



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
Tel: +48 (12) 617 25 76  
Fax: +48 (12) 617 33 39

**AGH**

dr hab. inż. Krzysztof Muszka, prof. AGH

e-mail: muszka@agh.edu.pl

## Recenzja rozprawy doktorskiej:

*„Kształtowanie właściwości funkcjonalnych walcowanych  
kompozytów warstwowych AlMg-Al-Cu”*

Autor rozprawy: mgr inż. Katarzyna Kubik

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Dariusz Rydz, prof. PCz – Politechnika Częstochowska

Podstawa opracowania recenzji: Zlecenie Kierownika dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa PCz, dr hab. inż. Rafała Prusaka, prof. PCz.

### 1. Przedmiot oceny

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej liczącej 130 stron, 61 rysunków i 6 tablic a także 1 załącznika obejmującego formularz gotowości wdrożeniowej. Praca została napisana w klasycznym układzie. Składa się ze spisu treści, listy symboli i skrótów, wprowadzenia, przeglądu literaturowego, celu i tezy, badań własnych opisanych w 7 podrozdziałach oraz podsumowania, bibliografii i spisu rysunków i tablic. Wykaz bibliografii obejmuje 132 pozycji literaturowych, z czego 4 z nich jest współautorstwa Doktorantki a 13 pozycji to prace opublikowane w ostatnich 5 latach. Do rozprawy dołączono także załącznik nr 1.

Problematyka rozprawy doktorskiej jest bardzo aktualna i dotyczy oceny możliwości kształtowania plastycznego, w skali przemysłowej, kompozytów wielowarstwowych w postaci blach, wytworzonych ze stopów metali łączonych wybuchowo.

Obecnie kompozyty warstwowe na osnowie metali, wytwarzane w postaci blach cieszą się dużym zainteresowaniem wielu ośrodków naukowych w kraju i na świecie. Wytwarzanie w skali przemysłowej materiałów konstrukcyjnych o warstwowej strukturze wewnętrznej daje możliwość uzyskania takich kombinacji własności, które nie są możliwe do osiągnięcia w klasycznych materiałach o strukturze jednorodnej oraz wykorzystanie wspomnianych materiałów w gałęziach przemysłu, które oczekują często ekstremalnych połączeń własności użytkowych (np. wysoka szczelność elektromagnetyczna i jednocześnie duża odporność na przebicie czy też wysoka wytrzymałość i duża odporność na korozję).

W literaturze istnieje niewiele prac na temat wdrożonych na skalę przemysłową

technologii produkcji blach wielowarstwowych o formatach pozwalających na ich dalsze przetwarzanie na drodze formowania. W kraju tematyka ta była ostatnio przedmiotem projektu badawczego Techmatstrateg, realizowanego przez producenta blach łączonych wybuchem (firma Eksplomet) oraz konsorcjum IMiM PAN, PW, PCz, PO, AGH i WAT, niemniej obejmowała ona przeróbkę plastyczną materiałów na drodze klasycznego (symetrycznego) procesu walcowania. Tym bardziej problem badawczy podjęty w recenzowanej Rozprawie jest ważny jako, że poszukiwanie skutecznych i ekonomicznie uzasadnionych metod produkcji wyrobów z kompozytów metalowych w skali przemysłowej, stanowi wciąż wyzwanie. Doktorantka podjęła się zatem bardzo aktualnego tematu a sporą wartością dodaną Rozprawy jest także przeprowadzona analiza czynników ekonomicznych, które determinują opłacalność wdrożenia tej technologii w warunkach produkcji przemysłowej.

## 2. Ocena pracy doktorskiej

Cel i teza pracy poprzedzone są analizą stanu zagadnienia przedstawionym jako wprowadzenie oraz przegląd literatury, co stanowi pierwsze dwa rozdziały pracy. W przeglądzie literatury scharakteryzowano materiały kompozytowe oraz ich podstawowe cechy i własności a także rodzaje połączeń materiałów kompozytowych. Scharakteryzowano także rozwój technologii wytwarzania materiałów warstwowych metalowych oraz omówiono wybrane z nich. Opracowanie to jest jednak nieco ogólne – pominięto np. prace prof. Irene Beyerlein z Los Alamos National Laboratory (obecnie University of California - Santa Barbara), która od dekad prowadzi zaawansowane badania nad wytwarzaniem wielowarstwowych materiałów metalicznych metodą walcowania pakietowego (*Accumulative Roll bonding- ARB*). Pewien niedosyt pozostawia także brak odniesienia opisanych technologii wytwarzania materiałów wielowarstwowych do szerszej grupy materiałów, które stanowią elementy składowe.

Niejasne są także oznaczenia na wykresie przedstawionym na Rys. 9, który stanowi podsumowanie wpływu parametrów procesu łączenia wybuchowego na efektywność procesu i charakter uzyskanego złącza.

W kolejnym podrozdziale (2.3) Doktorantka przedstawiła analizę teoretyczną asymetrycznego procesu walcowania, zdefiniowała możliwe rodzaje asymetrii oraz omówiła wpływ asymetrycznego procesu walcowania na nierównomierność odkształcenia i prędkości płynięcia komponentów składowych kompozytu warstwowego. Opisuje teoretyczne aspekty procesu walcowania asymetrycznego w ujęciu materiałów wielowarstwowych. Podrozdział ten został napisany znacznie szerzej niż wcześniejsze i stanowi większą wartość dodaną – tym bardziej, że Doktorantka odnosi się w nim także do aspektów techniczno-ekonomicznych.

W rozdziale 2.4, który traktuje o mechanicznych degradacjach w metalowych kompozytach warstwowych, Doktorantka zidentyfikowała główne przyczyny delaminacji i rozwarstwień. Brakuje jednak szerszej informacji o tym jakie parametry zastosować aby tych wad uniknąć.

W rozdziale 2.5, w którym Doktorantka przedstawiła analizę techniczno-ekonomiczną



procesu wytwarzania kompozytów warstwowych, w sposób klarowny poruszając ważne kwestie związane z optymalizacją produkcji pod kątem jej opłacalności. Ważnym podkreślenia jest fakt, że Doktorantka przedyskutowała te kwestie w aspektach związanych z wdrażaniem nowych, innowacyjnych technologii w środowisku współczesnych firm.

Podsumowując można stwierdzić, że w analizowanym przeglądzie literatury Doktorantka właściwie zdefiniowała w nim tematykę, co pozwoliło na postawienie celu i tezy pracy, które znajdują się w rozdziale 3. Tezę pracy stanowi stwierdzenie, że na podstawie znajomości określonych parametrów procesowych oraz określonych właściwości funkcjonalnych kompozytu warstwowego, możliwe jest ich plastyczne kształtowanie z zapewnieniem odpowiedniej jakości obszarów połączenia wyrobu gotowego. Podstawowym celem naukowym pracy było dokładne określenie wpływu parametrów procesu wytwarzania kompozytów warstwowych AlMg5-Al-MnE na jakość obszarów złącza oraz wybrane właściwości funkcjonalne. Zdefiniowano także dodatkowy cel jakim było wyznaczenie optymalnych parametrów asymetrycznego procesu walcowania. Teza została sformułowana poprawnie a cele są jasne i klarowne.

Na uwagę zasługuje fakt, iż aby udowodnić tezę, Autorka zaplanowała dosyć szeroki zakres prac badawczych – badania wstępne obejmujące ocenę jakości i trwałości obszarów połączeń warstw materiałów kompozytowych po procesie łączenia wybuchowego – dla kolejnych etapów kształtowania plastycznego. W tym celu wykorzystwała techniki mikroskopii optycznej i pomiary mikrotwardości.

W kolejnym etapie Autorka przeprowadziła proces wieloprzepustowego walcowania asymetrycznego z wykorzystaniem laboratoryjnej walcarki duo. Niektóre blachy wielowarstwowe po procesie walcowania wymagały prostowania – proces ten realizowano na maszynie wytrzymałościowej.

Następnie efekty mikrostrukturalne t.j. skład chemiczny i morfologię faz międzymetalicznych powstających na granicach międzyfazowych, po każdym etapie walcowania, oceniane były za pomocą nastolikowego skaningowego mikroskopu elektronowego, wyposażonego w detektor EDS. Nie opisano jednak procedury przygotowania zglądów metalograficznych – zarówno dla mikroskopii optycznej jak i skaningowej mikroskopii elektronowej.

Jest to o tyle istotne, że np. na mikrofotografiach przedstawionych na rys. 34 i 35 pojawiają się obszary o jasnym zabarwieniu, które jeśli są cząsteczkami tlenku glinu, mogą zaburzać wyniki ilościowe pomiaru stężenia Al.

Podczas procesu walcowania asymetrycznego prowadzono pomiary siły walcowania – posłużyły one do oceny wpływu współczynnika asymetrii walcowania na parametry energetyczne – siłowe procesu, oraz na możliwość uzyskania wyrobu, który będzie wolny od wad wewnętrznych (na granicach interfejsu). Doktorantka zaobserwowała i określiła wpływ wielkości całkowitego odkształcenia oraz współczynnika asymetrii na zmiany grubości warstw oraz na własności użytkowe walcowanych kompozytów. Dalej opisane zostały wady pojawiające się w obszarach połączeń.

Rozdział 3.3.6 to analiza wyników badań skupiająca się na określeniu wpływu kolejnych etapów procesu wytwórczego na własności funkcjonalne płaskich wyrobów kompozytowych warstwowych.

Doktorantka jako podstawowy czynnik determinujący prawidłowość procesu wytwarzania kompozytów zidentyfikowała zapewnienie trwałości obszarów połączeń w kompozytowym materiale. Zidentyfikowała różnice w morfologii powstałych połączeń w zależności od układu komponentów – kompozyt Al-Cu charakteryzuje duży stopień pofalowania interfejsu oraz obecność faz międzymetalicznych – podczas gdy kompozyt Al-ALMg5 ma dużo mniejszy stopień pofalowania oraz bardzo małej wielkości obszary przetopień. Wyniki te są zgodne z tymi istniejącymi w światowym piśmiennictwie dla różnych układów wielowarstwowych – materiałów wykazujących się wzajemną rozpuszczalnością i tendencją do tworzenia intermetalików.

Drugi czynnik decydujący o jakości wytworzonego kompozytu to płaskość blach po procesie walcowania asymetrycznego. Badania wykazały, że zastosowanie odpowiedniego stopnia asymetrii kinetycznej pozwala na uzyskanie akceptowalnego stopnia płaskości pasma i uniknięcie mikropęknięć i naderwań w obszarach interfejsu. Szczególnie newralgicznym obszarem jest interfejs Al-Cu ze względu na duże różnice w oporze plastycznego płynięcia pomiędzy tymi dwoma materiałami – wpłynęło to także na obniżenie jakości i trwałości tego obszaru (reprezentowanej przez obniżenie wytrzymałości na ścinanie).

Doktorantka wykazała, że dobór optymalnych parametrów procesów łączenia i kształtowania plastycznego determinuje jakość i własności użytkowego kompozytowych blach warstwowych. Spostrzeżenia te w mojej opinii są zbyt ogólne i wymagają doprecyzowania.

Podrozdział 3.3.7 to ocena możliwości wdrożeniowej proponowanej technologii na przykładzie konkretnego przedsiębiorstwa – co uważam za zasadne – bo tylko w warunkach znanego zamaszynowienia, możliwości produkcyjnych, profilu działalności czy kosztów operacyjnych taka ocena być miarodajna.

W ramach tej analizy Doktorantka, znając parametry inwestycyjne i techniczne dokonała analizy prognozy rentowności, wartościowania kosztów eksploatacyjnych i klasyfikacji poszczególnych czynności związanych z przedsięwzięciem. Wynikiem tych prac jest analiza SWOT oraz analiza ryzyka w oparciu o diagram Ishikawy. Podejście to oceniam jako słuszne ponieważ w sposób zasadniczy odnosi się do wady wyrobu, jednocześnie wskazując na korelację z poszczególnymi operacjami technologicznymi, w których określa się potencjalne przyczyny, ma szczególne znaczenie w praktyce inżynierskiej. Wartością tego narzędzia jest ujęcie danego problemu w sposób całościowy, czytelny, prosty i łatwy do opracowania, co ma znaczenie na etapie diagnozowania przyczyn problemu. Przedstawiony na Rys. 61. **Diagram Ishikawy oraz dyskusja wpływu poszczególnych czynników na jakość wyrobu gotowego – w oparciu o przeprowadzone badania własne i dane przedsiębiorstwa stanowi autorskie rozwiązanie Doktorantki i w mojej opinii jest najważniejszym osiągnięciem niniejszej Rozprawy.**



### 3. Uwagi szczegółowe

Praca od strony edycyjnej pozostawia wiele do życzenia. W tekście znajduje się wiele błędów stylistycznych i literówek. Rysunki od strony graficznej także mogły zostać przygotowane w sposób bardziej przejrzysty i przyjazny dla czytelnika. Przykładowe błędy edycyjne zestawiono poniżej:

- 1) Str 62 „firmę Explomed” zamiast „Explomet”;
- 2) Brak legendy na rys. 29 i 30 z wyjaśnieniem co przedstawiają obszary zakreślone czerwonymi elipsami;
- 3) Na rys. 32 nie zaznaczono miejsc, w których przeprowadzono analizę EDS;
- 4) Rys 33 – powinno używać się terminu mikroskopia skaningowa – a nie mikroskopia scanningowa;
- 5) Rys. 28 i 37 nie ma podziałki (odniesienia skali);
- 6) Obrazy mikrostruktur pokazujące obszary połączenia warstw kompozytu po procesie walcowania (np. Rys. 29 i 48 i 51) są zbyt małe – zdjęcia powinny być większe aby można było na nich zaobserwować jakościowo morfologię złącza.
- 7) Brak oznaczeń a) i b) na rysunku 49
- 8) Str. 106 – „oświadczenie” zamiast „doświadczenie”

Powyższe uwagi nie wpływają jednak na obniżenie wartości merytorycznej rozprawy.

### 4. Uwagi dyskusyjne

Proszę przedstawić wyjaśnienia następujących kwestii w formie pisemnej:

- 1) Proszę o przedstawienie procedury przygotowania próbek (złądów) do badań metalograficznych.
- 2) W jaki sposób przygotowano próbki do badań wytrzymałości obszarów połączeń na ścinanie? Jaka była grubość wyciętych próbek (pasków)?
- 3) Czy pasmo po każdym przepuście walcowania było odwracane (zarówno w zakresie kierunku podawania pasma / walcowanie nawrotne/ jak i zamiana powierzchni górnej / dolnej pasma
- 4) Pomiary twardości – z czym związane jest zmniejszenie twardości po walcowaniu -w stosunku do materiału po łączeniu wybuchowym dla warstwy Cu (Rysunek 59)?
- 5) Jak mierzono grubość poszczególnych warstw (Rys. 43) – czy w jednym miejscu czy jest to średnia z pomiarów w kilku miejscach na długości (w kierunku walcowania) warstw?
- 6) Czy wypływowaniu warstwy środkowej Al na zewnątrz pasma nie dałoby się zapobiec zmieniając stosunek grubości do szerokości blach (b/h).

## 5. Podsumowanie

Recenzowana praca pt. „*Kształtowanie właściwości funkcjonalnych walcowanych kompozytów warstwowych AlMg-Al-Cu*” spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Uzyskane przez Doktorantkę wyniki badań mają wartość naukową oraz poznawczą, co świadczy o Jej umiejętnościach i wiedzy niezbędnej do samodzielnego sformułowania i rozwiązania zagadnienia naukowego.

Podsumowując ocenę pracy, za oryginalne osiągnięcia naukowe Autorki uważam:

- opracowanie zależności pomiędzy jakością i trwałością obszarów połączeń warstw materiałów kompozytowych po procesie łączenia metodą zgrzewania wybuchowego, dla kolejnych etapów plastycznego kształtowania;
- dokonanie oceny wpływu asymetrycznego walcowania na przebieg procesu kształtowania kompozytów warstwowych;
- dokonanie oceny potencjału wdrożenia procesu asymetrycznego walcowania do praktyki przemysłowej poprzez przeprowadzenie analizy SWOT i opracowanie diagramu Ishikawy w warunkach wybranego przedsiębiorstwa.

**Zawarte w niniejszej recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości pracy a raczej są wynikiem zainteresowania recenzenta pracą. Nie obniżają one jednak, pozytywnej oceny przedstawionej rozprawy doktorskiej, która jest wartościową pozycją naukową, szczególnie z punktu widzenia przeprowadzonej oceny możliwości wytwarzania wielowarstwowych kompozytów metalowych w skali przemysłowej na drodze walcowania asymetrycznego. Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska, spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 85, z późn. zm.). Wnioskuje zatem o przyjęcie rozprawy mgr inż. Katarzyny Kubik oraz dopuszczenie Jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Kraków, dnia 23.06.2023

  
Krzysztof Muszka