

Bydgoszcz, dnia 11 sierpień 2017r.

dr hab. inż. **Bogdan Ligaj**, prof. nadzw. UTP

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Automatykacji i Transportu
Zakład Mechatroniki i Maszyn Roboczych
ul. Prof. S. Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. **Marcina Chudzińskiego** na temat:

„Analiza własności strukturalnych i mechanicznych połączeń spawanych w obiektach wielkogabarytowych ze stali superdupleks”.

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną przygotowania recenzji stanowi uchwała Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy z dnia 13.06.2017 r. powołująca niżej podpisanego na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Chudzińskiego oraz formalne zlecenie podpisane przez Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP Bydgoszcz z dnia 23.06.2017 r.

2. Charakterystyka i ocena pracy

Rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Chudzińskiego jest jednotomowym zwartym opracowaniem podzielonym na: dziesięć rozdziałów, wykaz ważniejszych oznaczeń i definicji, spis tabel, spis rysunków, wykaz literatury oraz streszczenie w języku polskim i angielskim, o łącznej liczbie stron wynoszącej 126. W pracy zamieszczono 57 rysunków, 38 tabel i 13 zależności w postaci wzorów. Wykaz literatury obejmuje 163 pozycje podzielone na trzy grupy: I grupa – artykuły, książki, rozprawy, materiały konferencyjne (123 pozycje ułożone w kolejności alfabetycznej), II grupa – normy (28 pozycji), III grupa – katalogi (12 pozycji). Znacząc większości pozycji z I grupy to pozycje anglojęzyczne (107 pozycji). Liczba prac Doktoranta cytowanych w tekście wynosi 3 i są to prace współautorskie. Należy stwierdzić, iż Doktorant przeprowadził staranne studia literaturowe dotycząc podjętego problemu badawczego.

Pierwszym rozdziałem pracy jest wprowadzenie zawierające ogólne informacje o stalach dupleks oraz trudnościach w zakresie jej zastosowania na wielkogabarytowe konstrukcje inżynierskie.

W drugim rozdziale dysertacji przedstawiono rys historyczny rozwoju stali dupleks, z którego wynika ich podział na cztery generacje. Wskazano, że obecnie w warunkach przemysłowych stosowane są stale III i IV generacji. Dokonano ich podziału na grupy: niskostopowe stale dupleks, standardowe stale dupleks 22%Cr, standardowe stale dupleks 25%Cr, stale superdupleks oraz stale hyperdupleks, a następnie przedstawiono orientacyjne składy chemiczne wybranych gatunków stali. Istotnym elementem rozdziału jest omówienie

wpływu poszczególnych pierwiastków stopowych, tj. chrom, nikiel, molibden, azot, miedź, wolfram i mangan, na zmianę właściwości stali w zakresie: tworzenia struktury austenityczno-ferrytycznej oraz odporności na korozję. Omówiono układ równowagi fazowej Fe-Cr-Ni, na tle którego wskazano zachodzące przemiany fazowe podczas krystalizacji stopów. O wytrzymałości mechanicznej i odporności na korozję stali duplex decyduje głównie objętość względna fazy ferrytu i fazy austenitu, co przekłada się na mikrostrukturę. Autor wspomina także o możliwości występowania faz wtórnych powstałych na etapie przetwórstwa np. procesu spawania oraz wpływ dodatków stopowych na wydzielanie tych faz. Następnie Autor przedstawia etapy powstawania złącza spawanego stali duplex odnosząc się do możliwości wystąpienia w nim faz wtórnych szczegółowo je charakteryzując. W dalszej części rozdziału przedstawiono porównanie właściwości fizycznych i mechanicznych oraz odporności korozyjnej wybranych gatunków stali. Przedstawiono także korzyści płynące poprzez zastąpienie stali austenitycznej stalą duplex dotyczące redukcji masy i zmniejszenia kosztów materiału. Analiza wykazała, iż redukcja masy materiału większa niż 10% pozwala na obniżenie kosztów całej inwestycji.

Rozdział trzeci pracy poświęcono technologii spawania stali duplex. Autor wskazuje, że możliwość spawania stali duplex III i IV generacji jest związana z zapewnieniem pożądanej proporcji faz austenitu i ferrytu w strefie wpływu ciepła i spoinie oraz ograniczeniu wydzieleni wtórnych. Na kształtowanie mikrostruktury złącza wpływa skład chemiczny materiału rodzimego, skład chemiczny spoiwa oraz przebieg cyklu cieplnego. W dalszej części rozdziału omówiono wpływ szybkości chłodzenia na kształtowanie mikrostruktury złącza wskazując, że szybkością tą można sterować poprzez ilość wprowadzanego ciepła tj. energię liniową łuku oraz kontrolowanie temperatury międzyściekowej. Następnie przedstawiono metody spawania znajdujące zastosowanie przy wykonywaniu wielkogabarytowych konstrukcji inżynierskich: spawanie łukowe metodą otulona (proces 111), spawanie łukowe elektrodą nietopliwa w osłonie gazu obojętnego (proces 141), spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonach (proces 135/136), spawanie łukiem krytym drutem elektrodowym (proces 121).

W rozdziale 4 rozprawy doktorskiej przedstawiono zasady budowy zbiorników magazynowych jako przykładów obiektów wielkogabarytowych. Omówiono konstrukcje zbiorników oraz technologie ich wykonywania w warunkach budowy. Korzyści płynące z zastosowania stali duplex na płaszcz zbiornika wynikają z redukcji grubości stosowanych blach (ich masy) oraz zmniejszeniu masy spoiwa i czas spawania. W podsumowaniu rozdziału przedstawiono ocenę przydatności metod spawania stali superduplex w świetle następujących kryteriów: spawanie w warunkach pozawarsztatowych, spawanie w pozycjach przymusowych, stopień przemieszania spoiwa z materiałem, ogólna jakość spoin, ogólna podatność na powstawanie wad, wydajność stapienia, koszt materiału dodatkowego, gaz osłonowy.

Rozdział 5 jest podsumowaniem przeglądu literatury, w którym sformułowano pięć wniosków do badań własnych. Dotyczą one: składu fazowego złącza spawanego stali superduplex i postaci składników struktury jego stref, energii liniowej spawania – cyklu cieplnego spawania, metody spawania, budowy spoin oraz pozycji spawania. Na tym tle sformułowano dwie tezy, cztery cele oraz zakres pracy, które przedstawiono w rozdziale 6.

W rozdziale 7 Autor przedstawił obiekt, program i metodykę badań. Obiektem badań wykonano z blach superduplex SAF 2507 o grubości 8 mm stosując proces spawania: 136, 141 i 111. Zastosowano dwie pozycje spawania: naścienną PC oraz pionowej PF. Przedstawiono technologie wykonywania złączy spawanych, przebieg procesu spawania oraz metodę i wyniki badań nieniszczących, potwierdzających jakość wykonanych złączy. W zakresie badań właściwości mechanicznych złączy spawanych mieściła się: próba statycznego rozciągania realizowana w temperaturze pokojowej, badanie udarności w temperaturze -20°C

oraz +20°C, badania fraktograficzne na przełomach próbek udarnośćowych zniszczonych w temperaturze -20°C oraz +20°C, badanie twardości w przekroju poprzecznym złącza. Przeprowadzono także badania mikrostruktury złącza na mikroskopie metalograficznym NIKON MA100 oraz za pomocą programu komputerowego NIS Elements 3.0 AR, a także badania dyfrakcyjne rentgenowskie na dyfraktometrze DRON 1,5. Cykl badań złączy dopełniały badania odporności korozyjnej. Szczegółowe wyniki badań przedstawiono w rozdziale 8, natomiast w rozdziale 9 ich analizę. Analizie poddano wpływ energii liniowej łuku na mikrostrukturę złączy spawanych, właściwości mechaniczne i korozyjne złączy spawanych oraz porównanie czasów i wydajności spawania złączy przy użyciu różnych metod spawania. Pracę kończy rozdział zawierający podsumowanie i wnioski.

3. Ocena pracy

Stale duplex, wchodzi w skład grupy stali nierdzewnych, wykazują doskonałe właściwości mechaniczne oraz odporność na korozję dzięki właściwemu składowi chemicznemu i ferrytyczno-austenitycznej mikrostrukturze. Ich spawalność metalurgiczna związana jest z utrzymaniem pożądanej proporcji faz w strefie wpływu ciepła i spoinie oraz ograniczeniem wydzielenia wtórnych. Wytworzenie złączy spawanych o wymaganych właściwościach mechanicznych i wymaganej odporności korozyjnej związane jest z doбором odpowiedniej technologii spawania uwzględniającej: czynniki materiałowo-konstrukcyjne, czynniki ekonomiczne, a także warunki prowadzenia procesu. Realizacja procesu spawania wymaga przestrzegania reżimów technologicznych związanych m.in. z kontrolowaniem energii liniowej spawania wpływającej na szybkość chłodzenia złącza. Zastosowanie stali duplex na spawane wielkogabarytowe konstrukcje inżynierskie pozwala redukować masę poszczególnych elementów konstrukcyjnych, co przekłada się na obniżenie kosztów całej inwestycji. Uwzględniając pozawarsztatowe warunki wykonywania złączy oraz przymusowe pozycje spawania budowa tego typu obiektów jest bardzo trudna. Brak jest zwartych opracowań zawierających praktyczne wytyczne technologiczne w zakresie realizacji procesu spawania dotyczące wykonywania wielkogabarytowych konstrukcji inżynierskich, których przykładem są zbiorniki magazynowe.

W pracy zostały sformułowane dwie tezy badawcze. Pierwsza z nich zakłada, że „półautomatyczna metoda spawania stali superduplex – drutem proszkowym w osłonie gazu osłonowego jest odpowiednia i najbardziej wydajna do kompleksowego wykonania, w warunkach budowy, obiektu wielkogabarytowego typu płaszcz zbiornika magazynowego”. Natomiast druga teza dotyczy „istnienia ograniczonych zakresów energii liniowej spawania metodą 136 pozwalające na uzyskania struktur złączy spawanych stali superduplex SAF 2507 w warunkach budowy i pozycjach przymusowych PC i PF o własnościach mechanicznych spełniających kryteria zdefiniowane w normach związanych z budową i eksploatacją zbiorników magazynowych”. Na tle całej pracy należy uznać, iż wymienione wyżej tezy są słuszne. Cele rozprawy zostały sformułowane prawidłowo i znajdują odbicie w opracowanym zakresie dysertacji. Rozprawa jest pracą badawczą.

W części analitycznej (dotyczącej rozdziałów od 1 do 4) została zaprezentowana zagadnienia związane z charakterystyką stali duplex, technologią ich spawania oraz sposobem wykonywania zbiorników magazynowych. Omówiono szereg zagadnień szczegółowych istotnie wpływających na właściwości mechaniczne złączy spawanych oraz ich odporność korozyjną dotyczącą m.in. budowy mikrostruktury złącza i warunków jej powstawania podczas cyklu cieplnego spawania, dokonano krytycznej oceny metod spawania w zakresie przydatności do wykonywania płaszcz zbiornika. Część analityczną kończą wnioski stanowiące podstawę do sformułowania tezy, celów i zakresu rozprawy. Przegląd

literatury wykonano starannie pod względem merytorycznym i edytorskim. Stanowi on spójną całość z dalszą częścią rozprawy.

Szeroki program badań doświadczalnych wskazuje na duży wkład pracy Doktoranta podczas realizacji rozprawy doktorskiej. Wykazał się On umiejętnością realizacji eksperymentu oraz wszechstronną analizą uzyskanych wyników. Drobne uchybienia z tego obszaru przedstawiono w punkcie 4 recenzji pt.: „Uwagi sformułowane w ramach krytycznej oceny pracy”.

Do największych osiągnięć rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Marcina Chudzińskiego należą:

- a) opracowanie zaleceń dotyczących realizacji procesu spawania stali superdupleks w warunkach pozawarsztatowych metodą 136 z uwzględnieniem wpływu energii liniowej spawania i cyklu cieplnego,
- b) przeprowadzenie szerokiego programu badań własnych, pozwalającego na potwierdzenie postawionych tez rozprawy, obejmującego badania: mikrostruktur złączy spawanych, ich właściwości mechanicznych i odporności korozyjnej,
- c) dobrze przygotowany od strony metodycznej eksperyment potwierdzający dużą wiedzę Doktoranta na temat procesu spawania stali, w tym stali dupleks,
- d) merytoryczny przegląd literatury pozwalający na formułowanie wniosków wykorzystanych do opracowania programu i metodyki badań.

4. Uwagi sformułowane w ramach krytycznej oceny pracy

Rozprawa doktorska Pana mgra inż. Marcina Chudzińskiego zawiera, zdaniem recenzenta, uchybienia i nieścisłości. Przedstawione poniżej uwagi dotyczą wątpliwości, jaki nasunęły się po przeczytaniu pracy:

- a) w rozdziale 7 rozprawy pt.: „Obiekt, program i metodyka badań” przedstawiono budowę spoin zastosowanych do wykonania złączy spawanych metodą 136 dwóch płyt stalowych o grubości 8 odrębnie dla każdej pozycji spawania: naściennej i pionowej; odnosząc się do konstrukcji zbiornika magazynowego (jako przykładu obiektu wielkogabarytowego) występują tam złącza spawane wykonywane w pozycji naściennej i pozycji pionowej oraz obszary krzyżowania się złączy wykonywanych w wymienionych pozycjach, zdaniem recenzenta ten obszar jest newralgicznym dla konstrukcji spawanej,
- b) na rysunku 24 przedstawiono budowę płaszcza zbiornika magazynowego, który składa się z blach o różnej grubości, na rysunku 26 przedstawiono wykres obrazujący możliwości zmniejszenia grubości ścianki zbiornika poprzez zastosowanie stali dupleks dla dolnych obszarów obiektu wielkogabarytowego; nasuwa się pytanie czy podczas realizacji procesu spawania dwóch blach o różnej grubości w pozycji naściennej metodą 136 istnieje możliwość uzyskania struktur złączy spawanych o właściwościach mechanicznych spełniających określone kryteria sterując uogólnionym parametrem procesu spawania jakim jest energia liniowa spawania,
- c) Doktorant prowadził prace badawcze bazujące na programie badań doświadczalnych wynikającym z postawionych celów rozprawy. Jako kryteria poprawności wykonania złączy spawanych przyjęto dane zawarte w normach. Uważam, że kryteria te wyznaczono na podstawie wyników wielu badań i nie wymagają weryfikacji, a celem badań naukowych jest weryfikacja nowych obszarów, dla których nie określono zaleceń.
- d) w tabeli 19 przedstawiono zdjęcia radiograficzne złączy, a w tabeli 20 zdjęcia złączy w czasie i po realizacji badań penetracyjnych, Autor określił numery norm określające poziom jakości złączy, lecz nie wskazał czy złącza spełniają określone wymagania i w jakim zakresie,

- e) w rozdziale 8 pt.: „Wyniki badań” przedstawiono wyniki badań na rozciąganie złączy spawanych wykonanych w pozycji: naściennej i pionowej, liczba próbek dla każdej grupy złączy wynosiła 2 sztuki; zdaniem recenzenta tak mała liczba prób nie uprawnia do określania wartości średniej i odchylenia standardowego dla parametru (wytrzymałości na rozciąganie); w zakresie oceny właściwości mechanicznych powinny zostać przeprowadzone badania materiału rodzimego czyli stali superdupleks SAF 2507 (1.4410) stanowiące punkt odniesienia do oceny wytrzymałości złączy,
- f) w pracy znajduje się spis ważniejszych oznaczeń, w którym Autor wyjaśnia znaczenie poszczególnych symboli, z jakiego powodu:- austenit oznaczono literą A oraz α , ferryt oznaczono literą F oraz γ ; sugeruję podawanie jednostek układu miar przy objaśnianiu oznaczeń; w rozprawie Autor zamieścił 13 wzorów, przy których zostały podane objaśnienia oznaczeń – jaki jest cel powtarzania tekstu,
- g) w podrozdziale 9.1 (str. 92) Doktorant przedstawia rozkład udziału ferrytu w poszczególnych strefach złączy spawanych, wykres o charakterze liniowym (rys.44) opracowano na podstawie danych zawartych w tabeli 35; czym uzasadnione jest dublowanie przedstawiania wyników badań? Czy w tym przypadku nie należy zastosować wykresu punktowego, jak to robiono w innych miejscach pracy?

5. Uwagi dotyczące edytorskiego przygotowania pracy

Podczas redakcji pracy Doktorant nie ustrzegł się usterek edytorskich. Najistotniejsze usterki zostały przedstawione tabeli poniżej.

Lp.	Nr strony	Nr linii	Jest	Powinno być
1	5	2d	Wytrzymałość	Wytrzymałość
2	7	3g	..., więc doskonale, więc posiadają doskonale ...
3	7	9g	... 2008) a wzrostu 2008), a wzrostu ...
4	7	11d	... jej wykonania a doskonalsza jej wykonania, a doskonalsza ...
5	9	7g	... dupleks by gatunek dupleks był gatunek ...
6	9	12d	Jedną z pierwszy stali ...	Jedną z pierwszych stali ...
7	10	18g	... Pozwoliło ponadto na Pozwoliło to ponadto na ...
8	11 54	8g 9d	m. in.	m.in.
9	21	1g	... o połowę a już 4% o połowę, a już 4% ...
10	21	3g	...znaczenie w przypadku...	...znaczenie, w przypadku...
11	21	4g	... ilość N nabrały ilość N, nabrały ...
12	21	7g	... w chrom co prowadzi...	... w chrom, co prowadzi...
13	26	11g	Sali	stali
14	27	6g	...W sytuacji gdy redukcja...	...W sytuacji, gdy redukcja...
15	28	12g	lini	linii
16	29	3g	będą	będzie
17	29	9g	konieczność	konieczność
18	34	5g	...i spawania a takżei spawania, a także ...
19	35	7d	... innych cieczy w przemyśle...	... innych cieczy stosowanych w przemyśle...
20	48	9g	da	dla
21	64	16d	linę	linię
22	66	1d	... połączenia. [96,136].	... połączenia [96,136].
23	74	7d	wydłużenie procentowe	wydłużenia procentowego
24	74	7d	przewężenie	przewężenia
25	75	4d	Rysunku	rysunku
26	93	1g	30	30%
27	94	2g	...połączonych części a takżepołączonych części, a także ...

28	98	12g	w drodze badania prac	w wyniku badania pracy
----	----	-----	-----------------------	------------------------

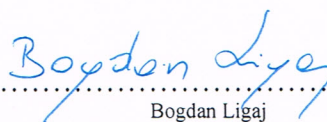
Uwagi dotyczące błędów stylistycznych i interpunkcyjnych występujących w rozprawie przekazano Doktorantowi podczas bezpośredniej rozmowy.

6. Ocena końcowa

Rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Chudzińskiego pt.: „*Analiza własności strukturalnych i mechanicznych połączeń spawanych w obiektach wielkogabarytowych ze stali superdupleks*” stanowi kompletne opracowanie zdefiniowanego problemu badawczego, istotnego ze względu na projektowanie i wykonywanie wielkogabarytowych konstrukcji inżynierskich ze stali superdupleks z zastosowaniem technologii spawania. Uwagi krytyczne sformułowane w recenzji nie podważają treści merytorycznej rozprawy oraz nie negują osiągnięć Doktoranta. Pan mgr inż. Marcin Chudziński udowodnił, że posiada umiejętności planowania i realizacji badań doświadczalnych w zakresie wyznaczania właściwości mechanicznych materiału oraz połączeń (złączy spawanych). Potrafi analizować zdjęcia mikrostruktur stali dupleks oraz złączy spawanych. Posiada wysoki poziom wiedzy z zakresu wytrzymałości materiałów, metod spajania metali oraz technologii wykonywania wielkogabarytowych konstrukcji inżynierskich stanowiącej główną ścieżkę zainteresowań naukowych i zawodowych Doktoranta. Wiedza ta pozwoliła na poprawne sformułowanie tez i celów badawczych. Należy stwierdzić, że postawione cele zostały zrealizowane, a tezy udowodnione. Rozważany w rozprawie doktorskiej problem badawczy jest aktualny i przyczynia się do rozwoju dyscypliny: budowa i eksploatacja maszyn.

7. Wniosek końcowy

Całość oceny rozprawy doktorskiej uprawnia do sformułowania wniosku o spełnieniu warunków określonych w „*Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” z dnia 14 marca 2003 roku (wraz z późniejszymi zmianami) i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Radą Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy w dyscyplinie: budowa i eksploatacja maszyn.



.....
Bogdan Ligaj