

dr hab. inż. Anita Uściłowska  
Zakład Obróbki Plastycznej  
Instytut Technologii Materiałów  
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania  
Politechnika Poznańska  
ul. Piotrowo 3  
60-965 Poznań  
e-mail: anita.uscilowska@put.poznan.pl

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Wszółka**

**nt.**

**„Ocena własności użytkowych regenerowanych obręczy kołowych ze stopów aluminium po spawaniu z chłodzeniem mikro-jetowym”**

### **1. Podstawa opracowania**

Niniejsza recenzja opracowana została na podstawie pisma Dziekana Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej z dnia 17 września 2018r.

### **2. Uwagi wstępne**

Wzrost liczby różnego rodzaju środków transportu, w tym pojazdów samochodowych stwarza wzrastające zapotrzebowanie na różnego rodzaju naprawy będących wynikiem naturalnego zużycia czy uszkodzeń spowodowanych zdarzeniami drogowymi. Jednym z problemów technicznych jak i technologicznych tego rodzaju działalności jest wykonawstwo lub naprawa elementów pojazdu procesami spawalniczymi. Ważną techniką stosowaną w budowie pojazdów, jak również ich napraw powypadkowych, są technologie spawalnicze, przede wszystkim spawanie łukowe. Od jakości wykonywanych złączy spawanych jak również napawanych zużytych warstw wierzchnich zależy trwałość eksploatacyjna urządzeń, maszyn czy konstrukcji, a bardzo często również bezpieczeństwo bierne pojazdów. Eliminacja wszystkich błędów i nieprawidłowości jest w przypadku procesów spawalniczych niemożliwa. Istotną rolę w tych systemach odgrywają także ich części składowe jak: właściwe zaprojektowanie konstrukcji, prawidłowy dobór materiałów zarówno konstrukcyjnych jak i dodatkowych, prawidłowo zaprojektowany i realizowany proces technologiczny i jego odpowiednia kwalifikacja, doświadczenie i kwalifikacje personelu wykonującego bezpośrednio procesy spawalnicze, dobór i prowadzenie niezbędnych metod kontroli jakości.

Z tego punktu widzenia podjęcie przez Autora ocenianej rozprawy badań nad efektami innowacyjnego procesu spawania łukowego z chłodzeniem mikro-strumieniowym w procesie napraw aluminiowych obręczy kołowych wydaje się zrozumiałe i w pełni uzasadnione. Zastosowano tu nowy, innowacyjny proces spawania poznanie jego efektów technologiczny takich jak: wpływ parametrów procesu, rodzaj medium chłodzącego, sposób chłodzenia itp. oraz metalurgicznych, takich jak: struktura wykonywanych warstw, ich właściwości mechaniczne jest istotne dla jego praktycznego wdrożenia do zastosowań przemysłowych, w tym przypadku wykonawstwa i napraw konstrukcji nośnych pojazdów. Po raz pierwszy schładzanie mikro-jetowe wypróbowano w spawaniu stopów aluminium, co dało bardzo pozytywny rezultat. Dotychczas z powodzeniem stosowano spajanie z chłodzeniem mikro-jetowym tylko dla stali konstrukcyjnych niestopowych.

Dlatego też tematykę rozprawy, jak i jej zakres należy ocenić jako aktualne, stanowiące ważny krok na drodze poznania zjawisk zachodzących w krzepnącym i stygnącym pod działaniem mikro-strumienia gazu chłodzącego metalu stopionego ciepłem łuku spawalniczego i ich wpływu na strukturę oraz właściwości wykonywanych spoin, a w końcowym efekcie na własności użytkowe regenerowanych obręczy kołowych.

### **3. Charakterystyka i ocena rozprawy**

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Łukasz Wszolek podjął próbę zbadania efektów zastosowania procesu spawania stopów aluminium elektrodą topliwą w procesie MIG z chłodzeniem mikro-strumieniowym do napraw obręczy kołowych. W tym celu Doktorant zbudował odpowiednie stanowisko do prób spawania obręczy kołowych, wykonał szereg prób spawania dla różnych zestawów parametrów technologicznych w oparciu o przyjęty plan eksperymentu, przeprowadził szerokie badania struktury otrzymanych spoin oraz ich właściwości mechanicznych wraz ze statystyczną analizą wyników badań. W podsumowaniu wyników badań stwierdził celowość zastosowania chłodzenia mikro-strumieniowego w procesie spawania stopów aluminium stosowanych do budowy obręczy kołowych.

Rozprawa podzielona jest na dwanaście rozdziałów, całość liczy 141 stron, zawiera spis literatury obejmujący 100 pozycji, spisy tablic i rysunków oraz streszczeń (w języki polskim i angielskim). Układ rozprawy jest prawidłowy, typowy dla tego rodzaju opracowań, tzn. składa się z przeglądu literatury, przeprowadzenia badań rozpoznawczych, sformułowania tezy, celu i wykonaniu badań zasadniczych prowadzących do udowodnienia tezy, dokładnego opisu przeprowadzonych badań, opracowania ich wyników, precyzyjnego podsumowania wraz z wnioskami.

Łatwym do zauważenia jest racjonalne zaplanowanie eksperymentu, prawidłowy dobór przedmiotu złączy próbných przeznaczonych do badań, użytych materiałów rodzimych i dodatkowych oraz metod badawczych, jak również staranne i dokładne opracowanie uzyskanych wyników badań wraz ze statystycznym oszacowaniem błędu.

W pierwszym rozdziale rozprawy – wstępie Autor omawia znaczenie napraw pojazdów samochodowych. Wspomina, że dużą rolę w naprawach pojazdów samochodowych ogrywają procesy spawalnicze. Dlatego też tę innowacyjną metodę spawania wybiera Autor do dalszych badań nad zagadnieniem nośności stalowych konstrukcji kratownicowych środków transportu.

Rozdział drugi zawiera określenie celu i zakresu pracy. Autor formułuje, że ... *celem pracy jest poprawa własności eksploatacyjnych kół ze stopów lekkich naprawianych metodami spawalniczymi wykorzystując innowacyjną technikę mikro-jetową podwyższającą własności mechaniczne, a zwłaszcza własności plastyczne w stosunku do innych procesów spawalniczych*. Podany dalej zakres pracy obejmuje opracowanie stanowiska do spawania stopów glinu z chłodzeniem mikro-jetowym, wyszczególnienie etapów badań rozpoznawczych prowadzących do zaproponowania tezy, przedstawienie tezy, dobór badań zasadniczych prowadzących do udowodnienia tezy. Biorąc pod uwagę innowacyjność zastosowanej metody spawania z chłodzeniem mikro-strumieniowym takie wyznaczenie celu i zakresu badań jest w pełni uzasadnione.

W trzecim rozdziale rozprawy zatytułowanym „Bezpieczeństwo pojazdów osobowych ze względu na stan techniczny” Autor dokonuje analiz typowego zużycia eksploatacyjnego pojazdów podczas przeglądów technicznych z uwzględnieniem uszkodzeń kół pojazdów. Rozdział czwarty rozprawy zatytułowany „Budowa koła samochodowego” poświęcono omówieniu budowy koła samochodowego z uwzględnieniem możliwości napraw powypadkowych obręczy kołowych stalowych i aluminiowych.

W rozdziale piątym przedstawiono najważniejsze technologie produkcji kół ze stopów lekkich. Opisano najważniejsze procesy odlewania i kucia metalowych elementów koła samochodowego.

W rozdziale szóstym przedstawiano najważniejsze procesy spawalnicze stosowane do spajania stopów aluminium. Przedstawiono procesy spawalnicze w osłonie gazów ochronnych MIG i TIG, spawanie elektrodami otulonymi, spawanie laserowe i gazowe. Omówiono strukturę metalograficzną aluminiowych złączy spawanych.

Rozdział siódmy poświęcono opisowi innowacyjnego procesu schładzania mikro-jetowego wykorzystywanego ostatnio w spawaniu stali. Przedstawiono szczegółowo relacje pomiędzy najważniejszymi parametrami schładzania mikro-jetowego (ciśnienie gazu, średnica dyszy mikro-strugowej, rodzaj medium chłodzącego) a strukturą metalograficzną stalowego stopiwa i własnościami spawanego złącza. Zasygnalizowano, że schładzanie mikro-jetowe stopów aluminium powinno znacząco poprawić własności złącza poprzez zmiany strukturalne w stopiwie pod wpływem schładzania mikro-strugowego.

Rozdział ósmy stanowi podsumowanie literatury związanej z budową aluminiowych obręczy kołowych i możliwością ich napraw, procesami spawalniczymi stosowanymi do spajania stopów aluminium oraz z innowacyjnym procesem spajania mikro-strugowego, który do tej pory był testowany wyłącznie w spawaniu stali. Chłodzenie mikro-jetowe znacząco poprawia udarność złączy stalowych poprzez wyraźną zmianę struktury metalograficznej stopiwa.

Pozwala to przypuszczać, że chłodzenie mikro-jetowe będzie mieć wpływ na strukturę metalograficzną aluminiowego stopiwa, co przełoży się na własności złącza, a w analizowanym przez Doktoranta przypadku na użytkowe naprawianych obręczy kołowych. Analiza literatury pozwala na zaproponowanie badań wstępnych.

W rozdziale dziewiątym opisano zakres badań wstępnych. Opisano stanowisko badawcze do napraw regeneracyjnych zarówno obręczy stalowych jak i aluminiowych. Podjęto po raz pierwszy próby napraw stalowych obręczy kołowych z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego, sprawdzono udarność złącza dla stali, z których wykonane są obręcze, porównano to z wynikami zawartymi w literaturze dla innych konstrukcji i z innych gatunków stali niestopowych. Przez analogie do napraw stalowych obręczy postanowiono sprawdzić możliwość spajania stopów aluminium i wykonanych z nich obręczy z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego. Zaproponowano pierwsze testy spawalnicze polegające na analizie pęknięć powierzchniowych. Wyraźnie zauważono wpływ chłodzenia mikro-jetowego na szerokość pęknięć i rozstaw pomiędzy nimi.

W rozdziale 10 poprzedzonym dogłębną analizą stanu zagadnienia, sformułowano tezę rozprawy doktorskiej zakładającej, że *...Chłodzenie mikro-jetowe zastosowane przy spawaniu aluminiowej obręczy kołowej wpływa znacząco na jej własności użytkowe, co może prowadzić do znaczącego wydłużania czasu jej eksploatacji*".

W celu udowodnienia powyższej tezy opracowano szczegółowy plan badań. W rozdziale jedenastym zatytułowanym „badania zasadnicze” opisano postępowanie prowadzące do udowodnienia tezy obejmujące badania struktury metalograficznej spoin, analizy fazowej spoin, badanie wytrzymałości aluminiowego złącza wykonanego z zastosowaniem chłodzenia mikro-jetowego, kontrolę wad spawalniczych w regenerowanej obręczy kołowej, badanie wytrzymałości zmęczeniowej pospawanych obręczy kołowych przy zastosowaniu unikatowego w Kraju testera kół pojazdów. Bardzo pozytywne wyniki badania nowego procesu spawalniczego na obiekcie rzeczywistym są w moim odczuciu najważniejszym dowodem na potwierdzenie słuszności postawionej tezy.

Podsumowaniu wyników badań poświęcono rozdział dwunasty kończąc go listą 9-ciu wniosków. Jednoznacznie stwierdzono, że w wyniku przeprowadzonych badań osiągnięto założony cel badań i udowodniono tezę rozprawy doktorskiej.

#### **4. Najważniejsze uwagi ogólne i szczegółowe**

Ogólna koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Doktoranta poprawnie, a jej realizację oceniam pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest obszerna i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Dotyczy to zwłaszcza kompleksowego podejścia do badań mikrostrukturalnych oraz badań wytrzymałościowych. Doceniam zwłaszcza trafnie przyjęty zakres metod badawczych oraz dużą ilość przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników, rzeczowy sposób ich analizy oraz

przedstawione wnioski świadczą o dojrzałości badawczej Doktoranta. Szata graficzna rozprawy nie budzi moich zastrzeżeń

W trakcie analizy rozprawy nasunęło mi się jednak kilka **uwag ogólnych** dotyczących jej treści.

1. Moje zastrzeżenie budzi przyjęty układ pracy:  
w rozdziale drugim. „Cel i zakres pracy” Autor stwierdza: „Na podstawie przeprowadzonej kompleksowej analizy literaturowej podjętego tematu oraz biorąc pod uwagę wyniki badań własnych sformułowano następujący jej cel *„celem pracy jest poprawa własności eksploatacyjnych kół ze stopów lekkich naprawianych metodami spawalniczymi wykorzystując innowacyjną technikę mikro-jetową podwyższającą własności mechaniczne, a zwłaszcza własności plastyczne w stosunku do innych procesów spawalniczych”*, gdy tymczasem cel został przedstawiony jeszcze przed przeprowadzeniem analizy literatury. Moim zdaniem powinien zostać zamieszczony po przeprowadzeniu podsumowania przeglądu literatury i sformułowaniu tezy pracy.
2. Rozdział 9 "Zakres badań wstępnych" zawiera bogaty opis badań doświadczalnych i ich wyników dotyczących spawania z chłodzeniem mikro-jetowym. Przedmiotem badań były właściwości mechaniczne złącza spawanego. Jednak nie opisano obiektów, na których te badania wykonano. Tytuł podrozdziału 9.2. sugeruje, że prace obejmowały stalowe obręcze kołowe. Jednak w treści podrozdziału wyraźnie tego nie wpisano, nie podano geometrii spawanych próbek. Podano natomiast charakterystyki jednej ze stali. Jeśli badania przeprowadzane były na kołach, to należało by uwzględnić zmiany niektórych charakterystyk materiałowych, które dokonały się w materiale podczas wytwarzania koła (odlewnia lub obróbki plastycznej).
3. Ponadto, w tym podrozdziale stwierdzenia oparte są na wynikach zawartych w cytowanych artykułach. Doktorant nie jest autorem ani współautorem tych artykułów. Należało podać zakres pracy własnej Doktoranta. Z treści Rozdziału 9 nie można wywnioskować, czy jest on przeglądem literatury czy już wkładem autorskim Doktoranta w rozważanej tematyce.
4. Na stronie 34 w tablicy 9 podano różną zawartość drobnoziarnistego ferrytu AF (acicular ferrite) w zależności od zastosowanego medium chłodzącego bezpośrednio po spawaniu regeneracyjnym stalowej obręczy kołowej. Autor nie wyjaśnia jaka jest przyczyna tego zjawiska.
5. Tytuł podrozdziału 9.3 "Zastosowanie chłodzenia mikro-jetowego w spawaniu stopów aluminium" nie zawsze jest związany z treściami zawartymi w sekcjach tego podrozdziału. Trudno powiązać tytuł rozdziału z sekcjami "Planowanie eksperymentu" oraz "Dobór parametrów chłodzenia na podstawie planu Hartley'a". W obu wymienionych sekcjach nie pada ani razu słowo "aluminium". Eksperyment planowany jest w oparciu o parametry procesu chłodzenia, w planowaniu nie uwzględnia się materiału, z którego wykonane są badane obiekty.

6. W podrozdziale 9.3 pojawia się sekcja 9.3.4. "Kontrola pęknięć powierzchniowych". We wcześniejszych rozdziałach Autor nie wyjaśnia na jakie wielkości, charakterystyki może mieć wpływ spawanie z chłodzeniem mikro-jetowym. Sekcja 9.3.4 pojawia się zatem niespodziewanie dla czytelnika
7. W świetle uwag 3, 4 tytuł podrozdziału 9.3 wydaje się niefortunny.
8. Podrozdział 11.3 dotyczy badań wytrzymałości spoin na rozciąganie. W pierwszej sekcji (11.3.1) podano przyczynę doboru materiału: "Z powodu braku możliwości wycięcia z kół pojazdów próbek o odpowiednich wymiarach [...] posłużono się stopem aluminium z krzemem o oznaczeniu AK11". Z powyższego zdania nie można wnioskować o żadnej zależności niedogodności geometrycznych z charakterystykami dobranego materiału. Ponadto, pokazano na rys. 70 geometrię próbki poddawanej rozciąganiu. Jednak badania dotyczą spoin. Autor nie podał jaki jest związek geometryczny elementów spawanych oraz próbek przedstawionych na rys. 70.
9. W rozdziale 11 prezentowano wyniki badań i ich analizę. Przedstawione wykresy nie zawierają informacji o danych, dla których je sporządzono np. rys. 71, 75, 79 - nie podano ciśnienia gazu chłodzącego, rys. 72, 76, 80 - nie podano średnicy dyszy chłodzącej. Czy wykresy przedstawione na rys. 36 i 37 są wykreślone dla tych samych danych? Jeśli 'tak', to w jakim celu wykonano oba wykresy. W jakim celu wyznaczono zależność głębokości mikropęknięć od średnicy dyszy i ciśnienia gazu chłodzącego w postaci funkcji ciągłej? W jaki sposób wyznaczono te funkcje, jakiej metody użyto? Funkcje te wyznaczono i jaki wniosek można wysnuć na podstawie tej funkcji? Pytania te dotyczą także odpowiednich wykresów w dalszej części rozprawy.
10. Jednym z istotniejszym w punktu widzenia praktycznych zastosowań wyników badań, które wykonano w ramach doktoratu, jest podrozdział 11.5. Niestety jest on dość skromny (6 stron), a zawiera najbardziej pożądane informacje dla aplikacyjności badanego procesu spawalniczego.

Do najważniejszych **uwag szczegółowych** zaliczam:

1. Należy ujednoczyć zapis: mikro-jetowy, mikro - jetowy lub mikrojetowy Wg aktualnej normy powinno się stosować termin proces spawalniczy zamiast metoda spawalnicza (np. takie sformułowanie pojawia się w celu pracy).
2. Podobnie powinno się unikać terminu „felga” i stosować wyłącznie określenie techniczne „obręcz kołowa” (rysunek 5 i 6 str. 9.).
3. Należy ujednoczyć oznaczenia, np.:
  - a.  $x_i$  - indeks pisany kursywą,  $x_i$  - indeks pisany pismem prostym, bez kursywy; w teksie rozprawy oznaczają tę samą wielkość, ale nie jest to poprawne
  - b.  $x, X$  - czy to jest oznaczenie tej samej wielkości (wykresy)
  - c.  $y, Y$  - czy to jest oznaczenie tej samej wielkości (wykresy)
4. str. 11 rys. 7 i dalsze. Należy wykluczyć stosowanie oznaczeń w językach obcych (w nieuzasadnionych przypadkach) i unikać skanowania rysunków.
5. str. 16. Podano jednostkę nacisku Gg, która wymaga objaśnienia.

6. str. 19 rys. 14. Niezgodność treści na rysunku z podpisem.
7. str. 20 Brak wyjaśnienia skrótu MMA
8. str. 21 Zbyt swobodne używanie stwierdzenia 'doskonałe spawanie'
9. str. 24 Zbyt pochopne stwierdzenia: 'Wykorzystanie innowacyjnej metody [...] stwarza **nieskończone** możliwości sterowania strukturą i właściwościami powstałej struktury'.
10. str. 31 i kolejne. Należy zwrócić uwagę na policzalność rzeczowników. Zamiast "ilość zacisków" powinno być "liczba zacisków".
11. str. 33 Niezręczne wyrażenie: "Na podstawie sugestii literaturowych najlepszym gazem do chłodzenia mikro-jetowego jest argon".
12. str. 36. Na rysunku 28 powinno się zaznaczyć, że przełom spoiny ma wyraźnie charakter plastyczny, a na rysunku 29 brakuje informacji, że przełom próbki ma charakter mieszany plastyczno-kruchy. Jest to ważne uzupełnienie informacji dotyczące wpływu parametrów chłodzenia mikro-jetowego na udarność złącza zestawionych w tabelicy 11.
13. str. 42. Niedokończone zdanie: "Przyjmując, że przedział zmian dla wielkości wejściowych to: (wzór)". Ponadto (wzór) opisuje jedną liczbę, a wyrażenie przed wzorem zapowiada definicję przedziału.
14. str. 42. Na jakiej podstawie w planie selekcyjnym obrano  $n=11$ ?
15. str. Brak wyjaśnienia pojęć "Czynniki sterowane w skali unormowanej" i oznaczonych jako D (z kropką), B (z kropką), L (z kropką).
16. str. 44 "Zalecany do spawania konstrukcji pracujących" - niezręczne wyrażenie
17. str. 44 "Na podstawie wcześniejszych doświadczeń oceny spawalności stopów Al z chłodzeniem mikro-jetowym na stopach Al..." - zdanie o nieco zbyt skomplikowanej konstrukcji. Ponadto, nasuwa się pytanie o "wcześniejsze doświadczenia". Gdzie są one opisane? Doktorant powołuje się na nie bez żadnych odnośników.
18. str. 52 Niezrozumiała zależność: "Dysza 50  $\mu\text{m}$  skutkuje niższą średnią głębokością mikropęknięć".
19. str. 53 rys. 34, 35, 36 i kolejne; zbyt duży zakres na pionowej osi.
20. str. 54 W jakim celu sporządzono Tablicę 23. Jakie wnioski można wyciągnąć na podstawie danych zawartych w tej tablicy?
21. str 56, rys. 37 i kolejne. Niewidoczna legenda.
22. str. 103 "Nieistotny statystycznie był efekt główny ciśnienia gazu chłodzącego". Co to jest efekt główny ciśnienia?
23. Zaleca się unikania wyrażen typu : "najlepsze efekty".
24. W bibliografii, przy podawaniu adresów URL wskazane jest podawanie daty odwiedzin danej strony.
25. Zaleca się bardziej staranny skład pracy, korektę językową, głównie gramatyki i ortografii stosowanego języka.

## 11. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Wszółka nt. „Ocena własności użytkowych regenerowanych obręczy kołowych ze stopów aluminium po spawaniu z

chłodzeniem mikro-jetowym” jest interesującą pracą naukową badawczą o aktualnej tematyce. Niepodważalnym walorem pracy jest wykorzystanie nowatorskiej, innowacyjnej metody spawania elementów konstrukcji nośnych pojazdów z chłodzeniem mikro-jetowym. Jest to obiecująca metoda spawania stali i stopów aluminium w opracowaniu której Doktorant aktywnie uczestniczył, pozwalająca na kształtowanie struktury stopiwa, a tym samym właściwości spoin. Podjęty w pracy temat jest aktualny i ważny.

Badania wykonane przez Doktoranta w ramach rozprawy stanowią ważny wkład w lepsze poznanie wpływu nowych technik spawania, w tym spawania z chłodzeniem mikro-strumieniowym na strukturę i własności mechaniczne złączy spawanych. Doktorant postawił tezę, dla udowodnienia której wykonał liczne badania. Postawiona teza została przejrzyście udowodniona. Doktorant wykazał się umiejętnością dobrego planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej uzyskanych wyników. Pomimo wymienionych uwag ogólnych i szczegółowych (nie wpływających na wysoką wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej) stwierdzam, że Autor osiągnął cele postawione w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie nie tylko poznawcze, ale również szczególnie istotnych dla praktyki stosowania spawania mikro-strumieniowego. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo – badawczej.

**Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Uważam, że praca nadaje się do wyróżnienia.**

*Anita Lisutowska*

*Poznań, 28 września 2018 roku*