

Kraków, 4 marca 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

(wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna,
Politechniki Warszawskiej z dnia 10.01.2024)

pt. „**Development of a repair of the selected gas turbine component
by the use of robotic multi-layer wire arc cladding proces**”

Autor rozprawy: mgr inż. Piotr Steckowicz

Promotor: prof. dr hab. inż. Paweł Pyrzanowski

Dyscyplina: Inżynieria Mechaniczna

Politechnika Warszawska

Informacja wstępna

Mimo występującej światowej tendencji do zastępowania paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii i przejścia na energetykę bezemisyjną, turbiny gazowe będą jeszcze długi czas wspierać człowieka w pozyskiwaniu energii elektrycznej oraz w transporcie lotniczym. Turbina gazowa to rodzaj silnika spalinowego, który przekształca energię zawartą w gazie spalinowym na energię mechaniczną w postaci obrotu wału. Jest to jeden z najczęściej stosowanych rodzajów silników w przemyśle, energetyce i transporcie. Z uwagi na dużą elastyczność pracy w porównaniu z konwencjonalnymi blokami energetycznymi na paliwa stałe, nadają się one szczególnie dobrze do współpracy z odnawialnymi źródłami energii takimi jak farmy fotowoltaiczne i farmy wiatrowe. Zmniejszenie podaży energii wyprodukowanej przez źródła odnawialne może być dość łatwo i stosunkowo szybko uzupełnione przez energię elektryczną pozyskaną za pomocą turbin gazowych. Mimo, że pierwsze praktyczne wykorzystanie turbiny gazowej nastąpiło w latach 40. XX wieku, ich ciągły rozwój konstrukcyjny i materiałowy sprawia, że ich sprawność ciągle wzrasta. Materiały, które są wykorzystywane w części gorącej turbiny gazowej pracują w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych, wysoka temperatura, naprężenia eksploatacyjne i atmosfera gazowa sprzyjają ich degradacji w wyniku wysokotemperaturowego utleniania. Z uwagi na to, że zastosowane materiały konstrukcyjne to zwykle stale wysokostopowe lub nadstopy na bazie niklu lub kobaltu są bardzo drogie, stąd regeneracja zużytych elementów a nie wymiana ich na nowe jest szczególnie istotna.

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Piotra Steckowicza napisana została w języku angielskim, dobrze wpisuje się w zagadnienie regeneracji elementów części gorącej turbiny gazowej, a nawet idzie dalej, bo ukierunkowana jest na automatyzację tego procesu, co pozwala na znaczne skrócenie czasu naprawy a zatem obniża jej faktyczne koszty. Wykorzystanie do regeneracji elementów konstrukcyjnych turbiny metod przyrostowych to bardzo obiecujący kierunek w procesie naprawczym. Metody przyrostowe, znane również jako metody addytywne, są technologiami produkcji, które polegają na tworzeniu obiektów przez dodawanie materiału warstwa po warstwie. Metody przyrostowe są coraz bardziej popularne ze względu na ich elastyczność, możliwość produkcji niestandardowych części, szybkość wytwarzania prototypów oraz minimalizację marnotrawstwa

zazwyczaj drogiego materiału. Są szeroko stosowane w różnych branżach, od produkcji lotniczej po medycynę i architekturę. Zastosowanie metod przyrostowych w procesie regeneracji bazujących na spawaniu łukowym metodami MIG/MAG jak również ich automatyzacja pozwala na uzyskanie większego stopnia precyzji prowadzonych napraw, zmniejszenia występujących niezgodności a przez to podniesienia poziomu jakości prowadzonych napraw, co przekłada się na dłuższą niezawodną pracę regenerowanych elementów.

Ocena merytoryczna i metodologiczna rozprawy

Cel i zakres badań

Celem recenzowanej rozprawy było zastosowanie innowacyjnego procesu naprawy elementu przepony turbiny gazowej, bazującego na addytywnym nakładaniu warstw napoiny metodami napawania łukowego MIG/MAG jak również automatyzacji tego procesu w taki sposób, aby proces regeneracji był niezawodny a regenerowany element posiadał dłuższą żywotność. Według Autora zaproponowany proces naprawy zapewnia znaczną oszczędność czasu i kosztów w porównaniu do tradycyjnych metod druku. Zastosowanie wielowarstwowej napoiny wykonanej ze stali austenitycznej 308 LSi jako materiału dodatkowego na elemencie regenerowanej przepony turbiny gazowej, wykonanego ze stopu odlewniczego Ni-Resist wykazało w pełni przydatność zautomatyzowanego procesu napawania w procesie naprawczym.

Zakres przeprowadzonych badań w uproszczeniu obejmował eksperymenty napawania próbek testowych zautomatyzowanym procesem napawania łukowego (CMT, MIG/MAG) materiałami dodatkowymi z nadstopu na bazie niklu Hastelloy-X, na bazie kobaltu HS188 (Haynes) oraz stali austenitycznej 308LSi. Walidacja poprawności wykonanych napoin opierała się na zastosowaniu metod nieniszczących (VT i PT) i niszczących (metalografia, LM) do detekcji niezgodności spawalniczych. Zastosowane metody nieniszczące pozwalają na wykrywanie niezgodności spawalniczych ale tylko powierzchniowych, zarówno w elemencie po napawaniu addytywnym jak również po jego obróbce ubytkowej. Zastosowanie nieniszczących metod badań objętościowych (UT, RT) choć znacznie trudniejszych w samym ich przeprowadzeniu oraz interpretacji wskazań pozwoliłoby na detekcję możliwych niezgodności występujących w objętości materiału napoiny. Z tego co przedstawił Autor brak jest metody lub procedury pozwalającej z dużym prawdopodobieństwem na dokonanie takiej oceny, a odbiór efektu regeneracji opiera się raczej na obserwacji wizualnej (VT, PT) finalnie wykonanego elementu.

Ocena przeglądu literaturowego

Część literaturowa obejmuje 24 strony, zawiera 10 rysunków. Napisana jest w sposób przejrzysty i merytorycznie poprawny, świadczący o dobrym rozeznaniu Autora w obszarze poruszonych zagadnień. Przytoczenie 74 pozycji literaturowych jako wsparcie w omawianiu zagadnień, świadczy o poprawnym rozeznaniu literaturowym poczynionym w obszarze merytorycznie powiązanych z realizowaną pracą badawczą. Autor dość szeroko opisuje metody spawania (CMT, GMAW, PAW, GTAW) zwracając szczególną uwagę na przebieg jak i na istotne parametry procesu, jak również możliwość ich zastosowania w łukowych metodach przyrostowych (WAAM). Porównanie wyników badań innych autorów (Rys.1.10) w dużym stopniu przyczyniło się do bardziej dogłębnej analizy wyników własnych badań przez Autora, a tym samym pozwoliło na uniknięcie istotnych błędów w interpretacji wyników. Czytając napisany przez Autora wstęp literaturowy nie stwierdziłem istotnych

błędów natury merytorycznej, jedynie mam kilka uwag związanych z koniecznością doprecyzowania pewnych stwierdzeń oraz uwag natury redakcyjnej.

Uwagi formalne, krytyczne i dyskusyjne

Strona 13, wiersz 31

Autor we wstępie do pracy wymienia obecnie powszechnie stosowane metody wytwarzania przyrostowego elementów metalicznych (druku 3D) takie jak SLS, SLM oraz DMLS podając ich akronimy bez rozwinięcia pełnej nazwy, co może powodować pewne niejasności w zrozumieniu tych zagadnień.

Czy Autor mógłby porównać wymienione wcześniej metody przyrostowe druku 3D z przyrostowymi metodami łukowymi?

Strona 25, wiersz 4

The production of blades operating (...). Autor krótko charakteryzuje tendencje rozwojowe wytwarzania łopatek turbiny, zwracając uwagę na sposób wytwarzania oraz ich budowę krystaliczną. Autor stwierdza, że eliminacja granic ziaren poprzez wytwarzanie łopatek monokrystalicznych zapewnia możliwość ich pracy przy wysokich temperaturach. Wspomina o nanoszonych na powierzchni łopatek warstwach TBC jako barierach cieplnych, co w powiązaniu z wewnętrznym układem chłodzenia zapewnia im możliwość pracy w trudnych warunkach. Jest to wszystko prawda, ale jest to warunek nie wystarczający do takich zastosowań. Kluczem tutaj jest odpowiednia mikrostruktura, którą uzyskuje się przez odpowiedni skład chemiczny stopu, technologie wytwarzania stopu oraz jego obróbkę cieplną. Wytworzona mikrostruktura powinna być stabilna czyli nie ulegać degradacji w czasie eksploatacji. Należy przy tym pamiętać, że własności mechaniczne materiału są determinowane jego strukturą, tak więc degradacja mikrostruktury zmienia w niekorzystnym kierunku te własności i wymusza po określonym czasie pracy wymianę tych elementów na nowe.

Czy Autor może podać przykład stopu z którego wykonuje się łopatki wirujące gorącej części turbiny oraz ich mikrostrukturę?

Strona 27, wiersz 3

For industrial production scale (...). Autor wskazuje na duży aspekt aplikacyjny elementów konstrukcyjnych wykonanych metodami przyrostowymi. Tak, jest to prawda, ich rozwój obecnie jest bardzo intensywny, lecz należy też pamiętać o ich wadach takich jak porowatość, pustki, tworzenie się faz nierównowagowych oraz inne, takie jak w przypadku złączy spawanych. Oczywiście stosuje się różnego rodzaju dogęszczania tych elementów przez HIP-owanie ale ich zastosowanie na wysokotemperaturowe wirujące elementy konstrukcyjne jest raczej ograniczone.

Czy Autor może w sposób krótki wymienić rodzaj niezgodności które mogą wystąpić w przypadku zastosowania przyrostowych metod łukowych MIG/MAG (WAAM)?

Ocena części badawczej

Ocena uzyskanych wyników i przeprowadzonej dyskusji

Część eksperymentalna obejmuje 75 stron, zawiera 30 rysunków i 9 tabel. W pierwszej części Autor przedstawia w sposób szczegółowy wyniki zastosowania napawania metodą GMAW CMT nadstopów Hastelloy-X (nadstop na bazie Ni) oraz HS188 (nadstop na bazie Co) na podkładki o różnym kształcie. Weryfikację poprawności procesu napawania Autor przeprowadził na podstawie badań nieniszczących i niszczących, wskazując na wady i zalety tej metody napawania. Uzyskane wyniki badań próbek napoin przeprowadzonych metodami nieniszczącymi (VT, PT) nie pozwoliły jednoznacznie się

wypowiedzieć na temat jakości uzyskanych napoin. Zastosowanie tylko metod badań powierzchniowych nie pozwoliło Autorowi na obserwacje możliwych niezgodności spawalniczych wewnątrz objętości materiału próbek. Te badania należałoby poszerzyć o badania strukturalne (niszczące) uzyskanych napoin ale poprzedzone nieniszczącymi metodami objętościowymi (UT, RT). Metoda ta z wykorzystaniem wyżej wymienionych materiałów dodatkowych nie została zakwalifikowana przez Autora jako metoda naprawcza do regeneracji elementów turbiny gazowej. Z uwagi na to, że materiał z którego wykonywane są przepony czyli elementy stacjonarne turbiny gazowej to stop odlewniczy Fe-Ni (Ni-Resist) do napawania naprawczego zastosowano materiały dodatkowe takie jak Ni-rod 55, Ni-rod 44 oraz 308 LSi, wykorzystując metodę zautomatyzowanego procesu napawania metodą MAG w trybie Puls. Jako najbardziej obiecującą do zastosowania w napawaniu naprawczym okazała się powyższa metoda z materiałem dodatkowym 308 LSi. Zostało to potwierdzone badaniami nieniszczącymi (VT, PT) oraz niszczącymi (metalografia) napoin, zregenerowanej tą metodą przepony turbiny gazowej po finalnej obróbce ubytkowej.

Uwagi formalne, krytyczne i dyskusyjne

Strona 46, wiersz 11

Imperfections: A weld defect is any flaw (...). Autor wymienia rodzaje niezgodności spawalniczych jak również sugeruje możliwość ich wykrycia przy wykorzystaniu metod nieniszczących takich jak PT i VT. Metody te dają możliwość ujawnienia wyłącznie niezgodności wychodzących na powierzchnie. Do niezgodności wewnętrznych należy zastosować metody objętościowe takie jak UT oraz RT co nie jest łatwym metodycznie i interpretacyjnie zadaniem.

Strona 46, wiersz 25

Porosity: The weld surface should (...). Autor stwierdza, że do wykrycia niezgodności spawalniczych takich jak pustki zastosowanie metod niszczących i nieniszczących (VT i PT) jest zasadne i daje możliwość ich detekcji, co nie jest poprawne z uwagi na miejsce ich zalegania. Zastosowanie metod niszczących (zgląd metalograficzny) ma sens wtedy jeżeli znamy miejsce występowania niezgodności, określone dokładnie metodami objętościowymi. Zastosowanie metod objętościowych daje tutaj szanse ich detekcji.

Strona 47, wiersz 4

Strength: Most welds need to (...). Zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości złącza nie jest do zrealizowania wyłącznie odpowiednim doбором rodzaju materiału dodatkowego, ale przez zastosowanie odpowiedniej metody spawania, kolejności nakładania ściągów, zastosowanie odpowiedniej temperatury międzyścięgowej lub/oraz obróbki cieplnej po spawaniu. Zazwyczaj wszystko to zawiera procedura spawania WPS.

Strona 48, wiersz 4

Porosity (Surface): o Size: 0.25T or 0.03-in whichever is less (...). Autor nie wyjaśnia co oznacza tutaj T jak również powinny być zastosowane jednostki długości zgodne z układem jednostek SI. Stwierdzenie to ma również zastosowanie do kolejnych wierszy tego akapitu.

Strona 51, wiersz 3

Heat Treatment Program (...). Autor powinien używać °C a nie °F przy opisie schematu obróbki cieplnej wyżarzania odprężającego.

Strona 52, wiersz 6

Synergic line 19/09/0777 with (...). **Jakie przesłanki zadecydowały o wyborze takich parametrów napawania przedstawionych w wierszu 20 Tabela 3.1 a nie innych?**

Strona 57

Na rysunkach 3.9 i 3.10 Autor przedstawia parametry procesu napawania testowego stopu HS188 na próbkach o różnej geometrii. Zamieszcza też, jako przykład wygląd (obrazy) próbek testowych z wykonaną napoiną wielowarstwową, obrazy próbek są identyczne z obrazami przedstawionymi na rysunkach 3.7 i 3.8 ale po napawaniu stopem Hastelloy-X.

Czy nie zaszła tutaj jakaś pomyłka i przypadkowo nie zamieszczono tych samych zdjęć?

Strona 58, wiersz 4

The NDT criteria are as follows: (...). Moja uwaga dotyczy niezastosowania podstawowych jednostek z układu SI w opisie wymiarów dopuszczalnych niezgodności.

Strona 59, wiersz 2

Penetrant and Visual testing show (...). Autor przedstawia tutaj wyniki badań PT dla próbki z warstwową napoiną, jak i również po ubytkowej obróbce mechanicznej przeznaczonej do statycznej próby rozciągania. Autor stwierdza na podstawie badań VT i PT brak niezgodności powierzchniowych, jednak niezgodności wewnętrzne w próbce nie są tutaj wykrywane.

Jakie problemy napotkał Autor w interpretacji wyników badań RT, które nie zostały przedstawione w pracy?

Strona 61, Tabela 3.3 – 3.6

W opisie kolumny „Data from vendor” wstawiono jako materiał odniesienia stop Haynes a dane dotyczą wyników próby rozciągania dla napoiny ze stopu Hastelloy-X (Tabela 3.3 i 3.5). **Czy to tylko pomyłka redakcyjna? Jak można wytłumaczyć tak istotną różnicę w parametrach wytrzymałościowych R_e , R_m oraz plastycznych A_4 dla próbki oznaczonej jako P2-1 Hast-X (Tabela 3.3)? Jak Autor definiuje i określa wielkość „Reduction of Area”? Jeżeli jest to procentowa zmiana przekroju to dlaczego dla próbki, która wykazała największą wartość wydłużenia A_4 wartość tego parametru jest najmniejsza?** Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku danych zamieszczonych w Tabeli 3.4. **Czy znane są Autorowi wartości wydłużenia równomiernego A_r dla poszczególnych próbek, znając te wartości można by było dość prosto wytłumaczyć zmiany w wartościach przewężenia?**

Strona 68, Tabela 4.1

Tensile Test results for (...). Błędna pierwsza część opisu tabeli. Tabela zawiera informację o składzie chemicznym stopów w gatunku Ni-Resist, Autor jednak nie podał istotnej informacji, że podstawowym pierwiastkiem stopowym jest Fe.

Strona 69, Rysunek 4.4

Oxidation curves for 304SS, 410SS, Ni-Resist (...). **W jakich jednostkach podana jest grubość zgorzeliny?** Temperatura powinna być podana w °C. **Czy te wykresy są sporządzone na podstawie wyników pomiarów Autora czy na podstawie danych literaturowych?** Jeżeli na podstawie danych literaturowych to powinien być dodany odnośnik do literatury.

Strona 70, Tabela 4.4

W tabeli składu chemicznego dla stali 305 LSi nie podano zawartości głównego pierwiastka stopowego jakim jest Fe. Koncentrację pierwiastków podajemy zazwyczaj jako wt %.

Strona 76, wiersz 8

The most promising and acceptable (...). Autor stwierdza, że najbardziej obiecującym materiałem dodatkowym jest stal nierdzewna 308 LSi z uwagi na jej antykorozyjne własności. **Co nadaje tej stali takie wysokie własności antykorozyjne? Jednak jak stwierdza Autor możliwym jest występowanie niezgodności wewnętrznych nie wychodzących na powierzchnię, jakie niezgodności Autor ma na myśli? Czy występowanie niezgodności wewnętrznych nie obniża własności użytkowych tak naprawianego elementu konstrukcyjnego? Jakie metody badań nieniszczących są obecnie stosowane lub powinny być stosowane do wykrywania niezgodności powstałych podczas napawania wielościęgowego odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych poddawanych regeneracji?**

Strona 78, wiersz 20

The suggested robotic additive process (hybrid repair) is (...). Autor sugeruje regenerację przepony 9F/7F wykonanej ze stopu odlewniczego Fe-Ni poprzez napawanie stali austenitycznej, bardziej odpornej na utlenianie. **W jakich warunkach środowiskowych, to znaczy przy jakiej temperaturze i w jakiej atmosferze pracuje ten element? Czy na proces niszczenia takiego elementu prócz utleniania nie wpływa również zużycie cierne?**

Strona 80, wiersz 13

The part temperature during cladding shall not go (...). **Jaka jest przyczyna występowania pęknięć gorących w spoinie i czy utrzymywanie odpowiedniego poziomu temperatury międzyścięgowej może temu zaradzić?**

Strona 92, Rysunek 5.8.d

W wyniku badań metalograficznych zaobserwowano występujące niezgodności napoiny występujące najprawdopodobniej na pierwszym ścięgu wielowarstwowej napoiny. **Czy Autor próbował analizować i ustalić rodzaj występujących tu niezgodności i czy mogą one mieć wpływ na żywotność regenerowanego elementu konstrukcyjnego?**

Strona 93, wiersz 2

(...) diaphragm cast of a nickel (...). **Tutaj raczej chodzi o stop odlewniczy Fe-Ni a nie o Ni?**

Strona 93, wiersz 24

Jak stwierdza Autor, połączenie procesu spawania metodą MAG z precyzyjnie zaprogramowanym ruchem robota spawalniczego jak również z dobranym odpowiednio cyklem zasilania łuku spawalniczego pokazuje, co jest tutaj bardzo istotne, że proces naprawy addytywnej metodą łukową jest możliwy do wykonania na elementach turbin gazowych. Ponadto ten proces naprawy skraca „czas naprawy” membrany (o ponad 50%) i zapewnia unikalne wysokie parametry użytkowe modyfikowanych części. **Czy Autor może wyjaśnić jakie konkurencyjne metody naprawcze statycznych elementów turbin gazowych stosowane są obecnie? Czy tą metodę można również zastosować do regeneracji elementów wirujących turbiny gazowej?**

Wniosek końcowy

W podsumowaniu należy stwierdzić, że Pan mgr inż. Piotr Steckowicz przedłożył bardzo wartościową pracę doktorską dotyczącą zastosowania łukowych metod przyrostowych do regeneracji wybranych elementów turbiny gazowej. Autor zrealizował postawione sobie cele badawcze, w szczególności poprzez odpowiedni dobór materiału dodatkowego do napawania oraz wybór metody zautomatyzowanego napawania łukowego. Istotnym było potwierdzenie eksperymentalne tego wyboru na rzeczywistym elemencie konstrukcyjnym, jakim było napawanie naprawcze przepony

turbiny gazowej. Dyskusja otrzymanych wyników została przeprowadzona na dobrym poziomie naukowym, co czyni tą pracę bardzo wiarygodną i z pewnością będzie w przyszłości podstawą do wielu zastosowań technologicznych. Aspekt aplikacyjny jest też mocno wsparty na dwóch patentach (USA, EU) z obszaru poruszanej tematyki a wymienionych przez Autora.

Mimo pewnych uwag natury redakcyjnej i merytorycznej, które w żaden sposób nie umniejszają poziomowi recenzowanej pracy, oceniam pracę autorstwa Pan mgr inż. Piotra Steckowicza pozytywnie.

Mając na względzie powyższe stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim na stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych z zakresu inżynierii mechanicznej, określone ustawą o stopniach i tytułach naukowych i **wnioskuje o dopuszczenie Pana mgr. inż. Piotra Steckowicza do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.**

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal dotted line. The signature is stylized and appears to be the name of the reviewer.