



**AGH**

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Metali Nieżelaznych  
Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych  
dr hab. inż. Krzysztof Żaba, prof. AGH

Kraków, 04 grudnia 2023 r.

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela Dobrasa pt. „Wpływ impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę stopów aluminium gatunków 5754 oraz 6016 w wybranych procesach kształtowania blach”,  
opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego,  
pismo z dnia 05 października 2023 r.**

Praca wpisuje się w aktualne trendy badawcze, dotyczące analizy zjawisk, występujących w blachach ze stopów aluminium stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym, poddanych odkształceniu plastycznemu, z zastosowaniem niekonwencjonalnych metod formowania. Analiza tych zjawisk, choć będąca przedmiotem publikacji, wciąż stanowi źródło inspiracji do dalszych badań i rozwiązywania istniejących problemów. Głównym problemem w przetwórstwie stopów aluminium jest stosunkowo niska odkształcalność w temperaturze otoczenia, w szczególności w porównaniu do powszechnie stosowanych stalowych blach. Głównymi metodami stosowanymi w celu poprawy odkształcalności stopów aluminium, są procesy formowania na ciepło i na gorąco. Niestety zwiększona adhezja pomiędzy blachą a narzędziami, ograniczona efektywność smarowania czy zmniejszona wytrzymałość narzędzi generuje dużą ilość wad. Alternatywę dla klasycznych metod kształtowania stanowi hydroformowanie, formowanie elektromagnetyczne oraz przyrostowe. Niestety każda z tych metod ma swoje ograniczenia oraz generuje problemy, co powoduje, że nie są one w pełni satysfakcjonujące technologicznie i są wykorzystywane do wytwarzania tylko określonych asortymentów. Konkurencyjne, w stosunku do wyżej wymienionych metod, może być

formowanie wspomagane przepływem prądu elektrycznego (wspomagane aplikacją impulsów prądowych).

W ostatnich latach problematyka dotycząca możliwości kształtowania plastycznego stopów aluminium stała się jednym z istotniejszych obszarów badawczych. Z doniesień badaczy wynika jednak, że podjęta w pracy tematyka nie została dotychczas scharakteryzowana w sposób kompleksowy i jednoznaczny, pomimo szeregu metod badawczych oraz dużej ilości wyników badań i wymaga ciągłego doskonalenia i optymalizacji stosowanych technologii.

Autor rozprawy podjął próbę oceny możliwości intensyfikacji procesu kształtowania plastycznego blach z wybranych stopów aluminium w temperaturze pokojowej oraz podwyższonej, w różnych stanach umocnienia poprzez zastosowanie prób rozciągania tłoczenia blach z jednoczesną aplikacją dwóch różnych sposobów dostarczenia impulsów prądowych, na specjalnie skonstruowanych stanowiskach badawczych, z systemem komputerowej akwizycji danych.

Z powyższych względów uważam, że problematyka i temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela Dobrasa zostały trafnie sformułowane i zasługują na uznanie. Wybór tematyki jest jak najbardziej aktualny i wpisuje się w trendy badawcze w obszarze wzrostu zakresu możliwości formowania blach z wybranych stopów aluminium poprzez wspomaganie przepływem prądu elektrycznego.

### **Ocena rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa, napisana pod opieką naukową promotora dr hab. inż. Zbigniewa Zimniaka, prof. PWr oraz promotora pomocniczego dr hab. inż. Macieja Zwierzchowskiego, prof. PWr, obejmuje 158 stron, zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, 9 rozdziałów, wnioski końcowe poznawcze i użytkowe, propozycje dalszych badań i bibliografię, 187 rysunków w postaci schematów, wykresów i fotografii, 5 tabel oraz 145 pozycji literaturowych, w większości anglojęzycznych, w tym jedną opublikowaną przez Autora dysertacji i współautorów w języku angielskim, w czasopiśmie *Materials*, w 2021 r.

Część I dysertacji, obejmuje krótkie Wprowadzenie (rozdział 1) oraz analizę stanu zagadnienia, która podzielona została na dwa rozdziały (2-3). W rozdziale 2, podzielonym na podrozdziały 2.1-2.3, Autor skupił się na wybranych problemach, związanych z możliwością plastycznego kształtowania blach, ze szczegółową charakterystyką aluminium i jego stopów, odkształcenia plastycznego na zimno oraz procesów kształtowania na ciepło i na gorąco. W rozdziale 3, podzielonym na podrozdziały 3.1-3.4, Doktorant przedstawił zagadnienia dotyczące możliwości aplikacji impulsów prądowych w procesach kształtowania plastycznego metali i ich stopów, w szczególności w obszarze kształtowania objętościowego oraz blach z metali nieżelaznych.

Analiza literaturowa, oparta w zdecydowanej większości o publikacje anglojęzyczne, została wykonana na wysokim poziomie, obejmując najważniejsze zagadnienia dotyczące tematyki podjętej w pracy.

Podsumowanie analizy literaturowej, zawarte w podrozdziale 3.4 stanowi łącznik pomiędzy stanem aktualnym a problemem badawczym i celem, realizowanym w ramach pracy doktorskiej. Uważam jednak, że informacje te powinny być zawarte w osobnym rozdziale 4, ewentualnie cząstkowe podsumowania powinny być zamieszczone po rozdziałach 2 i 3.

Na podstawie analizy stanu zagadnienia Autor, w rozdziale 4, przedstawił cel i tezę pracy, co stanowi zakończenie Części I dysertacji.

Głównym celem pracy jest *„określenie wpływu impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę stopów aluminium gatunków 5754 oraz 6016, w różnych stanach utwardzenia, w jednoosiowej próbie rozciągania oraz wybranych procesach tłoczenia blach”*. Dodatkowym, określonym przez Autora jako pobocznym, celem pracy jest *„określenie wpływu prędkości odkształcenia na zachowanie się wybranych stopów aluminium w próbie rozciągania z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych”*.

Natomiast na podstawie wstępnie przeprowadzonych badań i przeglądu literaturowego Doktorant formułował tezę: *„Możliwe jest zwiększenie odkształcalności wybranych stopów aluminium oraz zmiana ich mikrostruktury poprzez odpowiedni dobór parametrów prądowych oraz miejsca przepływu prądu w jednoosiowej próbie rozciągania i procesach tłoczenia blach z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych”*.

Sformułowane cele i teza są właściwe i jednoznacznie określają istotę rozprawy.

Według Autora osiągnięcie założonego celu pracy możliwe było poprzez realizację jednoosiowych prób rozciągania wybranych stopów aluminium, dla różnych prędkości odkształcenia i różnych stanów utwardzenia z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych i bez niej, jednoosiowych prób rozciągania wybranych stopów aluminium w podwyższonych temperaturach, skonstruowanie i zbudowanie stanowisk do realizacji procesów tłoczenia z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych, realizację procesów tłoczenia bez- i z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych, wykonanie badań metalograficznych wybranych próbek po procesach kształtowania bez- i z aplikacją impulsów prądowych z wykorzystaniem dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych oraz transmisyjnej mikroskopii elektronowej a także wykonanie pomiarów twardości.

Zakres badań jest bardzo szeroki, ale dopiero metodyka badawcza, przedstawiona w dalszej części dysertacji, prezentuje realny, imponujący obszar wykonanych prac badawczych i stopień ich zaawansowania.

Część II dysertacji, obejmująca badania własne, została podzielona na pięć rozdziałów (5-9).

W rozdziale 5 Doktorant przedstawił informacje dotyczące zastosowanych materiałów oraz metodyki badań własnych. W podrozdziale 5.1 Autor zamieścił informacje

dotyczące zastosowanych w pracy materiałów w postaci blach ze stopów aluminium, o grubości 1mm, w gatunku AW-5754, w stanie utwardzenia H111 i H22 oraz AW-6016, w stanie T4, przesyconym i wyżarzonym.

W podrozdziale 5.2 Doktorant zaprezentował informacje dotyczące metodyki, schematycznie przedstawionej w postaci ogólnego planu badań na rys. 5.1. Ogólnie badania podzielono na wytrzymałościowe i mikrostrukturalne. W zakresie badań wytrzymałościowych zrealizowano próby rozciągania (rys. 5.2) stopów aluminium bez- i z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych (Tabela 5.2). Badania stopu 5754 przeprowadzono dla stanów utwardzenia H111 i H22, przy czym dla stanu H111 zastosowano trzy różne prędkości odkształcenia. Badania stopu 6016 wykonano dla trzech stanów utwardzenia, tj. starzonego naturalnie, wyżarzanego oraz przesyconego. Dodatkowo dla stopów gatunku 5754 przeprowadzono próby rozciągania w podwyższonej temperaturze (rys. 5.3). Badania mikrostruktury wykonano przy pomocy dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych dla wszystkich badanych stopów oraz przy pomocy transmisyjnej mikroskopii elektronowej dla stopów gatunku 5754. Następnie, dla wyselekcjonowanych z prób rozciągania stopów, zrealizowano testy tłoczenia blach bez- i z jednoczesną aplikacją dwóch różnych sposobów dostarczenia impulsów prądowych. Próby te przeprowadzono z wykorzystaniem m. in. autorskich stanowisk badawczych z systemem komputerowej akwizycji danych (rys. 5.4-5.8), (Tabele 5.4-5.5). Dla wybranych wytłoczek wykonano pomiary twardości oraz badania mikrostruktury przy pomocy transmisyjnej mikroskopii elektronowej (rys. 5.11).

Przedstawiona metodyka badawcza została opracowana bardzo skrupulatnie i przejrzysto. Doktorant zaproponował kompleksowe podejście do kwestii opracowania zagadnień niezbędnych do prawidłowego wykonania eksperymentów. W pracy zastosowano bardzo szeroki aparat badawczy, wykorzystujący nowoczesne metody i urządzenia do przygotowania próbek, wykonywania poszczególnych badań oraz ich analizy.

Uważam, że wykorzystanie tak szerokiego potencjału wysoko zaawansowanych metod i aparatury badawczej, pozwoliło na kompleksową charakteryzację materiałów wsadowych oraz elementów uzyskanych w wyniku odkształcenia w próbie jednoosiowego rozciągania i tłoczenia, wspomaganym impulsami prądowymi.

Wyniki badań zamieszczono w rozdziałach 6-9. W rozdziale 6 przedstawiono wyniki próby rozciągania stopu aluminium gatunku 6016. W podrozdziale 6.1 zaprezentowano wyniki badań wytrzymałościowych. Inżynierskie krzywe rozciągania stopu aluminium 6016-T4 bez- i z aplikacją impulsów prądowych, o różnych wartościach, zostały zaprezentowane na rys. 6.1-6.2. Analogiczne krzywe dla stopu aluminium 6016-AN w stanie wyżarzonym przedstawiono na rys. 6.5-6.6, natomiast dla stopu aluminium 6016-SS w stanie przesyconym zaprezentowano na rys. 6.9-6.10. Wydłużenie próbek stopu aluminium 6016 w stanie T4, AN i SS zamieszczono na rys. 6.3, 6.7, 6.11, natomiast gęstość prądu i maksymalną temperaturę próbek dla wszystkich badanych parametrów prądowych przedstawiono na rys. 6.4, 6.8, 6.12.

W celu lepszego określenia wpływu stanu utwardzenia na zachowanie się stopu 6016, w próbie rozciągania, z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych, wprowadzono dwa parametry opisujące to zachowanie, tj. stosunków  $\sigma_{pc}/\sigma_{wc}$  oraz  $\epsilon_{pc}/\epsilon_{wc}$ . Pierwszy parametr to stosunek dwóch wartości naprężeń, gdzie  $\sigma_{pc}$  to wartość naprężenia z krzywej rozciągania dla parametrów prądowych 200 ms/7 s, odczytana 7 sekund po aplikacji pierwszego impulsu. Natomiast  $\sigma_{wc}$  to wartość naprężenia z krzywej rozciągania bez aplikacji impulsów prądowych, odczytana w tym samym punkcie, co dla  $\sigma_{pc}$ . Drugi parametr to stosunek dwóch wartości wydłużeń wyrażony jako  $\epsilon_{pc}/\epsilon_{wc}$ , gdzie  $\epsilon_{pc}$  to wydłużenie dla próby o parametrach prądowych 200 ms/10 s, podczas gdy  $\epsilon_{wc}$  to wydłużenie dla próby bez aplikacji prądu. Wyniki badań uzyskane z wykorzystaniem tych parametrów zostały przedstawione odpowiednio na rys. 6.13 i 6.14. Wykazano, że dla obu parametrów najwyższe wartości są osiągnięte dla stanu przesyconego, podczas gdy najniższe dla stanu starzonego naturalnie. Pośrednie wartości osiągnięte są przez stan wyżarzony.

Pomiary twardości (rys. 6.15) wykazały, że niezależnie od stanu materiału oraz zadanych parametrów, największą twardość występuję w obszarach blisko krawędzi pęknięcia, co jest związane z większym odkształceniem struktury w tym miejscu. Dla stopu starzonego naturalnie największe twardości zmierzono dla próbki bez aplikacji prądowej, podczas gdy próbki z aplikacją impulsów charakteryzują się wyraźnie niższą twardością. Zupełnie odwrotna sytuacja została zaobserwowana dla stopu przesyconego. Najmniejsza twardość została zmierzona dla próbki bez prądu, podczas gdy twardość w próbkach wspomaganych impulsami prądowymi była wyraźnie większa.

W podrozdziale 6.2 przedstawiono wyniki badań mikrostruktury stopu aluminium gatunku 6016 (T4 oraz SS) w stanie wejściowym (rys. 6.16) oraz po odkształceniu bez- i z aplikacją prądową (rys. 6.17-6.20) metodą EBSD w postaci map IPF i GOS oraz obserwacji z użyciem mikroskopu świetlnego (rys. 6.23).

Końcowy fragment tego podrozdziału dotyczy charakteru przełomów próbek po rozciąganiu. Dla próbek bez aplikacji impulsów widoczna jest charakterystyczna krawędź przełomu, nachylona pod kątem około  $45^\circ$  do kierunku rozciągania (rys. 6.24 a, c). bez przewężenia, co charakteryzuje przełom kruchy. Wraz ze wzrostem długości impulsu rośnie tendencja próbek do przewężenia oraz obecność krawędzi przełomu prostopadłej do kierunku rozciągania (rys. 6.24b), co cechuje przełom ciągliwy.

W podrozdziale 6.3 Autor dokonał wnikliwej analizy wyników badań zaprezentowanych w podrozdziałach 6.2-6.3, na podstawie której przedstawił wnioski determinujące realizację kolejnych badań. Doktorant stwierdził, że wpływ impulsów prądowych na wzrost plastyczności stopów aluminium gatunku 6016 jest nieznaczny, wzrost wydłużenia zaobserwowany został wyłącznie dla stanu przesyconego, natomiast dla pozostałych stanów zaobserwowano spadek wydłużenia. Aplikacja impulsów prądowych i towarzyszący temu wzrost temperatury są odpowiedzialne za spadek właściwości wytrzymałościowych stopu w stanie T4. Badania wykazały spadek twardości tych stopów po procesie aplikacji impulsów prądowych, za co odpowiedzialne były zmiany w zakresie faz umacniających, co potwierdziły obserwacje przy wykorzystaniu mikroskopii świetlnej.

Aplikacja impulsów prądowych i towarzyszący temu wzrost temperatury są również odpowiedzialne za wzrost właściwości wytrzymałościowych stopu w stanie przesyconym. Badania wykazały wzrost twardości tych stopów po procesie aplikacji impulsów prądowych, co wskazuje na polepszenie procesu starzenia w wyniku aplikacji impulsów prądowych. Badania wykazały nieznaczny wpływ impulsów prądowych na wzrost plastyczności stopów aluminium gatunku 6016. Na podstawie uzyskanych wyników i ich analizy zdecydowano, że stopy aluminium gatunku 6016, niezależnie od stanu utwardzenia, nie zostały przeznaczone do prób tłoczenia z aplikacją impulsów prądowych, ponieważ wyniki nie wskazują na możliwość zwiększenia tłoczności tych stopów w próbach tłoczenia.

Analogiczne badania zostały zrealizowane dla stopu aluminium 5754 w stanie H111, przy czym zakres badań rozszerzono do trzech prędkości odkształcenia, tj. 0,04, 0,01 oraz 0,0025 1/s, a także o próby rozciągania wykonane w podwyższonej temperaturze (rozdział 7). W podrozdziale 7.1 Doktorant zaprezentował wyniki badań wytrzymałościowych. Inżynierskie krzywe rozciągania stopu aluminium 5754-H111, bez- i z aplikacją impulsów prądowych o różnych wartościach, dla prędkości odkształcenia równej 0,04 1/s, 0,01 1/s, 0,0025 1/s zostały przedstawione odpowiednio na rys. 7.1-7.3, 7.7-7.9, 7.13-7.17, przy czym na rys. 7.16 oraz 7.17 przedstawiono wpływ okresu impulsów na kształt krzywej dla stałej wartości czasu trwania impulsu wynoszącego 300 ms, a na rys. 7.17 znajduje się krzywa dla parametrów 400 ms/50 s. Dla poszczególnych parametrów prądowych średnie wartości gęstości prądu przedstawiono odpowiednio na rys. 7.5, 7.11, 7.20 i 7.22a. a maksymalne temperatury, zarejestrowane w trakcie prób, na rys. 7.6, 7.12, 7.21 i 7.22b.

W podrozdziale 7.2 przedstawiono wyniki badań mikrostruktury stopu 5754-H111 dla próbek bez- i z aplikacją impulsów prądowych o parametrach 300 ms/24 s ( $\dot{\epsilon} = 0,0025$  1/s). Próbki te zostały otrzymane w ten sposób, że odpowiednie próby rozciągania dla powyższych parametrów zostały zatrzymane po aplikacji trzeciego oraz piątego impulsu i ze środka tak otrzymanych próbek po rozciągnięciu wycięto fragmenty do badań mikrostruktury. Próbka bez aplikacji prądowej została rozciągnięta do tej samej wartości wydłużenia, co próbka z aplikacją trzech impulsów. Tak otrzymane próbki poddano obserwacjom mikroskopowym metodą EBSD i przedstawiono w postaci map IPF i GOS (rys. 7.28-7.31) oraz za pomocą mikroskopii transmisyjnej (rys. 7.33-7.35).

Końcowy fragment tego podrozdziału dotyczy charakteru przełomów próbek po rozciągnięciu. Dla próbek bez aplikacji impulsów widoczna jest charakterystyczna krawędź przełomu, nachylona pod kątem około 45° do kierunku rozciągania, bez wyraźnego przewężenia. Dla wybranych parametrów prądowych, zazwyczaj o większej długości impulsu, próbki pękały prostopadle lub prawie prostopadle do kierunku rozciągania, z wyraźnym widocznym przewężeniem (rys. 7.36).

W podrozdziale 7.3. Autor dokonał wnikliwej analizy wyników badań zaprezentowanych w podrozdziałach 7.2-7.3. Doktorant stwierdził, że aplikacja impulsów prądowych skutkuje wyraźnym wzrostem plastyczności stopu 5754-H111 w próbie rozciągania. Dla wybranych parametrów prądowych wydłużenie badanego stopu wzrosło o ponad 50%, tj. o prawie 2 razy więcej niż dla próby rozciągania w temperaturze 150 °C.

Obserwowany wzrost wydłużenia jest tym większy, im mniejsza jest prędkość odkształcenia. Analiza zachowania się materiału w różnych warunkach pozwoliła na dobór optymalnych parametrów prądowych, zapewniających największy wzrost plastyczności badanego stopu. Największy wzrost wydłużenia został zaobserwowany dla impulsów o długości 300 ms. Dla prędkości odkształcenia o wartości 0,0025 1/s szeroki zakres zastosowanych wartości okresu (od 18 do 37,5 s) pozwala na uzyskanie zbliżonych, dużych wartości wydłużenia. Analiza spadku naprężenia, w wyniku aplikacji impulsu prądowego, dla różnych prędkości odkształcenia, w szczególności dla  $\dot{\epsilon} = 0,04$  1/s, pozwala na wyznaczenie rzeczywistej wartości  $\Delta\sigma$ . Procesy zdrowienia dynamicznego oraz w mniejszym stopniu rekrytalizacji dynamicznej są odpowiedzialne za wzrost wydłużenia badanych stopów. Uzasadnieniem tego są obserwacje mikrostruktury przy pomocy mikroskopii transmisyjnej, potwierdzające obecność nowych zarodków ziaren oraz podstruktur dyslokacyjnych typowych dla procesów zdrowienia.

Analogiczne badania zostały zrealizowane dla stopu aluminium 5754 w stanie H22, dla prędkości odkształcenia 0,0025 1/s, która została wytypowana z uwagi na mniejsze wydłużenie badanego stopu oraz interesujące wyniki badań, uzyskane dla tej prędkości w stopie 5754-H111, a także o próby rozciągania wykonane w podwyższonej temperaturze (rozdział 8). W podrozdziale 8.1 Doktorant zaprezentował wyniki badań wytrzymałościowych. Inżynierskie krzywe rozciągania stopu aluminium 5754-H22, bez- i z aplikacją impulsów prądowych o różnych wartościach, dla prędkości odkształcenia równej 0,0025 1/s zostały przedstawione odpowiednio na rys. 8.1-8.4, przy czym na rys. 8.1-8.2 zostały przedstawione wyniki obrazujące wpływ wzrostu czasu trwania impulsu (przy stałej wartości stosunku  $t_i/t_o$  wynoszącego 1:60) na kształt krzywej rozciągania, natomiast na rys. 8.3-8.4 przedstawiono wpływ okresu impulsów na kształt krzywej dla stałej wartości czasu trwania impulsu wynoszącego 300 ms. Dodatkowo na rysunku 8.4 znajduje się krzywa dla parametrów 400 ms/24 s.

Dla poszczególnych parametrów prądowych średnie wartości gęstości prądu przedstawiono odpowiednio na rys. 8.7 i 8.9. a maksymalne temperatury zarejestrowane w trakcie prób na rys. 8.8 i 8.10. Na rys. 8.11 przedstawiono krzywą naprężenie-czas dla próby o parametrach 300 ms/18 s z dodatkowo naniesioną, przykładową krzywą temperatura-czas, natomiast na rys. 8.12 zaprezentowano krzywe z prób rozciągania w temperaturze otoczenia oraz 150 °C, bez aplikacji impulsów prądowych.

W podrozdziale 8.2 przedstawiono wyniki badań mikrostruktury stopu 5754-H22 dla próbek bez- i z aplikacją impulsów o parametrach 300 ms/18 s, 400 ms/24 s.. Próbki otrzymano w ten sposób, że odpowiednie próby rozciągania dla parametrów 300 ms/18 s zostały zatrzymane po aplikacji drugiego oraz czwartego impulsu, a dla parametrów 400 ms/24 s po aplikacji drugiego, trzeciego oraz czwartego impulsu. Ze środka tak otrzymanych próbek po rozciągnięciu wycięto fragmenty do badań mikrostruktury. Próbki bez aplikacji prądowej zostały rozciągnięte do tej samej wartości wydłużenia, co próbki z aplikacją dwóch impulsów. Tak otrzymane próbki poddano obserwacjom mikroskopowym metodą EBSD i przedstawiono w postaci map IPF, GOS i KAM (rys. 8.14-8.17, 8.19-8,22, 8,24-8,25) oraz za pomocą mikroskopii transmisyjnej (rys. 8.27-8.30).

Pomiędzy obserwacjami struktury metodą EBDS i mikroskopii transmisyjnej zamieszczono informacje dotyczące charakteru przełomów próbek po rozciąganiu. Dla próbek bez aplikacji impulsów widoczna jest charakterystyczna krawędź przełomu, nachylona pod kątem około  $45^\circ$  do kierunku rozciągania, bez wyraźnego przewężenia. Linia krawędzi przełomu jest również równoległa do powstałych na próbce pasm Lüdersa. Kolejne próbki, rozciągane z aplikacją impulsów prądowych, charakteryzują się coraz większym przewężeniem oraz kątem nachylenia krawędzi przełomu, który dla trzech ostatnich jest bliski  $90^\circ$ .

W podrozdziale 8.3. Autor dokonał wnikliwej analizy wyników badań zaprezentowanych w podrozdziałach 8.2-8.3. Doktorant stwierdził, że aplikacja impulsów prądowych skutkuje wyraźnym wzrostem plastyczności stopu 5754-H22 w próbie rozciągania. Dla wybranych parametrów prądowych wydłużenie badanego stopu wzrosło o ponad 100%, tj. około 5 razy więcej niż dla próby rozciągania w temperaturze  $150^\circ\text{C}$ . Analiza zachowania się materiału w różnych warunkach pozwoliła na dobór optymalnych parametrów prądowych zapewniających największy wzrost plastyczności badanego stopu. Największy wzrost wydłużenia został zaobserwowany dla aplikacji impulsów o parametrach 300 ms/18s oraz 400 ms/24 s, dla stosunku  $t_i/t_o$  wynoszącego 1:60. Procesy zdrowienia dynamicznego oraz rekrytalizacji dynamicznej są odpowiedzialne za wzrost wydłużenia badanych stopów. Potwierdzeniem tego są obserwacje mikrostruktury przy pomocy transmisyjnej mikroskopii elektronowej oraz dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych potwierdzające obecność nowych zarodków ziaren oraz podstruktur dyslokacyjnych typowych dla procesów zdrowienia.

Próby tłoczenia (rozdział 9) zostały zrealizowane z wykorzystaniem urządzenia Erichsen. przy użyciu dwóch trybów, tj. SHQR i DPS. Tryb SHQR (ang. Sheet Holder Quick Release) charakteryzuje się tym, że po osiągnięciu przez stempel zadanej wysokości, siła docisku o zadanej, początkowej wartości natychmiastowo spada do zera, a ruch stempla jest dalej kontynuowany bez żadnego zatrzymania. W trakcie realizacji procesu tłoczenia w trybie SHQR, spadkowi siły docisku towarzyszy charakterystyczny spadek siły na stemple, który jest wyraźnie widoczny na wykresie siła-przemieszczanie. W procesach tłoczenia w tym trybie, aplikacja impulsów następowała od momentu zwolnienia siły docisku. Tryb SHQR został zastosowany w celu ograniczenia przepływu ciepła z próbki do narzędzi. Tryb DPS (ang. Drawing Punch Stop) charakteryzuje się tym, że po osiągnięciu przez stempel zadanej wysokości następuje jego zatrzymanie i koniec procesu. W tym trybie siła docisku była stała przez cały okres próby, a zadana wysokość stempla miała taką wartość, aby pęknięcie próbki następowało przed jej osiągnięciem. Do badań zastosowano pięć rodzajów próbek. Dla pierwszego wariantu narzędzi, w którym elektrody znajdowały się na bokach, zastosowano dwa rodzaje próbek, tj. obcięte krążki oraz paski. Dla drugiego wariantu narzędzi, w którym elektrody były jednocześnie narzędziami, zastosowano trzy rodzaje próbek, tj. paski, krążki oraz wycięte krążki.

W podrozdziale 9.1 zaprezentowano wyniki badań wytrzymałościowych. Krzywe siła-przemieszczenie dla procesu tłoczenia stopu aluminium 5754-H22 (wariant elektrody-narzędzia), bez- i z aplikacją impulsów prądowych, dla dwóch rodzajów próbek, tj. pasków



oraz krążków, przy użyciu trybów pracy DPS oraz SHQR, przedstawiono na rys. 9.1. Zestawienie średnich wartości przemieszczenia (zagłębienia) stempla dla zastosowanych parametrów i próbek zaprezentowano na rys. 9.2. Natomiast średnie wartości gęstości prądu oraz maksymalnej temperatury zarejestrowanej w trakcie próby dla zastosowanych parametrów i próbek, przedstawiono na rys. 9.3a oraz 9.3b. Analogiczne wyniki dla próbek wyciętych krążków przedstawiono na rys. 9.4-9.6. Wyniki procesu tłoczenia stopu aluminium 5754-H111 (wariant elektrody na bokach) bez- i z aplikacją impulsów prądowych przedstawiono na rys. 9.7-9.9, a analogiczne wyniki dla próbek wyciętych krążków przedstawiono na rys. 9.10-9.12. Dla pozostałych wariantów krzywe siła-przemieszczenie przedstawiono na rys. 9.13-9.14, 9.17-9.18, 9.21, zestawienie średnich wartości przemieszczenia (zagłębienia) stempla na rys. 9.15, 9.19, 9.22, natomiast wyniki średnich wartości gęstości prądu oraz maksymalnej temperatury na rys. 9.16, 9.20, 9.23. Rozkłady twardości zaprezentowano na rys. 9.26-9.28, natomiast przykładowe wytłoczki na rys. 9,29-9,31.

W podrozdziale 9.2 zamieszczono wyniki obserwacji mikrostrukturalnych wykonanych z wykorzystaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej.

W podrozdziale 9.3 Autor dokonał wnikliwej analizy wyników badań zaprezentowanych w podrozdziałach 9.2-9.3. Doktorant stwierdził, że aplikacja impulsów prądowych skutkowałą wzrostem zagłębienia stempla stopów gatunku 5754 w próbach tłoczenia próbek-pasków, w trybie SHQR. Dla wybranych parametrów prądowych zagłębienie stempla wzrosło o 26,2% dla stanu H22 oraz 14% dla stanu H111. Przeprowadzenie tych samych prób tłoczenia w trybie DPS nie spowodowało wzrost zagłębienia stempla. Badania mikrostruktury przy pomocy mikroskopii transmisyjnej wykazały, że m.in. procesy zdrowienia dynamicznego są odpowiedzialne za wzrost plastyczności badanych stopów. Aplikacja impulsów prądowych nie skutkuje zwiększeniem wzrostu zagłębienia stempla dla próbek tłoczonych w trybie DPS oraz o dużej powierzchni przekroju poprzecznego, z uwagi na odpowiednio nadmierny przepływ ciepła do narzędzi oraz małą wartość nominalnej gęstości aplikowanego prądu.

Rozdział 10 (str. 149-150) to podsumowanie tej, napisanej na wysokim poziomie, dysertacji, zredagowane w formie 10 wniosków o charakterze poznawczym, 7 wniosków o charakterze użytkowym, stanowiących kompleksowe wytyczne, które mogą być wykorzystane w ramach dalszych pracach, dotyczących procesu kształtowania stopów aluminium z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych.

W końcowej części Doktorant przedstawił propozycje kolejnych badań dotyczących wpływu impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę wybranych stopów metali o mniejszej przewodności cieplnej niż stopy aluminium oraz w procesach złożonego odkształcenia plastycznego z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych. Badania będą realizowane w ramach projektu Preludium NCN (nr 2022/45/N/ST8/03048), którego Autor niniejszej rozprawy jest kierownikiem.

**Za osiągnięcia Doktoranta uważam:**

- projekt i budowę stanowisk do realizacji procesów tłoczenia z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych,
- kompleksową analizę wpływu impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę stopów aluminium gatunków 5754 oraz 6016, w różnych stanach utwardzenia, w jednoosiowej próbie rozciągania oraz wybranych procesach tłoczenia blach, zrealizowaną z zastosowaniem zaawansowanych metod i urządzeń badawczych,
- określenie warunków (parametrów) realizacji procesu kształtowania plastycznego, wspomaganego aplikacją impulsów prądowych oraz wykazanie potencjału tej metody, umożliwiających wzrost odkształcalności stopów aluminium gatunków 5754 oraz 6016 co w perspektywie może mieć znaczenie aplikacyjne,
- wprowadzenie nowych parametrów, tj. stosunków  $\sigma_{pc}/\sigma_{wc}$  oraz  $\epsilon_{pc}/\epsilon_{wc}$ , które są przydatnymi narzędziami do opisu różnic we właściwościach stopów dla różnych stanów utwardzenia.

Lektura pracy była dużą przyjemnością z uwagi na jej logiczny układ oraz sposób przedstawienia, zarówno informacji w części analizy literaturowej, jak i wyników badań. Znaczna ilość zrealizowanych badań eksperymentalnych i materiałowych, niewątpliwie świadczy o dużej wiedzy Doktoranta w wielu obszarach badawczych, zaprezentowanych w dysertacji, jak i o umiejętności planowania eksperymentów oraz właściwej analizie i wnioskowania.

Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań pozwoliły na osiągnięcie założonego celu głównego i dodatkowego oraz udowodnienie przyjętej tezy, że możliwe jest zwiększenie odkształcalności wybranych stopów aluminium oraz zmiana ich mikrostruktury poprzez odpowiedni dobór parametrów prądowych oraz miejsca przepływu prądu w jednoosiowej próbie rozciągania i procesach tłoczenia blach z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych.

Praca została zredagowana poprawną polszczyzną, zarówno pod względem ogólnym, jak i technicznym.

Przedstawiona do oceny dysertacja stanowi oryginalne osiągnięcie Doktoranta. Badania zostały zrealizowane na wysokim poziomie z dbałością o szczegóły, z zachowaniem zasad prawidłowej realizacji eksperymentu naukowego, udokumentowane dużą ilością wykresów, fotografii i tablic. Dysertację można ją określić jako kompendium wiedzy, które może być wykorzystane przy dalszych pracach naukowo-badawczych oraz aplikacyjnych, dotyczących procesu kształtowania plastycznego blach ze stopów aluminium, wspomaganego przez impulsy prądowe.

## Uwagi krytyczne

Lektura rozprawy nasuwa pewne uwagi i wątpliwości, które mają charakter dyskusyjny.

1. W streszczeniu Autor stwierdza, że: „W części badawczej przedstawiono wyniki z zakresu badań wytrzymałościowych oraz mikrostrukturalnych wybranych stopów aluminium. W zakresie badań wytrzymałościowych przeprowadzono próby rozciągania stopów aluminium gatunków 6016 oraz 5754 z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych oraz bez niej”. W dalszej części pracy wprowadzono podrozdziały 6.1, 7.1, 8.1, 9.1 zatytułowane „Badania wytrzymałościowe”. Uważam takie sformułowanie za niewłaściwe. Jak wiadomo właściwości mechaniczne materiałów można podzielić na wytrzymałościowe i plastyczne. Próby rozciągania stosowane przez Doktoranta do charakteryzacji materiałów zostały zaprezentowane w postaci wykresów naprężenie=f(wydłużenie). Nie przedstawiono wykresów maksymalnych wartości naprężenia w zależności od zastosowanych parametrów prądowych oraz prędkości odkształcenia. Zaprezentowano natomiast wykresy maksymalnych wartości wydłużenia (np. 6.11, 7.10, 8.5, w zależności od parametrów stosowanych w trakcie próby rozciągania, co jak wiadomo pozwala na uzyskanie informacji o właściwościach plastycznych odkształcanego materiału.
2. Zarówno w tytule, celu pracy jak i przede wszystkim w metodyce jako pierwszy pojawia się stop AW-5754 a potem stop AW-6016. Jednak wyniki badań rozpoczynają się od stopu AW-6016. Uważam, że wyniki badań powinny być zaprezentowane dla stopu AW-5754, ze względu na ich dużą ilość i kompletność. Natomiast ewentualnie, choć niekoniecznie, wyniki badań dla stopu AW-6016 można było przedstawić w ostatnim rozdziale.
3. Brak informacji dotyczącej powodu wytypowania do badań blach ze stopów aluminium gatunków AW-5754 oraz AW-6016, w różnych stanach utwardzenia.
4. Brak informacji dotyczącej powodu zastosowania różnych parametrów w próbie rozciągania i tłoczenia dla blach badań blach ze stopów aluminium gatunków AW-5754 oraz AW-6016.
5. Podsumowanie analizy literaturowej sformułowane w podrozdziale 3.4 a powinno być zawarte w osobnym rozdziale 4, ewentualnie cząstkowe podsumowania powinny być zamieszczone po rozdziałach 2 i 3.
6. Tekst zamieszczony po tytule rozdziału 6 jest w pewnym sensie powtórzeniem informacji przedstawionych w części rozdziału 5 dotyczącej metodologii badawczej.
7. Test zamieszczony w pierwszym akapicie w podrozdziale 6.2 powinien być zamieszczony w rozdziale 5, dotyczącej metodologii badawczej.
8. Podpisy pod wykresami na Rys. 6.1-6.2, 6.5-6.6 i 6.9-6.10 mają taką samą treść. Powinny być zróżnicowane, np. przez parametry prądowe.

9. Podpisy pod wykresami na Rys. 7.1-7.3, 7.7-7.9 i 7.13-7.17 mają taką samą treść. Powinny być zróżnicowane, np. przez parametry prądowe.
10. Podpisy pod wykresami na Rys. 8.1-8.4 mają taką samą treść. Powinny być zróżnicowane, np. przez parametry prądowe.
11. Podpisy pod wykresami na rys. 9.1, 9.4, 9.7, 9.10, 9.13-9.14, 9.17-9.18, 9.21 zestawienie średnich wartości przemieszczenia (zagłębienia) stempla na rys. 9.2, 9.5, 9.8, 9.11, 9.15, 9.19, 9.22, wyniki średnich wartości gęstości prądu oraz maksymalnej temperatury na rys. 9.3, 9.6, 9.9, 9.12, 9.16, 9.20, 9.23 mają odpowiednio taką samą treść. Powinny być zróżnicowane, np. przez parametry prądowe.
12. Podpis „Rys. 9.2 Przemieszczenie stopu aluminium 5754-H22 dla wszystkich badanych parametrów prądowych.” jest niewłaściwy. Powinno być np. Rys. 9.2 Przemieszczenie stempla w trakcie tłoczenia stopu aluminium 5754-H22 dla wszystkich badanych parametrów prądowych. Również opis osi Y jest niewłaściwy. To samo dotyczy pozostałych podpisów pod rys. 9.5, 9.8, 9.11, 9.15, 9.19, 9.22, które dotyczą przemieszczenia.

Pomimo starannego zredagowania rozprawy wystąpiły w niej błędy edycyjne i niedopatrzenia:

- strona edycyjna w rozdziałach 2-3 pozostawia dużo do życzenia pod kątem zamieszczonych schematów i wykresów, zaczerpniętych z literatury, charakteryzujących się zróżnicowaną wielkością, czcionką, opisami, itd.,
- w Streszczeniu (str. 4.), zawartym na jednej stronie, 11 razy pojawia się słowo „przeprowadzono”, choć można było zamiennie użyć słów „zrealizowano” lub „wykonano”,
- w Streszczeniu (str. 4) w ostatnim akapicie występują błędy edycyjne,
- po Abstract (str. 5) sformułowano Key words, natomiast brak słów kluczowych w języku polskim po rozdziale Streszczenie,
- liczne schematy nie zostały wykonane samodzielnie przez Autora, natomiast wykonano ksero, skan i zamieszczono w pracy, np. rys. 2.1, 2.4,
- podpisy pod rysunkami w większości wyjustowane ale też z wyrównaniem do lewej, np. na rys. 2.5,
- w wielu przypadkach opisy rysunków lub osi na wykresach są w języku angielskim, np. rys. 2.6-2.11, 2.13b, 3.1, 3.4-3.6, 3.12, 3.16-3.23, 3.25, 3.27-3.28, 3.30, 3.32-3.38. Skoro praca została zredagowana w języku polskim to nie powinna zawierać takich elementów, mimo, że dotyczy to przypadków zaczerpniętych z anglojęzycznej literatury,
- zróżnicowany rodzaj czcionki na schematach, np. rys. 3.2, 3.26-3.27-3.28, 3.30, 3.32-3.28, 5.4-5.5, i tabelach, np. 3.1, 5.3-5.5,

- schemat próbki do badań wytrzymałościowych (rys. 5.3b), nie powinien znaleźć się w takiej formie edycyjnej, w tak znakomitej pracy,
- błąd w oznaczeniu „Rys. 2.9.1 Krzywe...”, powinno być Rys. 9.1,
- błąd edycyjny: „Przeprowadzenie tych samych prób tłoczenia w trybie DPS nie spowodowało wzrost zagłębienia stempla”, str.147.

Powyższe uwagi merytoryczne i edycyjne nie umniejszają dużej wartości dysertacji. Uważam rozprawę doktorską za bardzo wartościową i oryginalną.

### **Ocena końcowa**

Ocena przedstawionej do zaopiniowania rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela Dobrasa upoważnia mnie do stwierdzenia, że Autor dokonał wnikliwej analizy stanu zagadnienia i na tej podstawie trafnie sformułował cele rozprawy. Poprzez bardzo szerokie badania materiałowe oraz wnikliwą ich analizę, cele zostały przez Doktoranta osiągnięte.

Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że mgr inż. Daniel Dobras wykazał się bardzo dobrą znajomością przedmiotu badań i poprawnie oraz bardzo starannie zredagował dysertację. Wykazał się przy tym bardzo dobrym przygotowaniem merytorycznym, umiejętnością wykorzystania metod, technik i narzędzi badawczych, zdolnością do samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych oraz ich analizy.

Recenzowana rozprawa doktorska może być przypisana do dyscypliny naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn (Inżynieria Mechaniczna).

### **Wniosek**

Przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska mgr inż. Daniela Dobrasa pt. „Wpływ impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę stopów aluminium gatunków 5754 oraz 6016 w wybranych procesach kształtowania blach” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule z Zakresu Sztuki z dnia 14.03.2003r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595) z późniejszymi zmianami.

W związku z powyższym wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie mgr inż. Daniela Dobrasa do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

dr hab. inż. Krzysztof Żaba, prof. AGH

