracy. Wyniki uzyskanie w wyniku badań próbek nie zawsze potwierdzają się w przypadku rzeczywistych elementów.

10. We wniosku na str. 205 stwierdzono, że „Zgromadzone wyniki badań skłaniają do stwierdzenia, że uzyskane warstwy wierzchnie (napoiny) z proszku HS6-5-2c wytworzone przyrostową technologią laserową LMD na podłożu stali 1.4923 wpłyną na poprawę trwałości łopat turbin parowych, a tym samym przyczynią się do poprawy bezpieczeństwa energetycznego i konkurencyjności gospodarki”. Trwałość łopat parowych nie była badana w rozprawie, zatem brak jest przesłanek do takiego stwierdzenia.

Wskazane uwagi o charakterze dyskusyjnym i krytycznym, chociaż obniżają nieco wartość pracy, to nie wpływają na ostateczną, pozytywną jej ocenę.

III. Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy doktorskiej autorstwa mgr inż. Wojciecha Chrzanowskiego podjęto interesujący i aktualny naukowo temat ukierunkowany na dobór parametrów wytwarzania oraz określenie wybranych właściwości użytkowych elementów z napoینą wykonanych technologią laserową Laser Metal Deposition (LMD) z wykorzystaniem proszku stopowego HS6-5-2c na podłożu stali 1.4923 stosowanej do produkcji łopat turbin parowych. Autor rozprawy rozwiązał oryginalny problem naukowy, wykazał się także umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawowe stawiane Kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wniosuję zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

