

Dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. PW
Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Produkcji
Zakład Inżynierii Spajania
02-524 Warszawa, ul. Narbutta 85

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Wszółka pod tytułem „Ocena własności użytkowych regenerowanych obręczy kołowych ze stopów aluminium po spawaniu z chłodzeniem mikro-jetowym”

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej z dnia 17.09.2018 zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej Nr XIII/116/2017/2018 z dnia 13.09.2018.

1. Tematyka rozprawy

Procesy regeneracji części maszyn stosowane są szeroko w wielu gałęziach przemysłu z uwagi na korzyści jakie niesie ze sobą odtworzenie zużytych czy zniszczonych fragmentów konstrukcji w stosunku do zakupu nowego komponentu. Są to głównie znaczne korzyści natury finansowej, ale także możliwość odtworzenia danego elementu konstrukcji czy nawet podwyższenia jego własności użytkowych poprzez zastosowanie np. nowych materiałów o wyższych własnościach użytkowych w stosunku do dotychczas stosowanych.

Technologie spawalnicze należą do wiodących metod modyfikacji oraz regeneracji części maszyn i są szeroko stosowane w wielu obszarach zastosowań przemysłowych. Także w przemyśle samochodowym można znaleźć wiele przykładów zastosowania nowoczesnych metod modyfikacji części maszyn z wykorzystaniem procesów napawania czy natryskiwania ciepłego, które znacząco podwyższają właściwości użytkowe wyrobów. Cykl pracy elementów konstrukcji czy napędów pojazdów samochodowych trwa od rozpoczęcia ich eksploatacji w sposób nieprzerwany. W przypadku zużycia czy uszkodzenia danego elementu możliwe są dwie drogi: wymiana komponentu lub jego regeneracja, o ile jest to możliwe i technicznie uzasadnione. Producenci samochodów w większości przypadków stosują metodę pierwszą – polegającą na wymianie zużytego czy uszkodzonego układu na nowy. Jednak, dla dużej grupy użytkowników pojazdów samochodowych już po okresie gwarancyjnym, takie rozwiązanie zazwyczaj oznacza wysokie koszty, co skłaniać może do wyboru metody regeneracji danego komponentu, która przy

zastosowaniu nowoczesnych technologii np. spawalniczych, może nie tylko przywrócić własności użytkowe danej części, ale często wydłużyć czas ich dalszej eksploatacji.

W ten nurt wykorzystania nowoczesnych technologii spajania do modyfikacji i regeneracji części maszyn dobrze wpisuje się tematyka podjętej rozprawy doktorskiej. Skupia się ona na badaniach związanych z procesem regeneracji elementów kół samochodowych ze stopów aluminium za pomocą procesów spawania łukowego. Elementem nowości w zastosowanych badaniach jest zastosowanie w procesie spawania regeneracyjnego specjalnej przystawki do chłodzenia (tzw. mikro-jetowego), której zadaniem jest poprawa właściwości eksploatacyjnych kół samochodowych ze stopów aluminium po procesie regeneracji.

Autor w przedłożonej rozprawie podjął się badań mających na celu ocenę i porównanie wybranych właściwości złączy spawanych ze stopu aluminium AlSi11, stanowiących element konstrukcyjny koła samochodowego po procesie regeneracji, do analogicznych złączy przed regeneracją. Szczególną uwagę w pracy poświęcono zastosowaniu podczas spawania specjalnej przystawki do chłodzenia mikro-jetowego wykonywanych spoin. Celem naukowym w pracy było określenie wpływu zastosowanego układu chłodzenia mikro-jetowego na właściwości złączy spawanych ze stopu AlSi11, a także na możliwości sterowania strukturą, a przez to właściwościami złączy spawanych kół samochodowych po procesie regeneracji.

Biorąc pod uwagę szeroki obszar zastosowania w innych gałęziach przemysłu, przedstawionej technologii spawania regeneracyjnego z chłodzeniem mikro-jetowym, można stwierdzić, że podjęte przez Autora zagadnienie badawcze jest celowe, a zaproponowana tematyka badawcza aktualna.

2. Charakterystyka rozprawy

Praca liczy 141 stron i składa się z 12 rozdziałów. Można ją podzielić na część dotyczącą analizy stanu zagadnienia na podstawie literatury obejmującą 30 stron, część związaną z badaniami wstępnymi (48 stron) oraz część własną zawierającą tezę pracy i harmonogram badań oraz badania zasadnicze własne (40 stron).

Cel i zakres pracy przedstawiony został już w pierwszym rozdziale. Zawarta w pracy teza zakłada, że zastosowane w procesie spawania regeneracyjnego MIG aluminiowej obręczy kołowej chłodzenie strugą z przystawki mikro-jet złącza spawanego wpływa znacząco na właściwości użytkowe obręczy, co z kolei może prowadzić do znacznego wydłużenia czasu jej eksploatacji w warunkach obciążenia. Praca własna oraz badania wstępne mają głównie charakter eksperymentalny. Do oceny uzyskanych wyników Autor szeroko wykorzystuje metody planowania eksperymentu oraz analizę statystyczną. Część własną kończy podsumowanie wyników oraz wnioski końcowe (9). Zamykając pracę część „Literatura” obejmuje 100 pozycji, wśród których znajduje się 16 publikacji Autora w postaci artykułów naukowych krajowych oraz zagranicznych a także referatów wygłaszanych na konferencjach krajowych i międzynarodowych.

3. Ocena merytoryczna

Analizę stanu zagadnienia można podzielić na trzy części. Pierwsza obejmująca zagadnienia związane z kołami samochodowymi takie jak: zużycie eksploatacyjne pojazdów, uszkodzenia kół, budowę kół pojazdów z podziałem na koła stalowe i aluminiowe oraz charakterystykę metod wytwarzania kół na bazie stopów lekkich (odlewanie, kucie, rolowanie). Z uwagi na realizowaną w pracy metodę regeneracyjną kół scharakteryzowano krótko procesy spawania, które umożliwiają łączenie stopów aluminium (TIG, MIG, MMA, wiązka lasera, spawanie gazowe). Warto wspomnieć, że oprócz opisanych w pracy metod do spawania stopów aluminium stosuje się także wiązkę elektronów oraz znacznie tańszą i efektywną metodę spawania plazmowego.

Ostatnia część analizy stanu zagadnienia koncentruje się na opisie i charakterystyce spawania materiałów z równoczesnym zastosowaniem chłodzenia mikro-jetowego zrealizowanego w postaci przystawki podążającej w stałej odległości za elektrodą do spawania. Ten rozdział części literaturowej pracy wydaje się najciekawszy z uwagi na unikalność zastosowanego rozwiązania technologicznego do chłodzenia. Przedstawiono opis konstrukcji membran służących do zawężenia strugi gazu zastosowanej w pracy przystawki chłodzącej (tzw. mikro-jetowej) oraz jej parametry, które mają wpływ na przebieg procesu chłodzenia. Zaprezentowano także wyniki badań, w których analizowano wpływ zastosowania chłodzenia spoiny za pomocą omawianej przystawki na strukturę spawanych stali niestopowych. Wskazano, że główną cechą omawianego systemu chłodzenia mikrostrugami gazu (argon) jest możliwość takiego sterowania parametrami chłodzenia mikro-jet, przy których struktura spoiny wykonanej ze stali niestopowej zawiera o prawie 20% większy udział fazy drobnoziarnistej ferrytu AF (acicular ferrite) niż w stali spawanej klasycznymi metodami łukowymi bez dodatkowego systemu chłodzenia.

Przedstawione wyniki badań literaturowych pokazują jak istotny i duży wpływ na zawartość ferrytu AF w spoinie ma rodzaj zastosowanego medium chłodzącego. Zamieszczone przykłady dla chłodzenia stalowych złączy spawanych z użyciem argonu, helu, a nawet azotu zapewniają większy udział ferrytu AF w spoinie niż w złączach wykonanych bez chłodzenia. Jest to wyraźnie widoczne zwłaszcza w wynikach badań udarnośći złączy spawanych, przeprowadzonych w ujemnych temperaturach, gdzie udarność znacznie przewyższa (przy chłodzeniu Ar i He) wartości uzyskiwane dla złączy spawanych bez chłodzenia. Autor wskazuje, że jest to związane z większą zawartością ferrytu AF w spoinie, który jako faza drobnoziarnista powoduje wzrost własności plastycznych spoiny. Na stopień zawartości drobnoziarnistego ferrytu AF w spoinie wykonanej z przystawką chłodzącą oprócz rodzaju zastosowanego gazu mają wpływ, jak pokazano także, ciśnienie gazu chłodzącego, średnica dyszy chłodzącej czy odległość dyszy od powierzchni materiału. Ponieważ na strukturę spoiny największy wpływ ma szybkość chłodzenia w przedziale od 800 do 500°C to należy oczekiwać, że również odległość dysz przystawki chłodzącej od miejsca topienia materiału podczas spawania będzie miała duże znaczenie.

Zaprezentowane dane literaturowe wyników uzyskanych przy spawaniu z chłodzeniem za pomocą przystawki mikro-jet wskazują na korzystne oddziaływanie chłodzenia mikrostrugami gazu na własności plastyczne spoiny. W ramach zaprezentowanego tematu i celu pracy podjęto

badania wstępne dla potwierdzenia korzystnego oddziaływania chłodzenia mikro-jet zarówno dla złączy spawanych ze stali, ale także w celu wstępnej oceny czy równie korzystna relacja zachodzi dla złączy spawanych ze stopów aluminium, które obecnie są szeroko stosowane w przemyśle samochodowym na obręcze kół.

Autor w ramach badań wstępnych zbudował stanowisko badawcze do spawania z przystawką w postaci głowicy z mikrodyszami do chłodzenia mikro-jetowego. Przeprowadzono próby spawania stali niestopowej oraz stopu aluminium w układzie bez oraz z chłodzeniem za pomocą układu mikro-jet. Dla obu rodzajów materiałów zastosowano proces spawania MIG z materiałem dodatkowym odpowiednim do spawanego materiału bazowego. W przypadku spawania stali niestopowych (stal S235) stosuje się jednak gazy osłonowe aktywne (np. CO₂ lub Ar+CO₂) i wtedy metoda spawania powinna nosić nazwę MAG, a nie MIG jak w przypadku stopów aluminium (AlSi11) które spawa się w osłonie gazu obojętnego (Ar).

Wyniki badań dla złączy ze stali niestopowej potwierdziły, że w spoinie wzrasta ilość ferrytu drobnoziarnistego AF przy spawaniu z chłodzeniem mikro-jet nawet o 50% przy zastosowaniu chłodzenia argonem, ale także dla mieszanek gazowych (Ar+50%He, Ar+50%N₂, Ar+50%CO₂) uzyskano wzrost zawartości ferrytu AF. Również wyniki badań udarności w temperaturach obniżonych (-40°C, -20°C) potwierdziły większą udarność złączy spawanych z chłodzeniem mikro-jet przy użyciu różnych gazów chłodzących. Zmierzona twardość w SWC była wyraźnie niższa niż dla złącza spawanego bez chłodzenia, natomiast twardość w spoinie wykonanej z chłodzeniem była nieznacznie wyższa niż w złączu spawanym bez chłodzenia.

Podobne badania wstępne przeprowadzono dla stopów aluminium stosowanych na obręcze kół pojazdów. W wyniku analizy składu chemicznego obręczy kół, stosowanych przez głównych producentów, do badań wstępnych wytypowano stop odlewniczy AlSi11 (silumin). Badania wstępne miały na celu wytypowanie najlepszych parametrów układu chłodzenia mikro-jet przy spawaniu złączy ze stopu AlSi11. Zastosowano tutaj metody analizy związane z planowaniem eksperymentu oraz planem Hartleya do wyznaczenia parametrów chłodzenia. Głównym kryterium oceny złącza spawanego były pomiary głębokości mikropęknięć oraz odległości pomiędzy mikropęknięciami jakie powstawały po procesie spawania zarówno z jak i bez przystawki chłodzącej mikro-jet. Badania te pozwoliły na dobór takich parametrów jak średnica dyszy chłodzącej, ciśnienie gazu chłodzącego oraz rodzaj gazu chłodzącego (Ar, Ar+50%He, He). Część teoretyczna wraz z badaniami wstępnymi daje podstawę do realizacji dalszych badań nad zastosowaniem procesu regeneracji obręczy kół ze stopów aluminium w procesie spawania z jednoczesnym chłodzeniem mikro-jet w celu podwyższenia właściwości eksploatacyjnych badanych elementów kół.

Ważniejsze uwagi jakie nasunęły mi się do tej części pracy dotyczą głównie wyjaśnienia użytych niektórych sformułowań oraz napotkanych błędów edytorskich jak np.:

- Str.10. „o oznaczeniu S235. Jest to stal ... o zawartości węgla w przedziale 0,2 – 0,3 %”. Stal S235 wg normy EN 10025-2 zawiera poniżej 0,2% węgla dla grubości < 40 mm.
- Str. 11-12 glin – aluminium. Sugeruję stosowanie jednej nazwy.
- Str. 16. „pod naciskiem do 30 Gg”. Co to za jednostka?

- Str. 16. Rozdział 5.5 Rolowanie. Przedstawiony opis metody rolowania jest niezbyt zrozumiały (niewystarczający opis technologii)
- Str. 16 Rozdział 6. Spajanie TIG, MIG, itd. Ponieważ są to konkretne nazwy metod w ramach procesów spajania (spawanie, zgrzewanie, lutowanie, klejenie) sugeruję opisywać je jako spawanie TIG, MIG, itd.
- Str. 20. „ze względu na powstałą warstwę żużła spoina musi być poddana obróbce mechanicznej...” (styl) chodzi tu o usunięcie warstwy żużła po spawaniu lub pomiędzy kolejnymi ściegami spoiny, a nie obróbkę mechaniczną czystej spoiny.
- Str. 27 „Obecnie najczęściej analizowanym procesem spawalniczym jest proces spawania stali metodą MIG.” Jest to bardzo nieprecyzyjne stwierdzenie. Istnieje wiele gatunków stali, które spawane są różnymi metodami. Oprócz metody MIG stosuje się powszechnie metodą MAG (w osłonie gazów aktywnych) do spawania stali niestopowych.
- Str. 28. „Tablica 3 przedstawia wyniki badań ... złącza wykonanego metodą MIG”. Nigdzie nie podano jaki gatunek materiału był spawany. Jeśli była to stal niestopowa to powinna być to metoda MAG.
- Str. 29. „Podczas napraw spawalniczych kół ... ze stopów aluminium najbardziej rozpowszechnionym procesem jest proces MIG.” Równie dobra, o ile nie lepsza do spawania stopów Al jest metoda TIG. Można się zastanawiać, czy istnieją jakiegokolwiek dane, która metoda jest najczęściej stosowana do napraw kół pojazdów, skoro są to naprawy regeneracyjne, jednostkowe i prowadzone w prywatnych warsztatach.
- Str. 31. „Konstrukcja taka umożliwi spawanie czołowe”. Powinno być spawanie doczołowe.
- Str. 31. Rys.25. Szkoda, że na zdjęciu stanowiska nie pokazano zamocowanego uchwytu do spawania z systemem chłodzenia mikro-jet.
- Str. 32. Rozdział 9.2. Czy stal S235 spawano metodą MIG jako zostało przedstawione? Jeśli zastosowano stal niestopową, to spawa się ją łukowo metodą MAG. Nie zamieszczono jaki gaz osłony zastosowano przy spawaniu. W opisie technologii spawania brakuje także podania grubości spawanych blach oraz sposobu przygotowania krawędzi do spawania.
- Str. 34. Tabela 9. W jaki sposób zmierzono % zawartość ferrytu AF w spoinie?
- Str. 35. Tabela 11 i str.38 tabela 12. Wskazane byłoby podanie odchylenia standardowego przy średnich wartościach uzyskanych z 5 prób.
- Str. 38. Tabela 12. Jak wytłumaczyć większą twardość w spoinie (344) próbek z chłodzeniem mikro-jet w stosunku do próbek bez chłodzenia (331)? Przecież w spoinie uzyskanej z chłodzeniem udział ferrytu drobnoziarnistego jest o ponad 50% większy, a ferryt ten zapewnia większą plastyczność materiału.
- Str.40. „Norma PN EN 1760” powinno by EN 1706. Stop AK11 (AlSi11) wg tej normy to jest EN AC 44000, natomiast oznaczenie EN AC44100 odnosi się do stopu AlSi12(a).
- Str. 44. Kontrola pęknięć powierzchniowych. Czy w każdej spawanej próbce z chłodzeniem lub bez chłodzenia wystąpiły po spawaniu pęknięcia powierzchniowe w

spawanym stopie Al? Z czego one mogły wynikać? Czy jest możliwy dobór takich parametrów spawania, aby pęknięcia te nie występowały?

W podsumowaniu Autor wskazał na kluczowe obszary zagadnień oraz parametry procesu, które odgrywać będą największą rolę z punktu widzenia podwyższenia właściwości złączy spawanych po regeneracji z zastosowanym systemem chłodzenia mikro-jet. Stanowi to dobrą bazę pod zaplanowane badania własne.

Część druga pracy dotyczy badań własnych obejmujących wykonanie złączy spawanych ze stopu aluminium (AlSi11) stosowanych na obręcze kół z zastosowaniem układu chłodzenia spoiny za pomocą przystawki mikro-jet. Obejmowały one badania mikrostruktury otrzymanych złączy, analizę fazową spoin, badania wytrzymałościowe złączy na rozciąganie, kontrolę nieniszczącą złączy spawanych (wizualną, rentgenowską, ultradźwiękową) oraz badania wytrzymałości zmęczeniowej na obciążenia promieniowe obręczy spawanych kół.

Badania metalograficzne spawanych złączy spawanych ze stopu AlSi11 bez oraz z chłodzeniem mikro-jet wykonano dla dwóch producentów obręczy kół (VW, Daewoo). Analizie poddano wielkość oraz rozmieszczenie fazy β o strukturze krystalicznej krzemu występującej w strukturze stopu. Rozdrobnienie tej fazy może mieć wpływ na własności plastyczne spoiny. Obserwacje mikrostruktury wykazały znaczące (średnio o ok. 50% dla wszystkich próbek) rozdrobnienie kryształów fazy β w spoinach spawanych z systemem chłodzenia mikro-jet. Przeprowadzona rentgenowska analiza fazowa spoin wykazała występowanie fazy α oraz fazy β oraz niewielką śladową ilość fazy Fe_3Si , która może korzystnie oddziaływać na rozdrobnienie fazy β .

Kolejne badania wytrzymałości na rozciąganie spawanych złączy przeprowadzono na standardowych próbkach wyciętych z blach spawanych ze stopu AK11 (AlSi11), które łączono z oraz bez systemu chłodzenia mikro-jet. Próby rozciągania przeprowadzono dla zmiennych wartości ciśnienia oraz średnicy dysz głowicy mikro-jet. Wyniki badań pokazały wzrost wydłużenia próbek złączy spawanych z systemem chłodzenia mikro-jet średnio o ok. 38% przy niewielkim spadku wytrzymałości na rozciąganie o ok. 11% oraz spadku granicy plastyczności o ok. 22%.

W kolejnym etapie przeprowadzono badania nieniszczące spoin w celu oceny występowania niezgodności spawalniczych w złączach spawanych w układzie z oraz bez chłodzenia mikro-jet. Najbardziej zaawansowana metoda badań rentgenowskich ujawniła na obrazie radiogramu występowanie pęcherzy oraz braku przetopu dla złączy spawanych zarówno z chłodzeniem jak i bez chłodzenia mikro-jet co wskazuje, że powstałe niezgodności nie zależą od zastosowanego chłodzenia. Również badania ultradźwiękowe uwidocznily występowanie podobnych niezgodności w obu typach spawanych złączy.

Ostatnią grupą badań były badania przeprowadzone na całych kołach pojazdów wykonanych ze stopu aluminium w wariantach kół nigdy nie regenerowanych oraz kół spawanych regeneracyjnie z chłodzeniem mikro-jet oraz bez chłodzenia. Badania prowadzono na dedykowanym specjalistycznym stanowisku do badania zużycia kół pojazdów w warunkach długotrwałego obciążenia zmiennego siłą promieniową. Wyniki badań jednoznacznie pokazują, że koła stopniowo obciążane aż do maksymalnej siły promieniowej 1000 kg nie ulegały

uszkodzeniu w przypadku badań kół oryginalnych oraz kół spawanych z układem chłodzenia mikro-jet. Niemal wszystkie koła spawane bez chłodzenia wykazały pęknięcia w jednej ze spoiny. Świadczy to korzystnym wpływie zastosowanego układu chłodzenia mikro-jet na własności użytkowe kół ze stopu aluminium po spawaniu regeneracyjnym.

Pracę kończy podsumowanie przeprowadzonych badań oraz wnioski końcowe. Autor wskazuje na znaczne korzyści w zastosowaniu systemu chłodzenia mikro-jet przy spawaniu regeneracyjnym obręczy kół ze stopów aluminium. Główny efekt poprawy własności użytkowych regenerowanych elementów przypisuje się znaczącemu rozdrobnieniu fazy β (krystalicznej fazy krzemu) w stopie AlSi11 w skutek kontrolowanego chłodzenia spoiny. W ramach wniosków użytkarnych wykazano podobną wytrzymałość na zmęczenie jaką uzyskano dla obręczy kół oryginalnych oraz obręczy regenerowanych przez spawanie z chłodzeniem mikro-jet.

Przedstawione wyniki badań potwierdzają, że zawarta w pracy teza o zastosowaniu w procesie spawania regeneracyjnego obręczy ze stopów aluminium (AlSi11) wpływa znacząco na właściwości użytkowe, co może prowadzić do istotnego wydłużenia czasu ich eksploatacji.

Zamieszczone w pracy wyniki badań są bardzo interesujące i zasługują na dużą uwagę. Zawierają one szereg cennych danych, zwłaszcza w obszarze badań złączy spawanych ze stopów aluminium chłodzonych systemem mikrodysz. Szeroka grupa parametrów chłodzenia systemu mikro-jet daje duże możliwości sterowania procesem chłodzenia spawanych materiałów co sprawia, że przedstawione rozwiązanie technologiczne może być zastosowane w stosunku do innych grup materiałów spawanych.

Do najważniejszych osiągnięć w pracy zaliczyć należy:

- Zbudowanie stanowiska badawczego do spawania materiałów z wykorzystaniem przystawki chłodzącej składającej się z systemu mikrodysz (mikro-jet),
- Opisanie i dobór właściwych parametrów systemu chłodzenia mikro-jet przy spawaniu stali niestopowych S235, które mogą wpływać na strukturę i właściwości złączy spawanych (badania wstępne),
- Określenie wpływu parametrów chłodzenia systemu mikro-jet na rozdrobnienie struktury i podwyższenie właściwości plastycznych stopu AlSi11 z wykorzystaniem metod planowania eksperymentu oraz analizy statystycznej.
- Wykazanie, że złącza spawane ze stopu AlSi11 z jednoczesnym chłodzeniem mikro-jet wykazują korzystniejszą strukturę i lepsze właściwości plastyczne w stosunku do złączy spawanych bez układu chłodzenia.
- Wykonanie badań porównawczych w warunkach rzeczywistego cyklicznego obciążenia kół pojazdów ze stopów aluminium w wersji oryginalnej oraz po spawaniu regeneracyjnym z oraz bez chłodzenia mikro-jet oraz wykazanie korzystnego wpływu zastosowanego systemu chłodzenia na trwałość eksploatacyjną spawanych obręczy kół.

Należy podkreślić bardzo dużą liczbę wykonanych próbek oraz przeprowadzonych badań i pomiarów. Autor przeprowadził dyskusję otrzymanych wyników, z których wyciągnął wnioski umożliwiające uzyskanie założonych celów pracy oraz udowodnienie postawionej w pracy tezy.

Pomimo dobrego odbioru prezentowanego materiału, lektura tej części pracy nasunęła mi także kilka pytań i uwag związanych z pracą:

- Str. 86. W jaki sposób wyliczono, że rozdrobnienie fazy β w spoinie jest większe o 50% dla obręczy VW i o 55% dla obręczy Daewoo w stosunku do obręczy spawanych bez chłodzenia?
- Str. 92. Cyt.: „i umownej granicy plastyczności na poziomie ok. 190 MPa” – powinno być ok. 98 MPa.
- Str.93. Tab.38. Wskazane byłoby podanie odchylenie standardowego wyników zawartych w tabeli.
- Str. 107 i 108. Wskazane byłoby pokazanie radiogramów z niezgodnościami dla obu złączy spawanych – z chłodzeniem mikro-jet oraz bez tego chłodzenia. Nie podano przy zamieszczonych radiogramach czy pochodziły od złączy spawanych z systemem chłodzenia czy też bez tego systemu.
- Str.115. „Podczas gdy każde z 5 kół spawanychbez chłodzenia mikro-jetowego uległo uszkodzeniu w czasie badania.....” Z tabeli 47 wynika, że jedno koło (pierwsze) nie uległo uszkodzeniu.
- W jaki sposób dobrano odległość dyszy chłodzącej mikro-jet od uchwytu do spawania? Warunki topienia przy spawaniu stali niestopowej są różne niż dla stopów aluminium. Wydaje się więc, że odległość dyszy chłodzącej mikro-jet od uchwytu do spawania może również mieć wpływ na strukturę otrzymanego złącza. Czy badano wpływ tej odległości na strukturę złącza spawanego?
- Str. 118. Wniosek nr 1. Wydaje mi się, że niestety, ale w przypadku napraw regeneracyjnych kół aluminiowych warsztat naprawczy wybierze najtańszą metodę spawania regeneracyjnego i nie będzie zainteresowany inwestycją w stanowisko z dyszą chłodzącą mikro-jet co nie znaczy, że ta technologia nie mogłaby znaleźć zastosowania w innych obszarach przemysłu do regeneracji części maszyn.
- Str. 119. Wniosek nr 5. Tutaj w zasadzie należałoby doprecyzować, że w przypadku stali możemy sterować rodzajem struktury i wielkością ziarna, a w przypadku stopów aluminium sterujemy w zasadzie głównie wielkością ziarna.
- Str. 119. Wniosek nr 8. „Uzyskują one wytrzymałość zmęczeniową wyższą o ok. 3 mln cykli”. (styl) Wytrzymałość zmęczeniowa podawana jest w postaci naprężenia (jest to największa wartość naprężenia maksymalnego, przy której ulega zniszczeniu próbka po umownie przyjętej liczbie cykli zmęczeniowych)
- Jakie dalsze przewidywane i potencjalne kierunki badań związane z zaprezentowaną metodą spawania z chłodzeniem mikro-jet mógłby Autor zaproponować?

Pozostałe błędy napotkane w pracy (głównie o charakterze, edycyjnym, stylistycznym):

- Str.17. „strefy wpływu ciepła”, strefy wpływu ciepła
- Str. 35. „nie będących dotychczas stosowanych” – styl.
- Str. 38. „po spawaniu stali niskostopowej” powinno być niestopowej

- Str.93. „stosując duszę chłodzącą” - błąd literowy
- Str. 115,116,118 i w wielu innych miejscach „można stanowczo stwierdzić” (styl) albo coś stwierdzamy albo nie – albo coś zostało potwierdzone/wyjaśnione itp. albo nie
- Str. 115. „w wykorzystaniem”, „są znacznie wyższe o”, błędy literowe
- Str.116. „przebieg twardości przebiegał...”, (styl)

Zamieszczone powyżej uwagi mają w dużej mierze charakter dyskusyjny lub wyjaśniający i nie zmieniają pozytywnego odbioru całej pracy, którą oceniam jako dobrą i wartościową.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zawarte w ustawie o stopniach i tytułach naukowych. Jej tematyka mieści się w obszarze dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn. Stanowi rozwiązanie nowego zagadnienia o charakterze naukowym. Postawione w pracy cele zostały osiągnięte, a sformułowana teza udowodniona. Autor pracy wykazał się umiejętnością prowadzenia samodzielnej pracy badawczej. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie pracy do obrony publicznej.

