

Gdańsk 16 stycznia 2025 r.

Recenzja pracy doktorskiej mgr-a inż. Krzysztofa Chyły

Tytuł pracy doktorskiej:

Wykorzystanie metody FSW w łączeniu komponentów metalowych struktur foteli samochodowych.

Promotor:

prof. dr hab. inż. Krzysztof Gaska

Niniejsza recenzja została sporządzona jako odpowiedź na uchwałę Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wydziału Mechaniczno - Technologicznego Politechniki Śląskiej z dnia 23.10.2024 r. (RDIMe.512.6.2024).

Celem recenzji jest stwierdzenie, czy przedłożone opracowanie wyczerpuje kryteria, jakie muszą spełniać rozprawy doktorskie na terenie Rzeczypospolitej Polskiej w myśl art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Przepis ten stawia wymóg, aby praca doktorska stanowiła prezentację ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w co najmniej jednej dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, lub artystycznej. Konieczne jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, zastosowanie praktyczne własnych wyników badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej, czy dokonanie artystyczne. Praca przedstawiana w charakterze rozprawy doktorskiej może mieć postać jednolitego tematycznie opracowania monograficznego, serii powiązanych artykułów naukowych, opracowania projektowego, konstrukcyjnego, technologicznego, wdrożenia lub dzieła artystycznego. Dopuszczalny jest również przypadek przedłożenia samodzielnej i wyodrębnionej części pracy zbiorowej.

Z zapisów ustawy wynikają więc podstawowe kryteria oceny, które zostały zastosowane w przygotowanej opinii:

- 1) Czy przedłożona rozprawa przedstawia ogólną wiedzę teoretyczną kandydata do nadania stopnia doktora w wybranej dyscyplinie (dyscyplinach)?;
- 2) Czy przedłożona rozprawa zawiera wystarczające dowody na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez kandydata do nadania stopnia doktora?;
- 3) Czy rozprawa dokumentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne zastosowanie praktyczne wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo dokonanie artystyczne, również oryginalne?

1. Wybór tematu badawczego

Temat odnosi się do zagadnienia zakorzenionego w technologii produkcji podzespołów metalowych, wykorzystywanych w motoryzacji. Autor podejmuje zagadnienie zastosowania zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (ang. Friction Stir Welding – FSW) do realizacji połączeń w obrębie niskoobciążonych elementów foteli samochodowych. Dobór metody łączenia elementów metalowych został wskazany jako potencjalna efektywna i uzasadniona ekonomicznie, a także względami ekologicznymi (redukcja energochłonności) alternatywa dla spawania, a także innych metod zgrzewania. Jednocześnie słusznie podnoszona jest kwestia problemów technologicznych, na jakie napotyka się podczas spawania stopów aluminium.

Metoda FSW, jako opracowana stosunkowo niedawno (pierwszy patent w 1991 roku), nadal jest stosowana jedynie w ograniczonym zakresie w niewielu zastosowaniach przemysłowych. Aktualnie, głównie w przemyśle kosmicznym,

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 29.01.2025
RDIMe/8457/2025

CU zał.....

przy czym w porównaniu z innymi, dojrzałszymi metodami zgrzewania można mówić o stałym niedoborze wiedzy o charakterze naukowym i technologicznym, odnośnie właściwych parametrów procesu i przewidywanej jakości połączenia. Z tej perspektywy można z pewnością mówić o prawidłowym doborze tematyki, szczególnie w odniesieniu do pracy doktorskiej o charakterze wdrożeniowym. Opracowanie stanowi poszerzenie zasobu wiedzy, zarówno w sensie czysto poznawczym, jak i użytkowym.

2. Opis ogólny pracy

Oceniana praca została napisana w języku polskim, ze streszczeniem w języku angielskim. Ma postać jednolitego maszynopisu, stanowiącego sprawozdanie z wykonanych prac, włącznie z przygotowaniem teoretycznym, praktycznym i elementami logicznego wnioskowania na podstawie wyników.

Opracowanie ma charakter monograficzny i zawiera opis poszczególnych etapów i czynności szczegółowych wykonanych w toku realizacji zadania. Tekst obejmuje łącznie 148 stron maszynopisu, podzielonych na łącznie 10 rozdziałów oraz streszczenie i wstęp na początku, które zamieszczono bez oznaczania punktacją numerowaną. Ostatnim rozdziałem, zawierającym właściwą, merytoryczną część pracy jest rozdział 6 *Posumowanie i wnioski końcowe*, który kończy się na 87 stronie opracowania. Kolejne części pracy odnoszą się do spisu literatury, tabel, rysunków oraz obejmują załączniki ze szczegółowymi wynikami pomiarów wytrzymałości i twardości, przeprowadzonych w celu oceny jakości wykonanych spoin.

Lektura opracowania jest interesująca, głównie z powodu podjętej tematyki, związanej z ciekawą techniką łączenia elementów metalowych, będącą aktualnie w fazie dynamicznego rozwoju. FSW stanowi aktualnie najbardziej innowacyjną technologię trwałego łączenia materiałów metalowych bez elementów pośrednich, przy zachowaniu wysokiej jakości spoiny i ciągłości materiału. Największą zaletą metody jest możliwość uzyskiwania dobrych rezultatów na materiałach, których łączenie, np. spawanie, innymi metodami jest bardzo trudne. Przykładem jest spajanie wysokowytrzymałych stopów aluminium, których spawanie np. metodą TIG łączy się z wysokim ryzykiem powstania siatki mikropełnięć w spoinie, bardzo znaczną utratą wytrzymałości i brakiem szczelności.

Objętość przeglądu literatury jest zadowalająca, a dobór źródeł prawidłowy, ściśle odpowiadający tematyce pracy, przy czym przywołane pozycje obejmują technologię FSW przekrojowo, począwszy od pierwszego, źródłowego patentu PCT/GB92/02203 z 1991 roku, aż po najświeższe pozycje dostępne na świecie. Z pewnością można stwierdzić, że Autor starał się dogłębnie przeanalizować aktualny stan wiedzy i dotrzeć do wszelkich dostępnych wyników. Cytowanie poszczególnych prac w tekście jest jednoznaczne i konsekwentne, a także adekwatne merytorycznie. Numeracja cytowanych prac w spisie nie jest chronologiczna, jednak nie stanowi to przeszkody w odbiorze przedłożonej dysertacji.

W dalszej części (rozdział 3 *Problem badawczy i zakres pracy*) podjęto próbę uszczegółowionego sformułowania zadania i przedstawienia celu, bądź też pracy, jednak bardziej precyzyjne wyrażenie tego elementu z pewnością było możliwe i dałoby pracy dodatkową wartość. Mówiąc wprost, należy zawsze pamiętać, że część sprawozdania, w której wyraża się fundamentalną treść celu, czy powodu podjęcia zadania musi być jednoznaczna, konkretna, prosta i prawidłowo zaadresowana pojęciowo. Autor pisze „Problem badawczy dotyczy uzyskania efektywności złącza na poziomie co najmniej 70%”, chociaż akurat to jest właśnie najważniejszy cel tej pracy. Wprawdzie w żadnym miejscu rozprawy nie wyjaśniono, dla czego akurat taka minimalna wartość efektywności złącza jest wymagana, jednak zakładam, że w konkretnym zastosowaniu jest to minimum, warunkujące pomyślną eksploatację fotela samochodowego.

Zamieszczony w końcowej części rozdziału 3 fragment zatytułowany *Układ logiczny pracy* zyskałby na zawarciu w nim, najlepiej zaraz po przeglądzie literatury, przejrzystego sformułowania celu badań i też badawczych, czego nie uczyniono.

Pod względem fundamentalnej metodyki pracy naukowej przedstawione opracowanie posiada pewne mankamenty, które wymagają komentarza i z pewnością zasługują na wyjaśnienia ze strony Autora. Za najważniejszą kwestię uważam opis doboru parametrów badań i liczebność kombinacji tych parametrów, jakie zostały opisane w pracy. Oczywiście jest, że podstawowymi parametrami procesu FSW są prędkość obrotowa i posuw narzędzia, jednocześnie istotny jest kształt końcówki roboczej narzędzia, który może mieć decydujący wpływ na pomyślną realizację zgrzewania. W pracy przedstawiono wyniki testów dla sześciu (6) różnych kombinacji prędkość obrotowa/posuw narzędzia. Zastosowano też dwa narzędzia o odmiennych kształtach części roboczej. Pomimo drobiazgowej lektury pracy nie udało mi się znaleźć żadnych wskazówek odnośnie procesu rozumowania, który doprowadził do wyboru trzech prędkości obrotowych i trzech posuwów, zastosowanych w badaniach przeprowadzonych przez Autora. Nie zauważyłem również wyjaśnienia, odnośnie metodyki doboru kształtu samego narzędzia. Naturalnie, we wcześniejszej części, przeglądzie stanu wiedzy, został zamieszczony opis zakresów wartości tych dwóch parametrów roboczych, a także sił osiowej, działającej na narzędzie, oraz stosowanych obecnie narzędzi, jednak nie wskazano czy i jak te informacje przyczyniły się do ustalenia warunków badań.

Jako istotny mankament pracy muszę wskazać również brak możliwości zweryfikowania całkowitej liczebności populacji prób, które stanowiły właściwy program badań. Przedstawione wykresy i zestawienia danych pokazują jedynie wyniki w zależności od przyjętych kombinacji parametrów roboczych procesu (prędkość obrotowa/posuw narzędzia), których było łącznie sześć. Brak informacji o powtórzeniach testów dla każdej z kombinacji w programie badań utrudnia wyrobienie sobie poglądu na kwestię powtarzalności rezultatów zgrzewania w przyjętych przez Autora warunkach.

Nie znalazłem bardzo wyraźnego wskazania, na czym polega wdrożenie w zaprezentowanej pracy. Można się domyślać, że zaprojektowane narzędzia, albo przynajmniej jedno z nich, znajdą zastosowanie w praktyce przemysłowej, lub dalszych badaniach pilotażowych. Podobnie, w tytule pracy mówi się o łączeniu „komponentów metalowych struktur foteli samochodowych”. W pracy przedstawiono wyniki łączenia metodą FSW par prostokątnych kawałków blachy duraluminiowej. Według mojej oceny, praca nie zawiera jednoznacznego wyjaśnienia, jaki jest związek tych próbek z rzeczywistymi fotelami samochodowymi. W pracy wdrożeniowej takie informacje zasługują na bardzo wyraźne wyeksponowanie.

Zaskakujący jest brak wzmianki w przedstawionej dysertacji o istnieniu ciekawej, wcześniejszej publikacji, związanej z techniką FSW, gdzie p. mgr inż. Krzysztof Chyła jest głównym autorem:

Krzysztof Chyła, Krzysztof Gaska, Anna Gronba-Chyła, Agnieszka Generowicz, Katarzyna Grąz, Józef Ciula. 2023. "Advanced Analytical Methods of the Analysis of Friction Stir Welding Process (FSW) of Aluminum Sheets Used in the Automotive Industry" *Materials* 16, no. 14: 5116. <https://doi.org/10.3390/ma16145116>

Wspomniany artykuł opisuje badania, które można śmiało nazwać komplementarnymi do przedstawionych w opracowaniu przedłożonym jako rozprawa doktorska, co jest tym cenniejsze, że w obu przypadkach wykorzystano ten sam sprzęt do realizacji testowych połączeń z wykorzystaniem techniki FSW. Powstawanie w trakcie realizacji prac doktorskich artykułów naukowych jest zupełnie naturalne i zasługuje na pochwałę, więc nie było powodu, żeby nie wzbogacić samej dysertacji o wiedzę opisaną w artykule. Zespół wieloosobowy również nie ma negatywnego wpływu na sprawę samego doktoratu, ponieważ Doktorant ma prawo i obowiązek poszerzać swoją wiedzę i umiejętności, łącznie z tymi, potrzebnymi do pracy w grupie. W przypadku prac realizowanych przez wielu autorów łatwo jest wykazać jaki jest indywidualny wkład każdego z uczestników, co pozwala na swobodne dysponowanie dorobkiem przez każdego z Autorów, również w postępowaniach awansowych. Łączna lektura powyższego artykułu i przedłożonego jako rozprawa doktorska maszynopisu skłania do ogólnie pozytywnej oceny dorobku Kandydata do stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

W toku lektury pracy zauważyłem wiele drobniejszych kwestii, wymagających w mojej ocenie uwagi Autora, a w części przypadków wyjaśnień. Szczegółowe zestawienie zauważonych zagadnień tego typu zostało umieszczone w Załączniku 1.

3. Ocena zgodności pracy z wymaganiami formalnymi

Praca spełnia kryteria sformułowane w art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Kryterium przedstawienia w pracy ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata do nadania stopnia doktora w wybranej dyscyplinie, tj. inżynierii mechanicznej jest spełnione. Autor wykazał się co najmniej wystarczającą kompetencją w zakresie sztuki inżynierskiej, połączonej ze zrozumieniem fundamentalnych zjawisk i procesów fizycznych, decydujących o funkcjonowaniu systemów mechanicznych. Zakres analiz, drobiazgowość podejście do przeglądu i oceny aktualnego stanu wiedzy, w odniesieniu do problematyki badawczej i konstrukcyjnej

Kryterium zadowalającego udowodnienia przez Kandydata umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej również zostało spełnione. Autor udokumentował przygotowanie i realizację badań o charakterze naukowego poszukiwania odpowiedzi na postawione tezy, czy też odpowiednie do zadania związanego z technicznym zastosowaniem procesów fizycznych w kontrolowanych warunkach, a także przedstawił wyniki i analizę przeprowadzonych doświadczeń, kończąc całość syntetycznymi wnioskami.

Kwestia udokumentowania osiągnięć wyczerpujących cechy oryginalności jest spełniona. Autor porusza się w obrębie wybranego zakresu technologii spajania, podejmując próbę rozwoju jednej z metod, co jest udokumentowane poprzez przedstawienie własnego eksperymentu, włącznie z narzędziami do realizacji procesu FSW na próbkach o wybranej przez Autora geometrii. Ponadto przedstawiono autorski zakres i metodykę badawczą – wkład w dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna.

Podsumowując, stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Chyły z roku 2024 pod tytułem: *Wykorzystanie metody FSW w łączeniu komponentów metalowych struktur foteli samochodowych* spełnia w zadowalającym stopniu wymagania ustawowe stawiane pracy tego stopnia na terenie Rzeczypospolitej Polskiej.

Dr hab. inż. Jacek Igor Łubiński, prof. PG

Prof. J. Łubiński

Załączniki:

/podpis odręczny/

Załącznik 1 Uwagi szczegółowe.

*wylączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)

Załącznik 1 Uwagi szczegółowe

1. Str. 5, Ostatnie zdanie polskiej wersji streszczenia jest sformułowane z podwójnym użyciem słowa „metoda” w sposób, który czyni odbiór przekazu nieco problematycznym. Ponadto Autor pisze o „łączeniu prototypowych elementów konstrukcyjnych foteli samochodowych”, czy nie chodziło o *łączenie elementów konstrukcyjnych prototypowych foteli samochodowych*? Poza tym, domyślam się, że docelowo metoda FSW ma znaleźć zastosowanie w produkcji seryjnej.
2. Str. 7, linia 6 od góry: Autor opisuje wytrzymałość mechaniczną aluminium jako „doskonałą”, co jest sformułowaniem nietechnicznym i z tego powodu nie stosuje się go w takim kontekście. W tym miejscu lepsze byłoby sformułowanie „zadowalającą”, lub „odpowiednio wysoką”.
3. Str. 7, linia 4 od dołu: jest „niższa od temperatury materiałów”, powinno być „niższa od temperatury topnienia materiałów”.
4. Str. 8, ostatnie zdanie: Autor pisze o „optymalizacji”, co jest sformułowaniem ryzykownym, ze względu na ścisły matematyczny sens, szczególnie istotny w przypadku zadań naukowych i inżynierskich. Zadanie optymalizacji wiąże się z zastosowaniem matematycznego aparatu optymalizacji, którego w przedstawionej pracy nie znalazłem. Domyślam się, że chodziło tu o doświadczalne poszukiwanie najkorzystniejszych parametrów zgrzewania w odniesieniu do analizowanej kombinacji materiał – technologia łączenia.
5. Str. 10, ostatnie zdanie: Materiał nie ma „właściwości antykorozyjnych i zmęczeniowych”. Ma odporność na korozję i trwałość zmęczeniową w danych warunkach.
6. Str. 11, linia 11: nie rozumiem pojęcia zachowania wyboczeniowego. W polskiej nomenklaturze technicznej i naukowej wyboczenie ma znaczenie ścisłe, które w tym kontekście nie ma zastosowania. Czy chodzi o deformacje związane z naprężeniami resztkowymi w połączonych elementach, wynikające z wpływu ciepła na materiał rodzimy i obszar spoiny?
7. Str. 13, Wyrażenie „- generowanie temperatury podczas zgrzewania,” powinno mówić o *generowaniu ciepła*. Temperatura może być miarą intensywności wydzielania ciepła w wyniku tarcia i deformacji plastycznej materiału.
8. Str. 13, Wyrażenie „- wytworzenie tej samej siły osiowej w obszarze spoiny” jest bardzo mgliste. W całej pracy nie znalazłem informacji o wartości siły osiowej, działającej między narzędziem, a materiałem. Nie zostało wyjaśnione czy ta wartość podlega kontroli, czy rejestracji i czy w ogóle istnieje taka potrzeba. Czy chodzi o stałość siły osiowej podczas całego przejścia narzędzia wzdłuż linii tworzonej spoiny? Jak można zapewnić takie warunki podczas zgrzewania?
9. Str. 13, Wyrażenie „- osiągnięcie dobrej prędkości spawania” ponownie jest bardzo nieprecyzyjne. Czy chodzi o ‘zadowalającą’ prędkość? Poza tym praca traktuje o procesie zgrzewania, a nie spawania. Rozumiem, że w nomenklaturze anglojęzycznej słowo ‘welding’ obejmuje oba wspomniane procesy, jednak oceniana praca jest pisana w języku polskim, a to zobowiązuje, tym bardziej, że już 4 linie niżej Autor pisze o „prędkości zgrzewania”.
10. Str. 15, tabela 2.3, Sformułowanie „można obecnie spawać metodą zgrzewania tarcowego z przemieszczeniem” wymaga sprostowania. Nie można spawać metodą zgrzewania. Można ‘łączyć metodą zgrzewania’.
11. Str. 16, przedostatni podpunkt: „- temperatura wytwarzana przez narzędzie nie będzie wystarczająca do uplastycznienia metali”.
Czy chodzi o to, że ze względu na temperaturę uplastycznienia stali, w stosunku do tej temperatury dla stopów aluminium, trudniej jest uplastyczyć stal, niż stopy aluminium? Poza tym, narzędzie nie „wytwarza temperatury”, bo temperatura jest parametrem stanu. Ruch narzędzia powoduje wytwarzanie ciepła w strefie styku tarcowego, co wywołuje wzrost temperatury.

12. Str. 16, ostatni podpunkt: „- prędkości spawania są dużo mniejsze, niż w przypadku stopów aluminium, ze względu na dużą twardość stali,”.
Praca traktuje o zgrzewaniu, więc nie można na jednej liście, bez żadnego komentarza używać nazw dwóch różnych procesów spajania metali zamiennie. Ponadto, chyba jednak akurat twardość stali nie jest decydująca w opisywanym procesie.
13. Str. 17, pierwszy podpunkt: „- stopień uszkodzenia narzędzi jest bardzo duży...”.
Sformułowanie nieprecyzyjne. Jak zdefiniowany jest ten „stopień”? Czy chodzi o głębokość zużycia, zmianę chropowatości, utratę masy, przekroju, czy zmianę profilu końcówki narzędzia? Może chodzi o to, że zużycie narzędzi postępuje bardzo szybko?
14. Str. 19, wiersz 8, W zdaniu opisującym gęstość czystego aluminium Autor pisze „lekki metal”. W polskiej nomenklaturze mówi się o ‘metalach lekkich’, podobnie jak o metalach ciężkich, metalach szlachetnych itd..
15. Str. 21, wiersz 9, Autor pisze: „Zdolności żarowytrzymałe siluminów ...”. Chyba chodzi tu o ‘własności żarowytrzymałe’, albo po prostu o ‘żarowytrzymałość’ ?
16. Str. 21, wiersz 20, Autor pisze: „Charakteryzują się one dobrymi właściwościami obróbki ubytkowej umożliwiając wytwarzanie różnorodnych odlewów, ...”.
Czy chodzi o ‘obrabialność’? W tym przypadku przez skrawanie, na przykład. Akurat obrabialność przez skrawanie nie ma związku z podatnością na formowanie z wykorzystaniem technik odlewniczych. W tym przypadku ważniejsza jest lejuć. Proszę o wyjaśnienie o jakie właściwości opisywanych stopów aluminium chodzi w tym miejscu pracy.
17. Str. 21, wiersz przedostatni: „Zwiększona zawartość magnezu w stopach serii 5xxx przyspiesza ich utlenianie, co negatywnie wpływa na spawalność.”.
Proszę o doprecyzowanie, czy chodzi o utlenianie w każdych warunkach, np. o podatność na korozję atmosferyczną, czy też akurat w tym przypadku istotna jest podwyższona podatność na utlenianie w podwyższonych temperaturach?
18. Str. 23, sekcja *Cele badawcze*.
Jako cel nr 1 Autor podaje „Wzrost efektywności procesu spajania elementów metalowych...”, co wydaje się raczej być zamierzonym skutkiem części wdrożeniowej doktoratu. Celem jest analiza przebiegu i skutków procesu FSW prowadzonego na wybranych materiałach przy obserwacji wielu parametrów, co ma pozwolić na zaobserwowanie związków przyczynowo – skutkowych dla tego procesu, w wybranym zakresie warunków.
Jako cel nr 2 Autor podaje „Zaprojektowanie narzędzi do zgrzewania FSW (stal Vanadis 23) oraz, analiza wpływu kąta przyłożenia kołnierza narzędzia na jakość spoiny”. Ponownie, projektowanie narzędzia jest środkiem do osiągnięcia celu badawczego, natomiast już ocena, czy też analiza wpływu kąta przyłożenia narzędzia na jakość spoiny może być celem badawczym.
19. Str. 24, Przedstawiony układ logiczny pracy jest bardzo cenną częścią pracy i generalnie koresponduje z resztą pracy, jednak brakuje bardzo istotnego punktu odnośnie formułowania celu badań, tezy badawczej i zakresu badań. Co jest ważne, szczególnie że te kroki zostały w pracy zaznaczone. Ponadto, na tej samej stronie Autor wymienia, pośród planowanych analiz wyników badań, pomiary twardości „trzcieni ze stopu Vanadis 23”. Uważam, że wystarczy napisać o ‘narzędziu’, którym w tym przypadku jest trzcień o specjalnej konstrukcji. Trzcień ze stopu Vanadis 23 może mieć bardzo wiele postaci konstrukcyjnych i służyć do różnych zastosowań.
20. Str. 25, wiersz 4, Stężenie Mg w stopie aluminium 2024 T3 zostało podane jako obejmujące zakres 1.2 – 18 %. Z pewnością chodzi tu o 1,8 %. Ponadto, w polskiej nomenklaturze znakiem dziesiętny jest przecinek, a nie kropka.
21. Str. 25, wiersz 7, poniżej tabeli 4.1. Błąd ortograficzny – wyżarzony, nie „wyżażony”.

22. Str. 26, wiersz 4, poniżej tabeli. Autor pisze o łączeniu dwóch „podobnych” arkuszy materiału. Z fotografii zamieszczonej jako *Rysunek 4.2* na str. 27 wynika, że arkusze łączone są identyczne. Wspomniana fotografia ma bardzo ciemną tonację. Być może jest to wina techniki drukarskiej, jednak trudno oprzeć się wrażeniu, że fotografię wykonano ‘pod światło’ (na drugim planie fotografii widać okno), co spowodowało zaciemnienie istotnej części obrazu.
23. Str. 26, wiersz 5, poniżej tabeli. Autor pisze o użyciu zmodyfikowanej frezarki, jako urządzenia, na którym realizowanej jest zgrzewanie. Jakich modyfikacji wymagała frezarka?
24. Str. 27, wiersz 2, poniżej *Rysunku 4.2*, Autor pisze: „Narzędzie obracało się zgodnie ze wskazaniem wskazówek zegara.”. Możliwy jest ruch ‘zgodny z ruchem wskazówek zegara’ (ang. *clockwise*). Wskazanie wskazówek zegara oznacza pewien punkt na osi czasu, np. godzinę 12:31.
25. Str. 27 i 28, rysunki 4.3 i 4.4. Fotografie bardzo ciemne i trudno czytelne. Rysunki techniczne narzędzi w tym przypadku wymagały przedstawienia końcówki jako szczegółu powiększonego, przy czym końcówkę narzędzia z ujemnym kątem przylegania należało przedstawić w obrębie powiększonego szczegółu jako przekrój i nie wykonywać przekroju całościowego narzędzia, bo taki przekrój niewiele ilustruje.
26. Str. 28, wiersz 2, poniżej *Rysunku 4.4*, Autor pisze o „prędkości posuwu”, jako ważnym parametrze zgrzewania. Dalej prędkość posuwu podana jest w tabeli 4.3. Czy ta prędkość i ‘prędkość zgrzewania’, na którą Autor powołuje się w dalszej części pracy są tożsame? Jeżeli tak, to należy tę kwestię wyjaśnić i stosować konsekwentne nazewnictwo. Podane w przywołanej tabeli kombinacje prędkości obrotowej narzędzia i prędkości posuwu narzędzia są kluczowe dla całości pracy badawczej i uzyskanych wyników, natomiast nie znalazłem w pracy uzasadnienia dla takiego wyboru. Proszę o wyjaśnienie skąd wzięły się akurat takie parametry?
27. Str. 31, *Rysunek 4.7*. Sposób przedstawienia przebiegu złącza zgrzewanego jest słabo skorelowany z miniaturowym rysunkiem próbki. Właściwie, rysunek nie daje pewności, że spoina, jak należałoby się spodziewać, biegnie w poprzek części przewężonej na próbce do zrywania. Można było w łatwy sposób, posługując się dostępnymi w rysunku technicznym metodami, przedstawić te obiekty w znacznie bardziej czytelny sposób. Czy dobrze zgaduję, że zgrzeina na próbkach do zrywania była zlokalizowana w połowie długości próbki i biegła w poprzek próbki?
28. Str. 31, punkt 4.3 a, pierwsze zdanie, Autor opisuje sposób wycięcia próbek, jednak akurat w tym miejscu znacznie lepszą ilustracją byłyby rysunki techniczne prefabrykatu – blach po zgrzaniu i przed obróbką, oraz gotowych próbek. Ewentualnie prefabrykatu z zaznaczonym na powierzchni konturem próbki po wycięciu.
29. Str. 32, rysunek 4.8, *Rysunek* nie odzwierciedla geometrii próbki i położenia zgrzeiny, a sposób przedstawienia położenia punktów pomiarowych sugeruje, że pomiary zostały wykonane wyłącznie na końcowym odcinku próbki. W dalszej części pracy zamieszczono *rysunek 4.11*, opisujący metodykę pomiaru chropowatości złącza zgrzewanego, który mógłby, po odpowiednim uzupełnieniu i zmianach, posłużyć jako baza dla rysunku odwołującego się do pomiarów twardości na powierzchni złącza i w jego otoczeniu. Przedstawione na kolejnych rysunkach (4.9 i 4.10) lokalizacje punktów pomiaru twardości na powierzchniach narzędzia są, dla odmiany, bardzo dobrą ilustracją metodyki pomiaru w odniesieniu do kontroli stanu narzędzia.
30. Str. 33, punkt 4.5 *Badania metalograficzne*. Autor pisze w pierwszym zdaniu podrozdziału o próbkach przygotowywanych do badań „makroskopowych”, podczas gdy dalej, w tym samym akapicie, 8 linii poniżej opisuje jako narzędzie badawcze mikroskop stereoskopowy Olympus X-TR. Proszę o wyjaśnienie ponieważ w badaniach spoin stosuje się również oględziny makroskopowe.
31. Str. 34, ostatnie zdanie punktu 4.5 *Badania metalograficzne*. Autor pisze o „procesie spawania”, podczas gdy cała praca dotyczy zgrzewania. Proszę o wyjaśnienie czy jest tu jakiś ukryty sens, czy tylko zwyczajny błąd piśmienniczy?

32. Str. 37, linia 4 od dołu strony, Autor misze o „najbardziej optymalnej prędkości obrotowej”. W języku łacińskim słowo *optimus* oznacza ‘najlepszy’, a jako taki niepodlegający już stopniowaniu. To znaczenie jest również uznawane za obowiązujące w języku polskim. Apeluję do Autora to uznanie tej zasady za wartą stosowania.
33. Str. 39, rysunek 5.4, Opis osi pionowej brzmi „Prędkość obrotowa obr/min”, podczas gdy powinno być ‘Siła zrywająca kN’, podobnie jak na rysunku poprzedzającym i dwóch dalszych.
34. Str. 41, linia 2, Autor stosuje do opisu wyników słowo “dewiacja”, które w fizyce i technice ma typowo znaczenie zarezerwowane dla błędów wskazań kompasu magnetycznego. Wydaje mi się, że taki opis wyników brzmi niefortunnie. Proszę o zaproponowanie innego opisu.
35. Str. 44, podpunkt 5.2.1. *Twardość złącza FSW*. Druga linia tekstu. Autor pisze o „górnej powierzchni złącza”. Czy nie chodzi tu o ‘lico złącza zgrzewanego’? Powierzchnia górna, w przypadku niewielkiej próbki wykonanej z płaskiego fragmentu blachy jest sprawą względną.
36. Str. 50 do 56, rozmieszczenie wykresów, przedstawiających wartości twardości mierzonych w poprzek spoiny wraz ze strefą wpływu ciepła. Przedstawione wykresy zawierają wyniki pomiarów dla par próbek wykonanych przy tych samych prędkościach obrotowych, jednak narzędziami A i B. Wykresy zostały rozmieszczone w przedstawionym maszynopisie w taki sposób, że wykresy dla tej samej prędkości obrotowej nie znajdują się na tej samej stronie, co utrudnia porównanie, bo w najbliższym sąsiedztwie znajdują się wykresy dla różnych prędkości i różnych narzędzi. Uważam ten fakt za istotny błąd edycyjny.
37. Str. 59, wykresy na rysunkach 5.12 i 5.13, Uważam, że przedstawienie tych wyników w postaci wykresu nie jest właściwe. Podane wartości twardości zostały zmierzone na trzech różnych powierzchniach końcówki roboczej narzędzia i nie ma żadnej gwarancji, że między tymi wartościami zachodzi jakaś relacja o charakterze zbliżonym do nałożonej krzywej aproksymacyjnej. Podobny zabieg wykonany w przypadku wykresów na str. 58, gdzie podano wartości twardości zmierzonych na walcowej, bocznej części trzpienia (części chwytowej), wydają się bardziej uzasadnione z uwagi na ciągłość geometryczną powierzchni. Proszę o komentarz.
38. Str. 60, podpunkt 5.3.1. *Badania makro oraz mikroskopowe*. Autor pisze o zidentyfikowanych w trakcie badań opisanych w tej części pracy struktur o znanym sobie składzie chemicznym, np. CuAl_2 , wskazuje też na istnienie w obserwowanym zgładzie metalograficznym międzymetalicznych struktur złożonych z Cu, Mg i Al itp.. Proszę o bardziej obszernie wyjaśnienie na jakiej podstawie Autor formułuje takie wnioski.
39. Str. 61, Autor przedstawia opis prawdopodobnego mechanizmu fizycznego, warunkującego powstawanie pęcherzy gazowych w złączy wykonanym techniką FSW. Wskazane są takie czynniki jak prędkość zgrzewania, przepływ ciepła, szybkość chłodzenia, temperatura szczytowa procesu, czy przepływ materiału. Pierwsza uwaga w tym miejscu odnosi się do nazewnictwa parametru procesu. Autor używa zamiennie pojęć ‘prędkość zgrzewania’ (gdzieś tam zamieniana na ‘prędkość spawania’, co akurat w tej pracy jest nieprawidłowe) i ‘posuw’, albo ‘prędkość posuwu’ (patrz Rysunek 5.15). Nigdzie nie znalazłem wytłumaczenia, wskazującego na identyczność znaczeniową tych sformułowań, co uważam za błąd. Konsekwentne nazewnictwo w pracy technicznej i naukowej jest niezbędne. Ponadto, rozważania dotyczące przepływu ciepła i wartości temperatury szczytowej procesu uważam za dość powierzchowne. Przede wszystkim, w spawalnictwie kluczowe są pojęcia liniowej energii spawania (w tym przypadku można mówić o liniowej energii zgrzewania), a w przedstawionej pracy nie ma żadnych, nawet bardzo przybliżonych szacunków odnośnie mocy zaangażowanej do realizacji procesu (ilość energii na jednostkę czasu, proporcjonalna do strumienia ciepła wprowadzanego do strefy zgrzewania), intensywności wydzielania ciepła w strefie tworzenia złącza, czy intensywności wymiany ciepła w procesie chłodzenia złącza. Podobnie ma się rzecz w odniesieniu do wartości osiąganych temperatur. Zdaję sobie sprawę, że w odniesieniu do FSW istnieją trudności techniczne, odnośnie wyznaczenia wspomnianych parametrów procesu, jednak ze względu na ich istotność wskazana jest co najmniej pogłębiona analiza. Może chociaż

szacunkowe obliczenia? Stwierdzenia typu „większy dopływ ciepła”, czy „szybkość chłodzenia wzrasta” mogą tu nie być wystarczające.

Zdanie „W konsekwencji, wraz ze wzrostem prędkości zgrzewania, temperatura szczytowa cyklu spada, a szybkość chłodzenia wzrasta” może być przykładem dość odważnej interpretacji faktów przez Autora. Jak się domyślam, wzrost prędkości zgrzewania ma powodować zmniejszenie energii liniowej procesu, co skutkuje niższą maksymalną temperaturą w materiale, podczas łączenia. Jednocześnie trudno mi się w tym kontekście zgodzić z kwestią interpretacji szybkości chłodzenia, którą rozumiem jako zmianę temperatury w funkcji czasu. Zakładając, że głównym mechanizmem wymiany ciepła w najbliższym otoczeniu złącza jest przewodzenie przez materiał, zmienność ta będzie raczej tym większa, im większa będzie maksymalna temperatura w złączy, a więc odwrotnie, niż proponuje Autor.

Proszę o szczegółowe wyjaśnienie całego opisu, najlepiej z odniesieniami do badań własnych, lub innych autorów, dostępnych w publikacjach.

40. Str. 71, W akapicie kończącym oględziny mikroskopowe zglądów Autor wspomina o dużej liczbie pęcherzy gazowych, podając lokalizację największego nagromadzenia tych struktur, wspominając o możliwości obecności wodoru, wydzielonego z zanieczyszczeń w (czy też na?) „materiale dodatkowym”, który Autor identyfikuje jako „narzędzie zgrzewające”. Jako alternatywne źródło wodoru w spoinie Autor proponuje wilgoć, obecną na powierzchni materiału łączonego. Dalej następuje charakterystyka wydzieleni, występujących w strukturze materiału, ze wskazaniem krzemu, jako głównego (jedyne) składnika w różnych strefach spoiny.

Uważam sposób zdefiniowania materiału dodatkowego za błędny. W spawalnictwie taki materiał to, typowo, materiał ulegający stopieniu w procesie spawania i wypełniający szczelinę/rowek utworzony przez brzegi elementów spawanych. W procesie FSW narzędzie nie ulega stopieniu i materiał pochodzący z niego nie przyczynia się do wypełniania spoiny. Przeciwnie, pożądane jest jak najmniejsze zużycie tego elementu z wielu przyczyn, które dla Autora powinny być oczywiste.

Ponadto, trudno mi zrozumieć w jaki sposób materiał narzędzia miałby wygenerować wodór, wypełniający pęcherze w spoinie, tak samo jak niewielka ilość wilgoci, zaadsorbowana na zimnych blachach, przygotowanych do spawania? Stal Vanadis 23 wodoru nie zawiera, a ewentualna wilgoć zostanie usunięta z powierzchni materiału przez odparowanie, z uwagi na postępującą przed narzędziem strefę wysokiej temperatury, wynikającej z przewodzenia ciepła ze strefy wydzielania ciepła przez tarcie (najwyższe temperatury) w kierunku obszarów o niższych temperaturach.

Proszę Autora o ustosunkowanie się do uwag, jednocześnie proszę o skrótowe, syntetyczne podsumowanie rozdziału 5.3.1., które pozwoliłoby na porównanie struktury materiału spoin z odniesieniem do parametrów procesu np. w tabeli dla warunków stosowanych w badaniach doświadczalnych, zrealizowanych przez Autora.

41. Str. 77, Tabele 5.21 i 5. 22, Wyniki pomiarów, przedstawione w tych dwóch tabelach można wyrazić w jednej tabeli, gdzie obok siebie zamieszczone zostaną wyniki dla narzędzi A i B, w zależności od parametrów procesu FSW, ponieważ w przypadku obu tych narzędzi przeprowadzono badania wg takiego samego programu.
42. Str. 78 i 79, Rysunek 5.54, Przedstawiony na rysunku wykres wartości chropowatości R_a , który de facto jest powtórzeniem danych zawartych w tabeli 5.23, otrzymał opis (legendę), umieszczony na sąsiedniej stronie, w stosunku do lokalizacji samego wykresu. Wygląd wykresu wskazuje na przygotowanie go w środowisku programu MS Excel, posiadającym narzędzia do umieszczania legendy w obrębie wykresu. Nie widzę powodu dla rozłożenia opisu na dwie strony, co robi wrażenie nieładu i utrudnia odbiór treści.
43. Str. 79, podpunkt 5.4 *Badanie Radiograficzne RT*, W opisie zawarto następujący fragment (pisownia oryginalna):
„Wzrost szybkości odkształcenia może wpływać na proces rekrytalizacji, co ściśle związane jest z bardzo

wysokimi prędkościami obrotowymi, które wpływają na generowanie nadmiernego odkształcenia. Ponadto niskie ilości wprowadzonego ciepła są głównie związane z wyższymi prędkościami zgrzewania, co powoduje szybsze chłodzenie złącza spawanego. Podwinięty przetop można zatem przypisać nieprawidłowej kombinacji prędkości obrotowej i prędkości posuwu, co w niektórych przypadkach daje niskie siły osiowe. Takie niskie siły osiowe przyczyniają się do powstawania niesymetrycznych półokrągłych rys, a w niektórych przypadkach do dużych wypływek na górnej powierzchni spoiny z powodu słabej plastyfikacji materiału.”

Pytania:

1. Co to znaczy „nadmierne odkształcenie”? Czy istnieje jakaś miara tego odkształcenia, która pozwoliłaby stwierdzić, że jest właściwe i czy Autor prowadził tego typu analizy?
 2. Jakie ilości ciepła są „niskie”, jakie normalne, a jakie wysokie? Może chodzi o moc źródła ciepła, wpływającą na energię liniową zgrzewania, a zatem i na maksymalne temperatury w procesie? Czy Autor jest w stanie podać jakieś wartości liczbowe?
 3. Czy „prędkość zgrzewania” i „prędkość posuwu” to to samo? Jeżeli tak, to powinno to być w pracy wyraźnie podane, albo należy wybrać jedno z pojęć i stosować je konsekwentnie.
 4. Proszę wyjaśnić co oznacza „szybsze chłodzenie złącza spawanego”?
 5. Jaka jest prawidłowa kombinacja prędkości obrotowej i prędkości posuwu, i jak można wyznaczyć taką kombinację?
 6. Nie znalazłem w pracy żadnej informacji o wartości siły osiowej, wywieranej przez narzędzie na materiał. Czy istnieje możliwość wyznaczenia takiej siły i czy Autor podjął próby ustalenia wartości tej siły podczas zgrzewania wykonanego na potrzeby tej pracy?
44. Str. 80, Autor pisze o „optymalnej energii cieplnej”. Jaka jest wartość tej energii? Czy chodzi o energię *per se*, czy też energię liniową? W jaki sposób definiuje się, lub wyznacza wartość optymalną?
- Tabela 5.24, Z przykrością muszę stwierdzić, że w kopii pracy, którą otrzymałem fotografie RTG spoin mają wygląd jednolicie czarnych prostokątów, co prawdopodobnie jest wynikiem niewystarczającej zdolności zastosowanej techniki druku do odwzorowania odcieni szarości.
- Czy w trakcie realizacji tej pracy wykonano tylko 6 fotografii RTG zgrzanych próbek?
45. Str. 82 od 85, Rozdział 6, podpunkt 6.1 *Wpływ procesu zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału na jakość złącza*, W tej części tekstu rozprawy zamieszczono następujące zwroty, pojęcia, wyrażenia i zdania, które wymagają doprecyzowania i wyjaśnienia:
1. „siła nacisku”, Czy wiadomo cokolwiek na temat wartości tej siły w opisywanych badaniach?
 2. „kształt zgrzeiny”, Czy chodzi może o ‘szerokość’? Jeżeli cechy geometryczne spoiny są ważne, to dla czego nie ma w pracy analizy tych cech?
 3. Autor prowadzi dyskurs, związany z zależnościami między prędkością (niedoprecyzowane jaką), akumulacją ciepła (jak rozumiem w materiale zgrzewanym) i wiodącą rolą jednej z powierzchni roboczych narzędzia. O którą prędkość chodzi w tym przypadku? Jakie są podstawy, by wnioskować o akumulacji ciepła w materiale zgrzewanym (tak zakładam) i jaki obszar w objętości materiału Autor ma na myśli? Czy chodzi w tym miejscu o moc źródła ciepła przy konkretnych parametrach procesu?
 4. Autor wywodzi, iż większej prędkości obrotowej narzędzia towarzyszy zwiększenie ‘ilości’ generowanego ciepła, a także że „ilość [...] ciepła [...] jest szybciej odprowadzana ze strefy zgrzewania”. Proszę o opis z odwołaniem się do pojęć wyrażonych w precyzyjny sposób. W termodynamice istnieją pojęcia np. ‘strumienia ciepła’, czyli ilości energii cieplnej transportowanej przez powierzchnię kontrolną w jednostce czasu, wyrażoną np. w jednostce [J/s], czyli w Watach [W]. Podobnie, termodynamika opisuje proces wymiany ciepła, jako zależny od różnicy temperatur, a nie ilości, akumulacji, czy intensywności wydzielania ciepła. W procesie FSW ciepło powstaje w wyniku tarcia narzędzia o materiał. Układ napędowy dostarcza do trzpienia energii mechanicznej przy łatwej do wyznaczenia mocy, wynikającej z iloczynu prędkości obrotowej wału i momentu oporów ruchu na tym wale. Tę moc można zmierzyć, nawet szacunkowo, choćby

przez pomiar mocy elektrycznej, pobieranej przez silnik maszyny realizującej proces. Czy podjęto tego rodzaju próby?

5. W zdaniu „Gdy prędkość zgrzewania osiągnęła 1400 obr/min oraz 70 mm/min, można zaobserwować porowatość po stronie spływu.”; Ponownie pojęcie „prędkości zgrzewania” jest co najmniej dwuznaczne, bo w jednym zdaniu Autor wymienia dwie, zupełnie niezależne wartości prędkości. Co to jest „prędkość zgrzewania”?

6. Zdanie „Niższa prędkość zgrzewania spowodowała większy dopływ ciepła”; Jak stwierdzono zaistnienie tego stanu?

7. Dalej Autor pisze: „W konsekwencji, wraz ze wzrostem prędkości zgrzewania, temperatura szczytowa cyklu termicznego spada, a szybkość chłodzenia wzrasta.”; Czy nie można odwołać się do jakichś wartości pomiarowych? Mocy na wale napędzającym narzędzie, energii liniowej w procesie zgrzewania, temperatury w wybranych punktach materiału w sąsiedztwie złącza, czy podobnych.

8. Dalej (Str. 83), Autor ponawia hipotezę o pochodzeniu pęcherzy w spoinach, podając jako przyczynę zanieczyszczenia narzędzia, lub wilgoć zaadsorbowaną na powierzchni łączonych elementów. Obszerniejszy opis Autor zamieszcza wcześniej w tekście (Str. 71). Ponawiam pytanie, czy na pewno takie rozumowanie jest słuszne?

9. Autor opisuje mechanizm powstawania wydzieleni o dużych rozmiarach, jako „koagulację” mniejszych. Czy na pewno chodzi o to pojęcie? Może chodzi o ‘agregację’?

10. W ostatnim zdaniu na str. 83 Autor podaje najważniejszą chyba i bardzo ważną obserwację, dotyczącą zrywania się próbek zgrzewanych w obszarze po stronie spływu materiału z narzędzia, gdzie daje się zaobserwować najniższa w złączu twardość. Uważam, że ten wątek należy kontynuować w dalszych badaniach.

11. Na str. 84 Autor wspomina o wpływie chropowatości powierzchni na wytrzymałość, domyślam się, że chodzi o trwałość zmęczeniową i dalej pisze: „W zmiennych warunkach obciążenia pękanie połączeń zgrzewanych rozpoczyna się na powierzchni elementu.”.

W którym miejscu powierzchni elementu? Inicjacja pęknięcia zmęczeniowego na powierzchni elementu poddanego obciążeniom o charakterze zmęczeniowym jest dość typowa. Czy chodzi tutaj o lico, czy grań spoiny (jeżeli można o takich elementach mówić), czy też pękanie rozpoczyna się obok właściwej zgrzeiny, w strefie wpływu ciepła? W pracy nie znalazłem opisu badań zmęczeniowych.

46. Str. 86 i 87, Rozdział 7 *Podsumowanie i wnioski końcowe*.

1. Proszę o zrezygnowanie ze sformułowania „najbardziej optymalne”. Optymalne=najlepsze, więc nie może być „bardziej”, a tym bardziej „najbardziej”.

2. Efekt zrealizowanych prac badawczych nr 4 i nr 7. Autor wspomina o „stałym nacisku”, ale nigdzie w pracy nie podano informacji, czy i jak sprawdzono, czy nacisk był stały, ani jaką miał wartość. Może chodzi o to, że narzędzie było przemieszczane nad materiałem w taki sposób, że położenie pierścieniowej powierzchni oporowej kołnierza narzędzia miało stałe położenie względem powierzchni czołowej łączonych próbek blachy? Proszę o wyjaśnienie.

3. Efekt zrealizowanych prac badawczych nr 6. Autor ponawia stwierdzenie, iż główną przyczyną wad struktury złączy FSW są zanieczyszczenia. Czy podjęto próbę weryfikacji takiej tezy? Na przykład, można celowo wprowadzić ‘zanieczyszczenia’ w obszarze powstawania złącza i sprawdzić, jaka będzie jakość uzyskanego połączenia.