

Prof. dr hab. inż. Sebastian Mróz

Częstochowa, 07.08.2023 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Walnika

pt.: „*Wpływ parametrów technologicznych na trwałość połączeń płaskowników warstwowych wytwarzanych metodą walcowania na gorąco*” – wykonana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej z dnia 16 czerwca 2023 r.

W ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania zastosowaniem w przemyśle wysoko wytrzymałych gatunków stali. Wyroby z gatunków stali o wytrzymałości 1000 MPa i więcej niewątpliwie są odpowiedzią na coraz wyższe wymagania przemysłu. Niestety, stale takie są trudno spawalne oraz charakteryzują się małą plastycznością, co w wielu przypadkach dyskwalifikuje je jako materiał konstrukcyjny. Odpowiedzią na wskazane powyżej problemy są wyroby wielowarstwowe typu stal konstrukcyjna wysoko wytrzymała – stal konstrukcyjna (spawalna). W takim przypadku mamy połączenie korzystnych cech obu gatunków stali: wysokiej wytrzymałości i spawalności z możliwością dalszej obróbki plastycznej (plastyczności). Wytwarzanie płaskowników dwuwarstwowych jest procesem skomplikowanym i wiąże się z wieloma problemami technologicznymi, z których do najważniejszych należy uzyskanie wysokiej wytrzymałości złącza, a przy zastosowaniu technologii walcowania zapewnienie równomiernego płynięcia plastycznego obydwu warstw. Niespełnienie tych warunków może spowodować rozwarstwienie się bimetalowego pasma podczas walcowania lub

powstanie innych wad, dyskwalifikujących gotowy płaskownik jako wyrób gotowy lub półwyrób do dalszego przerobu. Badania jakich podjął się Doktorant są skupione na doborze warunków i parametrów procesowych (głównie wartości odkształcenia i temperatury), dzięki którym przybliży się możliwość wdrożenia procesu walcowania w warunkach przemysłowych dwuwarstwowych płaskowników stal wysoko wytrzymała – stal konstrukcyjna. Stąd też uważam, że podjęty przez Autora pracy temat należy uznać za uzasadniony i aktualny.

Recenzowana praca składa się ze streszczenia w języku polskim oraz angielskim, wprowadzenia, pięciu rozdziałów, podsumowania i wniosków oraz spisu literatury zamieszczonych na 205 stronach maszynopisu. Praca jest bardzo obszerna i pewne szczegółowe informacje mogłyby zostać pominięte, co nie zmniejszyłoby wartości merytorycznej dysertacji. Przyjęta struktura pracy jest właściwa, a badania własne i ich analiza stanowią ponad 60% całej objętości pracy. Cytowana literatura w dosyć nietypowy sposób podzielona na publikacje (106 pozycji), normy (14 pozycji), patenty (2 pozycje) oraz materiały informacyjne (15 pozycji) jest bardzo aktualna, a sam dobór literatury jest jak najbardziej adekwatny do tematyki rozprawy. Znaczna liczba publikacji dotycząca analizowanych zagadnień potwierdza również aktualność tematyki badawczej podjętej przez Doktoranta. Bibliografia w głównej mierze składa się z najnowszych pozycji światowej literatury, które zostały opublikowane w ostatnich 10-15 latach, ale również z fundamentalnych pozycji dotyczących łączenia metali i walcowania. W 18 pozycjach Doktorant występuje jako współautor, również w czasopismach indeksowanych w bazie JCR.

Przed postawieniem tezy pracy, w przeglądzie literatury, Autor przedstawia rys historyczny wytwarzania wyrobów wielowarstwowych, co w pracach doktorskich nie jest często stosowane. Jednakże w tym przypadku jest dobrym

wprowadzeniem do analizowanych zagadnień w części badawczej. W studium literatury Doktorant opisuje również nowe wysoko wytrzymałe gatunki stali, w tym stosowaną w pracy stal NANOS-BA®, która została opracowana w Łukasiewicz Górnośląski Instytut Technologiczny (macierzysta Jednostka Doktoranta). W dalszej części przeglądu literatury opisano metody wytwarzania wyrobów wielowarstwowych, krytycznie odnosząc się do poszczególnych metod. Po dokonanej analizie stosowanych metod Autor wybiera proces walcowania jako tą, która ma wysoki potencjał aplikacji w warunkach przemysłowych. W podsumowaniu przeglądu literatury Autor w klarowny sposób definiuje motywację i konieczność podjęcia badań w zakresie opracowania technologii i doboru parametrów procesowych walcowania dwuwarstwowych płaskowników stal wysoko wytrzymała NANOS-BA® – stal S355J2. Należy stwierdzić, że przegląd literatury został wykonany bardzo starannie wskazując trendy prowadzonych badań naukowych w krajowych i światowych ośrodkach badawczych.

Postawiona teza jest ambitna i w pełni uzasadniona w kontekście zrealizowanych badań i jest ściśle powiązana z celem pracy, który zdefiniowano jako opracowanie podstaw technologii wytwarzania dwuwarstwowych płaskowników umożliwiającej trwałe połączenie stali spawalnej S355J2 ze stalą niespawalną NANOS-BA® w procesie walcowania na gorąco z następną obróbką cieplną. Należy stwierdzić, że wykonane przez Autora badania jednoznacznie były ukierunkowane na zrealizowanie założonego celu i udowodnienia tezy pracy. Przy tak obszernym zakresie badań można było pominąć badania dwuwarstwowych płaskowników wykonanych z tych samych gatunków stali i skupić się tylko na płaskownikach dwuwarstwowych wykonanych ze stali S355J2 oraz NANOS-BA®.

Dla osiągnięcia celu i udowodnienia tezy pracy Autor zrealizował bardzo szeroki zakres badań doświadczalnych i teoretycznych, który w szczególności

sposób opisano oraz pokazano na rysunkach i zamieszczono w postaci tabeli w rozdziale 4.2. Badania prowadzono dla dwóch gatunków stali: niespawalnej, nanostrukturalnej wysoko wytrzymałej stali NANOS-BA® o strukturze bainityczno – austenitycznej oraz stali konstrukcyjnej, spawalnej, o podwyższonej wytrzymałości i strukturze ferrytyczno - perlitycznej w gatunku S355J2+N.

Należy podkreślić, że zastosowanie przez Doktoranta półprzemysłowej linii LPS, która jest na wyposażeniu Łukasiewicz Górnośląski Instytut Technologiczny (Macierzysta Jednostka Doktoranta) z dużym przybliżeniem odwzorowała rzeczywiste warunki przemysłowe, a zastosowanie zaawansowanych metod numerycznych do symulacji procesu oraz najnowszej aparatury naukowej umożliwiło kompleksowe ujęcie analizowanego tematu. Wykonane eksperymenty przeprowadzono bardzo starannie, co umożliwiło otrzymanie wyników o wysokim poziomie naukowym i aplikacyjnym.

W pierwszym etapie badań Autor wykonał symulacje numeryczne procesu walcowania dwuwarstwowych płaskowników. Głównym celem było określenie parametrów procesowych oraz siłowo-energetycznych determinujących możliwość przeprowadzenia prób walcowania w warunkach linii LPS. Zastosowanie modelowania numerycznego daje możliwość uzyskania wyników, które w przypadku zastosowania metod inżynierskich mogą być obciążone większym błędem. W tym przypadku Autor z wykorzystaniem modelowania numerycznego obliczył wskaźniki odkształcenia oraz parametry siłowe procesu, które to można było obliczyć metodami inżynierskimi. Natomiast z wykorzystaniem MES wyznaczono tylko rozkłady temperatury w walcowanych płaskownikach. Zdaniem recenzenta o wiele bardziej interesującymi wynikami byłaby analiza stanu naprężenia i odkształcenia w walcowanych płaskownikach, szczególnie, że Autor w dalszej części pracy odnosi się „do korzystnego stanu naprężenia” w ob-

szarach złącza. Ponadto Autor nie podaje jakie kryterium przyjął definiujące połączenie warstw. Czy *a priori* Doktorant założył, że połączenie jest trwałe?

W kolejnym rozdziale Autor charakteryzuje stanowisko badawcze (w tym przypadku jest to linia LPS), metodykę przygotowania próbek do badań oraz same wyniki prób walcowania (m.in. wymiary próbek, wskaźniki odkształcenia, zarejestrowane parametry siłowe, wytrzymałość złącza, twardość oraz porównanie wyników obliczeń numerycznych i badań laboratoryjnych). Z rys. 18 wynika, że próbki po walcowaniu były proste. Nasuwa się pytanie, ponieważ zastosowano do badań dwa gatunki stali, znacznie różniące się wartościami naprężenia płynięcia, czy pasmo po wyjściu z kotliny odkształcenia nie wyginało się, co jest naturalnym zjawiskiem i prowadzone było z tego zakresu szereg prac m.in. w Politechnice Częstochowskiej czy AGH. Również w analizie wykonanej z wykorzystaniem MES brak jest jakiegokolwiek komentarza na temat kształtu pasma po wyjściu z kotliny walcowniczej. Proszę również odnieść się do wyników zamieszczonych na rys. 6.

Najbardziej wartościowymi rozdziałami pracy są rozdział 4.5.2 (Wyniki badań laboratoryjnych) oraz 6 (Dyskusja wyników badań). W pracy brakuje rozdziału 5. Przedstawione wyniki i ich analiza w sposób kompleksowy pozwoliły określić wpływ parametrów walcowania i obróbki cieplnej (m.in. temperatury, wartości odkształcenia oraz czas obróbki cieplnej) na jakość i wytrzymałość złącza oraz zmiany mikrostrukturalne zarówno w obszarach złącza i w całej objętości płaskowników). Autor, na podstawie analizy wyników badań metaloznawczych próbek pobranych z płaskowników S355J2/NANOS-BA®, wyjaśnił mechanizmy kształtowania mikrostruktury i właściwości mechaniczne dwuwarstwowych płaskowników. W analizie uwzględniono różne stany materiału: przed połączeniem warstw, po walcowaniu na gorąco z zintegrowanym wyżarzaniem międzyoperacyjnym, po dodatkowym wyżarzaniu izotermicznym

i chłodzonych swobodnie w powietrzu. Na podstawie analizy wyników badań Doktorant dobrał parametry procesowe, dzięki którym uzyskano dwuwarstwowe płaskowniki o założonej, wysokiej wytrzymałości  $R_{p0,2} > 460$  MPa, przy jednocześnie dobrej plastyczności wyrażonej wydłużeniem całkowitym powyżej 10% i wysokowytrzymałym złączem o wytrzymałości na ścinanie wynoszącej ponad 300 MPa. Otrzymane wyniki są szczególnie cenne w kontekście możliwości wdrożenia opracowanej technologii do warunków przemysłowych. Z drugiej strony szczegółowa analiza mikrostrukturalna oraz właściwości mechanicznych złącza oraz gotowych płaskowników stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa. Z poznawczego punktu widzenia bardzo cenne są opracowane przez Autora modele łączenia poszczególnych warstw, które przedstawiono na rys. 110 i 111. Prawidłowa interpretacja otrzymanych wyników badań umożliwiła opracowanie podstawowych parametrów i wytycznych dla technologii wytwarzania wysoko wytrzymałych płaskowników S355J2/NANOS-BA® w procesie walcowania na gorąco i obróbki cieplnej.

Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami. W rozdziale tym w syntetyczny sposób mgr inż. Bartłomiej Walnik przedstawił i potwierdził nowość otrzymanych wyników badań i ich poznawczy jak i aplikacyjny charakter określający wpływ parametrów procesowych walcowania i obróbki cieplnej na otrzymanie wysoko wytrzymałych dwuwarstwowych płaskowników S355J2/NANOS-BA®. Otrzymane wyniki badań jednoznacznie potwierdzają zrealizowanie ambitnego celu oraz udowadniają postawioną tezę pracy.

#### **Uwagi do pracy:**

Praca została przygotowana bardzo starannie, poprawnie pod względem redakcyjnym i językowym, jednakże Autor nie ustrzegł się pewnych nieścisłości, a niektóre zagadnienia nie zostały wyjaśnione w sposób wyczerpujący:

I. Uwagi o charakterze ogólnym:

1) Autor zalicza do wad metody zgrzewania wybuchowego „małe wymiary i niska dokładność wyrobów” oraz „Metoda zgrzewania wybuchowego metali nie daje możliwości uzyskania blach wielowarstwowych bezpośrednio po łączeniu wybuchem o pożądanych grubościach zarówno poszczególnych warstw jak i całego pasma wielowarstwowego”, jak te stwierdzenia mają się do wyrobów oferowanych np. przez firmę Explomet?

2) Czym było spowodowane ograniczenie gniotu do 40%?

3) Jakie były warunki brzegowe symulacji numerycznych. W jakiej postaci wprowadzono krzywe naprężenia płynięcia do symulacji numerycznych i jak je wyznaczono? W wielu przypadkach błąd pomiędzy wynikami obliczeń numerycznych i badań laboratoryjnych wyniósł ponad 15% (nawet 33% - tablica 33), proszę o komentarz.

4) Jak Autor wyjaśni różne grubości końcowe pasma po symulacji procesu walcowania dla tych samych wartości gniotu?

5) Na jakiej podstawie Autor stwierdza, że „Zastosowanie w pierwszym przepuszczeniu dużego gniotu 40% wpływa znacząco na stan naprężeń w płaszczyźnie zgrzewania.” oraz „Zastosowanie drugiego gniotu 30% powoduje znaczące podwyższenie naprężeń w strefie zgrzewania i na powierzchni zewnętrznej...”? W pracy nie analizowano rozkładów naprężeń.

II. Uwagi o charakterze szczegółowym:

1) s. 7, 35 jest szybkość odkształcenia, powinno być prędkość odkształcenia

2) s. 12 w literaturze Polskiej (Polskiej jest przymiotnikiem, powinno być pisane małą literą),

3) s. 28 blach antykorozyjnych – skrót myślowy,

4) s. 31 na temperaturze, powinno być w lub przy temperaturze,

- 5) s. 38 połączeń stali z niemetalami w procesie walcowania, pod pojęciem niemetalii Autor prawdopodobnie miał na myśli metale nieżelazne,
- 6) s. 42 płaskowniki ładowano i s. 64 – żargon hutniczy,
- 7) s. 64 transport pod walce – żargon hutniczy.

### Wnioski końcowe:

Biorąc pod uwagę aktualność doboru tematu, który ma bardzo istotne znaczenie poznawcze oraz aplikacyjne, co nie jest często spotykane w realizowanych rozprawach doktorskich oraz właściwą i wartościową tezę rozprawy, która została w pełni udowodniona, a także umiejętności Doktoranta, który:

- wykazał bardzo dobre opanowanie warsztatu naukowego w dyscyplinie inżynieria materiałowa,
- potrafił zastosować wiele nowoczesnych metod badawczych (w tym zaawansowane modelowanie numeryczne z wykorzystaniem MES) do analizy procesu walcowania i obróbki cieplnej oraz właściwości analizowanych płaskowników, co umożliwiło poszerzenie wiedzy w zakresie wpływu parametrów procesowych (głównie wartości odkształcenia i temperatury oraz czasu obróbki cieplnej) na jakość złącza i właściwości dwuwarstwowych płaskowników,
- sformułował poprawne i wartościowe wnioski wynikające z wyników bardzo szerokiego zakresu badań teoretycznych i doświadczalnych, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska pt.: „Wpływ parametrów technologicznych na trwałość połączeń płaskowników warstwowych wytwarzanych metodą walcowania na gorąco” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Bartłomieja Walnika do publicznej obrony.

