

dr hab. inż. Sławomir Świłło  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Instytut Technik Wytwarzania  
Zakład Obróbki Plastycznej i Odlewnictwa  
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

Warszawa, 13.07.2023 r.

### **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

pt. Wpływ impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę stopów aluminium gatunków 5754 oraz 6016 w wybranych procesach kształtowania blach

autor: mgr inż. Daniel Dobras

promotor: dr hab. inż. Zbigniew Zimniak, prof. PWr

promotor pomocniczy: dr hab. inż. Maciej Zwierzchowski, prof. PWr

### **PODSTAWA OPRACOWANIA RECENZJI**

Podstawą formalną recenzji jest pismo: adresowane przez Pana Profesora Zbigniewa Gronostajskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, Politechnika Wrocławska, z dnia 8 maja 2023 roku.

Celem recenzji jest stwierdzenie, czy przedłożona rozprawa doktorska spełnia wymogi określone artykułem 13 ustęp 1, ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 z 16 kwietnia 2003 r., poz. 595).

Podczas redagowania recenzji przyjęto formułę, w której na wstępie przedstawiono wniosek odnośnie warunków dopuszczenia do obrony publicznej Pana mgr inż. Daniela Dobrasa, a w kolejnej części recenzji, przedstawiono uzasadnienie wniosku wraz ze szczegółowym opisem, obejmującym następujące punkty:

1. Identyfikacja problemu i wybór tematu
2. Ocena poprawności sformułowanych celów i tezy
3. Sposób prowadzenia badań i umiejętność wykorzystania narzędzi – metodyka badań
4. Analiza literaturowa, dobór i sposób wykorzystania źródeł
5. Ocena wartości merytorycznej pracy - rozwiązanie zadania badawczego
6. Układ i redakcja pracy
7. Podsumowanie recenzji

## WNIOSEK

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską, oceniam bardzo pozytywnie niniejszą pracę, tak pod względem formalnym, jak i merytorycznym. Spełnione zostały przy tym wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Art. 13 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Rozprawa została przygotowana pod opieką promotora dra hab. inż. Zbigniewa Zimniaka prof. PWr oraz przy współudziale promotora pomocniczego dra hab. inż. Maciej Zwierzchowski, prof. PWr. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska reprezentuje wysoki poziom wiedzy teoretycznej i merytorycznej, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz odpowiednie przygotowanie Autora do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dziedzinie nauk technicznych w zakresie dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn (aktualnie Inżynieria Mechaniczna).

Według mojej opinii, rozprawa doktorska zasługuje na wyróżnienie w związku z wyjątkowo wysokim poziomem naukowym. Potwierdzeniem tego wniosku jest również nieprzeciętny dorobek publikacyjny Autora, na który składa się siedem publikacji o zasięgu międzynarodowym (lista JCR). Publikacje te reprezentują oryginalny, eksperymentalny obszar badawczy, wykorzystując nowe technologie przemysłowe. W związku z powyższym wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej, o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Daniela Dobrasa na temat: „Wpływ impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę stopów aluminium gatunków 5754 oraz 6016 w wybranych procesach kształtowania blach” do publicznej obrony i dalszego procedowania, w celu nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych w zakresie dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn (aktualnie Inżynieria Mechaniczna).

### **1. Identyfikacja problemu i wybór tematu**

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej jest określenie wpływu impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę stopów aluminium gatunków 5754 oraz 6016 w jednoosiowej próbie rozciągania oraz wybranych procesach tłoczenia blach. W związku z tym, dokonana została przeze mnie, szczegółowa analiza problemu w kontekście poszukiwanych przez Autora dysertacji rozwiązań w związku z wyborem tematu. Starłem się w tym opisie podkreślić, nie tylko dostrzeżone (podczas przeglądu literatury naukowej) aktualne osiągnięcia, wyniki czy kierunki badań, ale także czynniki krytyczne, wątpliwości czy hipotezy w odniesieniu do zjawisk związanych z zastosowaniem impulsów prądowych. Na początek warto podkreślić, że podczas identyfikacji problemu badawczego, odnalazłem niezwykle kluczowy dla podjęcia tematu element, jakim jest potrzeba dążenia do zrównoważonego technologicznie i ekonomicznie procesu produkcji. Takie działania wiążą się ze zmniejszeniem negatywnego wpływu na środowisko i wykorzystaniem innowacyjnych rozwiązań technologicznych. To jest takie podejście, w którym skupiamy się na zmniejszeniu destrukcyjnego wpływu na środowisko naturalne oraz całą gospodarkę. Ma to swoje bardzo wyraźne odniesienie do regulacji Unijnej w tym zakresie, dotyczących między innymi redukcji emisji gazów cieplarnianych, czy poprawy efektywności paliwowej. Znajduje to swoje odzwierciedlenie w stale rosnącym wykorzystaniu takich materiałów, jak: stopy aluminium, w szczególności aluminium EN AW 6061 oraz 5754 (będących obiektem badań).

Głównym odbiorcą stopów aluminium jest przemysł motoryzacyjny, gdzie oczekuje się, że redukcja ciężaru w samochodach elektrycznych na przestrzeni dekady (2025-2035) wzrośnie 10-30% (Liu et al. 2010). Trudno jest jednak stworzyć złożony kształt części, których formowanie na zimno przy użyciu stopów aluminium o wysokiej wytrzymałości jest ograniczone ze względu na ich słabą odkształcalność i nadmierne odsprężynowanie. Wymaga to więc zmiany strategii w podejściu do technologii procesów kształtowania plastycznego, znosząc ich aktualne ograniczenia słabej



odkształcalności w temperaturze pokojowej w porównaniu z konwencjonalnymi stopami żelaza. Powszechnie stosowaną praktyką, w celu polepszenia własności plastycznych stopów aluminium jest kształtowanie w podwyższonej temperaturze (na ciepło i na gorąco – (Wang et al. 2017)). Niestety, prowadzi to do negatywnych skutków w dwóch obszarach: technologii oraz efektywności energetycznej. W obszarze technologii wiąże się to z takimi ograniczeniami, jak: zwiększona przyczepność między próbką a matrycą, zmniejszenie efektu smarowania i zmniejszona wytrzymałość matrycy. Z kolei, w odniesieniu do konwencjonalnych metod polepszania własności plastycznych poprzez podwyższenie temperatury materiału, wiąże się z koniecznością przeprowadzenia procesu w piecach termicznych. Ta metoda obróbki cieplnej jest czasochłonna i energochłonna, co przekłada się na brak energooszczędności i duże straty energii podczas długotrwałych procedur ogrzewania i chłodzenia. Można jednak zauważyć, że w ostatnich latach wzrosło znacząco, zainteresowanie technologiami kształtowania ze wspomaganie prądowym. W wyniku tego podejścia (względem konwencjonalnych technik podgrzewania), uzyskuje się energię cieplną (będącą wynikiem wewnętrznej oporności elektrycznej przewodników metalowych) oraz dodatkowo, usprawnienie przemieszczeń dyslokacji (na skutek migracji atomowej), będące wynikiem prądu elektrycznego o wysokiej gęstości.

Koncepcja wspomaganie prądowego procesów deformacji (znana jako: efekt elektroplastyczności, z ang. electroplastic effect (EPE)) została zaproponowana w 1963 roku przez Troitskiego i Lightmana, którzy zaobserwowali, że towarzyszy temu redukcja naprężenia i zwiększenie wydłużenia kształtowanego materiału. Warto w tym miejscu krótko opisać przebieg procesu kształtowania ze wspomaganie impulsowym. Z chwilą przyłożenia impulsu prądu do rozciąganej próbki metalowej, naprężenie uplastyczniające spada i szybko się regeneruje, gdy prąd impulsu się skończy. Obserwujemy w tym miejscu tzw. spadek naprężenia, który jednak nie jest w pełni odzyskiwany. Z chwilą podania kolejnych impulsów naprężenie uplastyczniające (po zregenerowaniu) systematycznie spada. W późniejszych swoich pracach Troitskii argumentował, że zjawisko może być związane z tzw. efektem wiatru elektronowego wpływającego na przemieszczanie się dyslokacji i zaproponował zastosowanie prądu o wysokiej częstotliwości pulsowania, czynnika decydującego o zmianach mechanicznych metalu podczas kształtowania. Od tego czasu, zanotować można liczne prace w różnych ośrodkach naukowych na całym świecie, odnoszące się do tej techniki w różnych jej aspektach (Arka Lahiri et al. 2019). Pomimo jednak, że od odkrycia elektroplastyczności minęło już 60 lat, ciągle nie są w pełni znane mechanizmy odpowiedzialne za to zjawisko. Uznaje się więc za oczywiste, że powtarzające się impulsy elektromagnetyczne podczas deformacji, są odpowiednikiem kształtowania w podwyższonej temperaturze przy jednoczesnym, znacznym obniżeniu kosztów energii. Jednocześnie, bazując na licznych opracowaniach (na przestrzeni sześciu dekad) oraz zbiorach pojęć i teorii w odniesieniu do efektu elektroplastyczności, doczekaliśmy się rozwoju tzw. paradygmatów produkcji. To właśnie nieustanne wysiłki badaczy, zmierzające do zrozumienia istoty mechanizmu elektroplastyczności, przyczyniły się do postulowania rozwiązań, skutecznie wykorzystujących korzyści płynące z zastosowania EP w przemyśle wytwórczym. Warto jest więc, nakreślić niektóre z tych pojęć, kategoryzując i przypisując im pewne zadania, opisy i ustalenia. **Po pierwsze**, wyróżnia się kategorie procesów wytwarzania wspomaganie prądowo (z ang. Electrically-Assisted Manufacturing (EAM)), do których zaliczyć można obok techniki kształtowania plastycznego, również technikę łączenia oraz obróbkę metalu. Główną jednak grupę wytwarzania, stanowią procesy kształtowania plastycznego (z ang. Electrically-Assisted Forming (EAF)), gdzie wyróżnić można takie grupy technologii, jak: kształtowanie objętościowe i kształtowanie blach. **Po drugie**, wyróżnia się liczne przykłady technologii pomiarowej (przede wszystkim testy rozciągania, ściskania, zginania i twardości), prowadzonych w celu oceny własności materiałowych metalu, dotyczących zmniejszenia naprężenia, energii odkształcenia plastycznego i sprężystości. **Po trzecie**, w licznych pracach przeglądowych dotyczących kształtowania z zastosowaniem prądów impulsowych, wskazano na możliwość występowania różnych zjawisk i



możliwość ich opisanie. Zaliczyć do nich można zjawiska termiczne, związane z wydzielaniem ciepła Joule'a oraz atermiczne, związane z energią kinetyczną pędu elektronów i indukowanym polem magnetycznym, które sprzyjają odpinaniu dyslokacji od takich przeszkód (Nguyen-Tran et al. 2015). W podejściu tym, postuluje się ilościowy współczynnik efektu elektroplastycznego, aby podzielić efekty prądu elektrycznego na efekty termiczne i atermiczne. **Po czwarte**, w ciągu ostatnich kilku lat pojawiło się duże zainteresowanie możliwościami sterowania przebiegiem procesu podawania impulsów prądu elektrycznego o wysokiej częstotliwości do próbek metalowych jednocześnie lub na przemian z odkształceniem plastycznym (Tskhondiya & Beklemishev 2012). Wprowadzone pojęcie Techniki Wielokrotnych Impulsów Elektrycznych (z ang. Multiple Electric Pulse Technique (MEPT)) opisuje proces stosowania prądu podawanego metodami indukcyjnymi lub rezystancyjnymi, prowadząc między innymi do znacznej poprawy odkształcalności. Z uwagi na różnorodność i złożoność zjawisk na poziomie mikrostrukturalnym, pojawiające się w tym zakresie opracowania dotyczą głównie modelowania komputerowego (symulacje numeryczne), określających wpływ EMPT na pole naprężenia podczas odkształcenia plastycznego. **Po piąte**, w związku z tym, że własności materiałów są ściśle związane z jej mikrostrukturą, prowadzone są intensywne prace mające na celu wyjaśnienie w jaki sposób prąd pulsacyjny może wpływać na zmianę mikrostruktury kształtowanego materiału. Pierwsze prace na ten temat pojawiły się na przełomie lat 70-tych i 80-tych autorstwa Conrada. W późniejszych pracach wykazano, że zarówno efekty termiczne, jak i atermiczne sprzyjają procesowi przemieszczania się dyslokacji, co dodatkowo powoduje przyspieszenie zjawisk: zdrowienia, rekrytalizacji, wzrostu ziarna oraz przemian fazowych metalu (Chien-Lung & Kwang-Lung 2018). **Po szóste**, prowadzone są intensywne badania nad opracowaniem konstrukcji przyrządów do bardziej złożonych przykładów technologicznych takich, jak: kształtowanie objętościowe, gięcie, cięcie, a w szczególności kształtowanie blach (Collins & Roth 2010). Bardziej szczegółowy przegląd prac dla typowych sześciu obszarów charakteryzujących podjętą przez Autora rozprawę tematykę, znajduje się w publikacjach (Liang & Lin 2018), (Grimm & Mears 2020) oraz podanej już w dysertacji, publikacji Ruszkiewicza.

**Podsumowując ocenę wyboru tematyki aplikacji impulsów prądowych jako temat rozprawy doktorskiej, jest ona pozytywna. W świetle aktualnych osiągnięć bowiem, jest to technika wspomagania procesów wytwarzania bardzo przyjazna dla środowiska i cenna z punktu widzenia możliwych do osiągnięcia korzyści, takich jak: spadek naprężenia uplastyczniającego czy zwiększenie wydłużenia. Wymaga ona jednak, nie tylko bogatego zaplecza technologicznego, technicznego, ale również interdyscyplinarnego podejścia w związku z tematyką aplikacji impulsów prądowych. Taki właśnie charakter prac badawczych został dostrzeżony przeze mnie w ocenianej rozprawie doktorskiej autorstwa mgr inż. Daniela Dobrasa.**

## **2. Ocena poprawności sformułowanych celów i tezy**

Bazując na przeprowadzonym przez autora rozprawy szczegółowym przeglądzie literatury, sformułowane zostały: cele i teza rozprawy doktorskiej (przedstawione w **rozdziale 4**), stanowiące główne wytyczne do przeprowadzanie zadań badawczych i na tej podstawie, podjęcia próby naukowego wykazania słuszności przyjętych na wstępie założeń. Założenia te w ujęciu metodologicznym, obejmują zestaw problemów badawczych związanych ze zjawiskiem elektroplastyczności, które należy zbadać, poznać i możliwie (w sposób naukowy) wyjaśnić. Dlatego, postawiona przez Autora dysertacji teza w brzmieniu:

„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”,

jest założeniem, które wymaga wyjaśnień uzyskiwanych w toku postępowania badawczego, i którego głównym elementem są sformułowane cele badawcze, do których należą (zgodnie z zapisem):

„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”,

oraz dodatkowo:

” określenie wpływu prędkości odkształcenia na zachowanie się wybranych stopów aluminium w próbie rozciągania z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych”.

Zaproponowana przez Autora dysertacji formuła badawcza jest następstwem wstępnie opracowanych, licznych pozycji literaturowych ze szczególnym wskazaniem możliwości aplikacji impulsów prądowych w procesach kształtowania plastycznego metali i ich stopów. Zaprezentowana przez Autora koncepcja badań naukowych, odnosi się do opisu zjawiska elektroplastyczności, aktualnych teorii, przykładów i materiałów. Pozwoliło to Autorowi na wyłonienie istotnych, szczegółowych pytań, opracowanych w postaci hipotez, których rozstrzygnięcie następuje w wyniku realizacji opracowanej koncepcji badań naukowych.

#### Komentarz:

Pragnę zwrócić uwagę na (jedynie potencjalną) możliwość nieznacznego rozbudowania tezy (stawianej w rozprawie doktorskiej). Do sformułowania tej tezy posłużyła wyrażona (już na wstępie opracowania literaturowego) oczywista opinia Autora dysertacji, że aplikacja impulsów prądowych jest skutecznym narzędziem w zwiększaniu plastyczności. Należałoby więc sądzić, że postawienie tezy będzie pewnym wyzwaniem badawczym, które pozwoli na wyjaśnienie lub udowodnienie przyjętych na wstępie założeń. Wydają się, że takie przesłanki (do sformułowania bardziej złożonej tezy) znalazły się w pracy, gdzie autor wspomina, że:

„dobór odpowiednich parametrów prądowych jest bardzo istotny i jest kluczem do zwiększenia plastyczności materiału”.

Na tej podstawie można więc sądzić, że przyjęcie założenia o możliwości doboru odpowiednich parametrów prądowych pozwoli na osiągnięcie pewnego optimum w kontekście własności plastycznych. Uzupełnieniem do przeprowadzonych pomiarów w tym zakresie mogłaby być interpretacja matematyczna z wykorzystaniem hipotezy ciepła Joule’a. Za takim rozwiązaniem matematycznym przemawia z kolei fakt, że w zamieszczonych opisach literaturowych Autor rozprawy, wielokrotnie podkreśla znaczenie i dominującą rolę tej teorii w procesie EAF. Pozycja [69] z listy publikacji jest dobrym przykładem opracowania, w którym zaproponowany został model matematyczny, skutecznie zweryfikowany dla materiału AA5754. Jest to oczywiście propozycja, którą Autor rozprawy może wziąć pod uwagę przy okazji kontynuowania badań.

**Podsumowując należy uznać, że sformułowane przez autora cele i teza są właściwym kierunkiem badań do uzyskania w pełni satysfakcjonującej odpowiedzi na stawiane pytania odnośnie zjawiska elektroplastyczności w kontekście (określonych szczegółowo we wstępie pracy) materiałów i warunków technologicznych.**



### 3. Sposób prowadzenia badań i umiejętność wykorzystania narzędzi – metodyka badań

Praca ma charakter technologiczny, a w obszarze przeprowadzonych przez autora badań znalazły się głównie pomiary doświadczalne oraz liczne obliczenia uzupełniające. Na technologiczny charakter pracy składają się liczne próby jednoosiowego rozciągania oraz kształtowanie blach. Jest to podstawowe narzędzie autora, wykorzystywane do zebrania informacji i przeprowadzenia badań poznawczych, w celu określenia wpływu elektroplastyczności na wybrane procesy formowania. W uzupełnieniu do przeprowadzonych badań, zapisane zostały parametry technologiczne procesów oraz zarejestrowane zostały przebiegi prób doświadczalnych i opracowane liczne charakterystyki, do których należą: przebiegi prądowe, własności plastyczne oraz mechaniczne, oraz opisy obrazowe mikrostruktury. Uzyskane charakterystyki zostały poddane analizie, w celu sformułowania wniosków końcowych i podsumowania uzyskanych wyników.

Szczegóły dotyczące materiału oraz metodyki badań zostały zaprezentowane w **rozdziale 5**. Do przeprowadzenia badań doświadczalnych wykorzystane zostały dwa materiały (w różnych stanach utwardzenia). Jak już wcześniej wspomniano, redukcja masy odgrywa ważną rolę w zmniejszaniu zużycia paliwa i emisji, a obrabiany cieplnie stopy aluminium 6016 oraz 5754 wykazują doskonałą perspektywę zastosowania w lekkich samochodach.

Sposób przygotowania próbek do eksperymentu wraz z wymiarami oraz przygotowaniem materiału został szczegółowo opisany. Plan badań (w postaci schematycznej) został szczegółowo opisany i graficznie zaprezentowany. Obejmuje on przeprowadzenie prób rozciągania oraz tłoczenia blach z podaną szczegółową charakterystyką, począwszy od opisu maszyny wytrzymałościowej poprzez generator impulsów oraz dodatkową aparaturę pomiarową taką, jak: kamera termowizyjna, oscyloskop cyfrowy, cewka Rogowskiego czy wentylator. Autor zadbał o podanie wszystkich parametrów technologicznych prób wytrzymałościowych (prędkość przemieszczenia), parametrów impulsów prądowych (gęstość prądu nominalna, czas i okres impulsów), jak również parametrów geometrycznych prób tłoczenia (miejsce przyłożenia napięcia, materiał narzędzi, średnica stempla). Należy podkreślić dużą dbałość Autora oraz umiejętność skonfigurowania niezwykle trudnych do przeprowadzenia prób z aplikacją prądową, stosując w tym celu najnowocześniejszą aparaturę typu: INSTRON 3369 (Firma Instron jest pionierem w branży testowania materiałów). Zadbano również o badania uzupełniające, które obejmowały próby dla materiałów rozciąganych w podwyższonej temperaturze, do czego zastosowano maszynę typu: ZWICK 1478 (ZwickRoell jest wiodącym na świecie partnerem w zakresie testowania materiałów). Badania doświadczalne obejmowały również pomiar twardości, rejestrację danych oraz analizę mikrostruktury próbek. Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa, przy użyciu twardościomierza LECO LM100AT.

Analizę mikrostruktury próbek wykonano przy wykorzystaniu dwóch instrumentów: za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) VEGA3 TESCAN oraz transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM) Hitachi H-800. Pozwoliło to na zbadanie wybranych zjawisk przemian fazowych (zdrowienia i rekrytalizacji) zachodzących w trakcie procesów EAF oraz na obserwację efektów tych zjawisk w postaci zmian mikrostruktury. Głównym narzędziem zastosowanym do analizy mikrostruktury za pomocą transmisji elektronowej było wykorzystanie detektora EBSD (z ang. Electron BackScatter Diffraction). W metodzie tej, w celu wygenerowania map mikrostruktury (obejmujących teksturę oraz granice ziaren dla różnych parametrów, charakteryzujących badany materiał), zastosowano specjalistyczne oprogramowanie AZtecCrystal firmy Oxford Instruments.

**W podsumowaniu opisu dotyczącego przyjętego przez autora sposobu prowadzenia i przygotowania do badań (z punktu widzenia zastosowanych narzędzi), należy podkreślić dużą**



dbałość o precyzyjne przygotowanie, przeprowadzenie i zapisanie informacji związanych z badaniami oraz zastosowanie zaawansowanej aparatury badawczej i pomiarowej.

#### 4. Analiza literaturowa, dobór i sposób wykorzystania źródeł

W krótkim wstępie (*rozdział 1*), będącym wprowadzeniem do przeglądu literatury, Autor przedstawia potrzebę dążenia do zminimalizowania emisji gazów cieplarnianych poprzez innowacyjne technologie. Jak już wcześniej zaznaczono, takie działania wiążą się ze zmniejszeniem negatywnych skutków wpływu technologii na środowisko. Jest to podejście wpisujące się w aktualną strategię tzw. Zielonego Ładu (z ang. green deal), będącego zbiorem inicjatyw Komisji Europejskiej, zmierzających do podkreślenia znaczenia i wpływu gospodarki na zmiany klimatyczne. W opinii Autora dysertacji, podjęcie tematu aplikacji impulsów prądowych w procesach obróbki plastycznej, pozwala (poza korzyściami praktycznymi takimi, jak zwiększenie plastyczności), również znacząco ograniczyć zużycie energii, skrócić czas technologii wytwarzania, jak również zmniejszyć koszty produkcji.

Przegląd literatury został przedstawiony przez Autora dysertacji w *rozdziałach 2 i 3*. W rozdziale drugim, zostały przedstawione opisy i znaczenie stosowania stopów aluminiowych w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym. W dalszej części opisu, ta szczegółowa charakterystyka stopów została uzupełniona o opisy odkształcenia plastycznego, występującego podczas kształtowania na zimno i ciepło. Zwrócono tu uwagę na zmiany struktury wewnętrznej materiału, powstające w wyniku wzrostu gęstości dyslokacji. Ten opis mechanizmu odpowiedzialnego za umocnienie i powstawanie naprężeń własnych znajduje swoje uzasadnienie w późniejszych opisach struktur utworzonych w wyniku impulsów elektrycznych. Podobnie, jak przy opisach procesów kształtowania na zimno, również w opisywanych procesach kształtowania na ciepło i gorąco, Autor zwraca uwagę na podobieństwa zmian w mikrostrukturze odkształcanego materiału z wykorzystaniem tradycyjnych metod kształtowania. Podkreślenie znaczenia zachodzących przy tym zjawisk zdrowienia i rekrytalizacji wydaje się kluczowe w późniejszej próbie wyjaśnienia znaczenia czynników atermicznych w procesie zmniejszenia naprężenia uplastyczniającego podczas zadawania impulsów elektrycznych. W kolejnych opisach przykładów kształtowania plastycznego stopów aluminium, wskazano na znaczenie tej technologii w budowie karoserii samochodowych. Zgodnie z zamieszczonym tu opisem literaturowym, zaobserwowano znaczne polepszenie dokładności odwzorowania złożonych kształtów podczas formowania w podwyższonej temperaturze. Podkreślono jednak, że niewłaściwy dobór temperatury procesu, jak i warunków smarowania, skutkuje utratą stateczności materiału. Dlatego (jak podkreślono), jedynie właściwy dobór parametrów technologii kształtowania blach (na ciepło i gorąco ze stopów aluminium) jest warunkiem efektywnego zwiększenia plastyczności wyrobów, przy jednoczesnym zmniejszeniu siły potrzebnej do ich wytworzenia. Wskazano również na krytyczne elementy kształtowania w podwyższonej temperaturze, do których zaliczono wysokie koszty technologii, związane z wytrzymałością narzędzi i realizacją technologii przemysłowej. W opinii Autora dysertacji, opisane rozwiązania kształtowania stopów aluminium prowadzi do wniosków, że należy poszukiwać alternatywnych metod kształtowania, czego przykładem jest technika wspomaganie przepływem prądu elektrycznego. W metodzie tej (jak zaznaczono), nie tylko można osiągnąć korzyści występujące w procesach formowania na ciepło i gorąco, ale również uniknąć powyższych wad i tym samym ograniczyć koszty produkcji i zaoszczędzić czas.

W *rozdziale 3*, autor przechodzi do opisu możliwości wspomaganie procesów kształtowania z wykorzystaniem przepływu prądu elektrycznego. W tej części opracowania pojawiają się opisy techniki wspomaganie procesów wytwórczych (EAM) i ich charakterystyka z opisami graficznymi. Doktorant umiejętnie dotarł do publikacji, które w sposób znaczący wytyczają dalsze kierunki badań. Poczynając



od pierwszych publikacji zespołu Troitskiego aż po współczesność, prześledzić można 60 lat rozwoju EAM. W zaprezentowanych opisach literaturowych wyróżnić można dwa, kluczowe kierunki badań dla zrozumienia istoty tych procesów. Po pierwsze, poszukiwanie rozstrzygnięć odnośnie teorii i hipotez związanych z opisem zjawisk EAF (głównie dla procesów formowania) po drugie, wskazanie aktualnych kierunków zastosowania EAF.

Większość wyrażanych opinii, we wskazanych pozycjach literaturowych, dotyczy przekonania, że kluczową rolę w procesach EAF odgrywają termiczne procesy związane z ciepłem Joule'a. Na poparcie tej hipotezy przedstawiono w opisie literaturowym wyniki symulacji komputerowej wpływu odkształcenia początkowego i umocnienia odkształceniowego, topnienie na granicach ziaren, rekrytalizacja mikrostruktury i anihilacja dyslokacji, odmienne zachowanie się stopów umacnianych wydzieleniowo czy stosunkowo dokładne opisy krzywych naprężenia uplastyczniającego. Autor dysertacji umiejętnie podsumowuje zamieszczone opisy stwierdzeniem, że wyjaśnienie natury zjawisk występujących w trakcie procesów EAF nie będzie jednakowe dla wszystkich materiałów, ponieważ jak wspomniano, w zależności od mechanizmu umocnienia rekonfiguracja defektów może być całkowicie odmienna. Z kolei zaobserwowany brak w literaturze opisów dotyczących wyników badań związanych z procesami tłoczenia stopów aluminium (wspomaganych aplikacją impulsów), pokazuje wyraźnie konieczność prowadzenie dalszych badań doświadczalnych dla wybranych materiałów i rozszerzonych technologii, tworząc paradygmaty przemysłowe i przyczyniając się do postulowania nowych rozwiązań, skutecznie wykorzystujących korzyści płynące z zastosowania EAF w przemyśle samochodowym.

#### Komentarz:

Warto w tym miejscu podkreślić, że poszukiwania właściwego rozwiązania dla zaaplikowania impulsów prądowych dla zwiększenia plastyczności stopów aluminium w procesach głębokiego tłoczenia są niezwykle trudne. Jak sam Autor podkreśla, w opisach tej technologii przeważają materiały ze stopów magnezu charakteryzujące się mniejszą przewodnością cieplną. Pragnę jednak zwrócić uwagę, na publikację jednego z przodujących w tym zakresie ośrodków (Roth & Collins 2010), gdzie problematyka głębokiego tłoczenia aluminium 5052 została opisana, wskazując przy okazji na korzystny efekt zmniejszenia lub eliminacji odsprężynowania wyrobów, zachęcając przy tym Autora dysertacji do zapoznania się z treścią.

**Podsumowując przegląd literatury przedmiotu można stwierdzić, że posłużono się w nim licznymi publikacjami naukowymi (w sumie 124 pozycje). W opisie tym podkreślono występujące problemy badawcze i ograniczenia w zakresie proponowanej techniki wspomaganie kształtowania impulsami elektrycznymi. Autor sprawnie wybrał i przedstawił literaturę przedmiotu, która w mojej ocenie stanowi właściwą, krytyczną analizę dotychczasowego stanu wiedzy na zaproponowany temat. W przedstawionych przez autora opisach literaturowych znalazły się liczne opisy problemów badawczych, pozwalające na wyrażenie opinii, czy postawienie hipotez. Oceniając opracowanie literaturowe, należy podkreślić właściwe podejście zarówno w obszarze opisu dotychczasowego stanu wiedzy, jak również umiejętność właściwego wskazania obszaru badawczego i problemów koniecznych do rozwiązania. Dlatego uznano, że na podstawie przeprowadzonej analizy krytycznej literatury przedmiotu, zaprezentowane zostały w tym zakresie przez Autora dysertacji, wymagane umiejętności.**



## 5. Ocena wartości merytorycznej pracy - rozwiązanie zadania badawczego

Opis sposobu przeprowadzenia badań ich analiza oraz wyniki zamieszczone zostały w kolejnych czterech rozdziałach (od rozdziału 6 do 10). Opisane tu zostały badania doświadczalne związane z próbami wytrzymałościowymi (jednoosiowe rozciąganie), oraz wyniki związane z procesem tłoczenia.

W **rozdziale 6** opisano przebieg prób oraz wyniki rozciągania dla stopów aluminium z gatunku 6061 dla trzech różnych typów utwardzenia (stan dostawy, stan przesycony oraz wyżarzony). Dla porównania, próby rozciągania zostały przeprowadzone z aplikacją oraz bez aplikacji prądowej dla określonej (jednej prędkości odkształcania). W uzupełnieniu do badań wytrzymałościowych przeprowadzono pomiary twardości oraz badania mikrostruktury dla wybranych próbek. Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano, że aplikacja impulsów o tych samych parametrach prądowych prowadzi do różnego przebiegu krzywej naprężenie-odkształcenie, w zależności od jego stanu utwardzenia. W ocenie odmiennego zachowania się danego materiału pomogła analiza mikrostrukturalna, która wskazuje, że wpływ impulsów prądowych jest silnie uzależniony od mechanizmów umocnienia charakteryzujących dany materiał. Na potwierdzenie tych wniosków przytoczono dodatkowe wyniki pomiarów mikrotwardości, które wykazały spadek o około 10% twardości dla próbek z aplikacją prądową. Przedstawione przez Autora w podsumowaniu tej części badań wyniki i obserwacje znalazły swoje odniesienie do literatury przedmiotu, gdzie dostrzeżono, że wzrost gęstości prądu, skutkowało osiągnięciem większych wartości naprężenia dla stopu aluminium w stanie przesyconym. Uzyskane wyniki potwierdzają więc według Autora dysertacji pogląd, że aplikacja impulsów prądowych poprawia proces starzenia, pozwalając uzyskać większe wartości parametrów wytrzymałościowych próbek po przesycaeniu. Podsumowując można stwierdzić, że przeprowadzone badania (w zakresie próby rozciągania) nie wykazały znaczącego wpływu impulsów prądowych na wzrost plastyczności stopów aluminium gatunku 6016 (niezależnie od jego stanu utwardzenia). Dlatego stopy te nie zostały wytypowane przez autora jako materiały badawczy do prób tłoczenia z aplikacją impulsów prądowych.

W kolejnym, **7 rozdziale** poświęconym badaniom wytrzymałościowym, przedstawiono wyniki i analizę prób rozciągania stopu aluminium 5754-H111 (stan wyżarzony). Tym razem próby przeprowadzono przy różnych prędkościach odkształcania oraz różnych parametrach prądowych, w celu określenia jej wpływu na odkształcalność materiału. Jak uzasadniono, nie było możliwe zastosowanie tych samych parametrów prądowych ( $t_i/t_0$ ) dla każdej z prędkości, z uwagi na duże różnice w prędkości odkształcania. Skutkowało to bowiem przebiegiem próby rozciągania z zastosowaniem jedynie pojedynczych impulsów prądowych. Dodatkowo, w przypadkach, kiedy parametry obejmowały jedynie pojedyncze impulsy, zastosowano różny moment zadania impulsu prądowego, w momencie osiągnięcia odpowiednio około 1/4, 2/4 lub 3/4 wydłużenia krzywej bez prądu. Przedstawione w tym zakresie wyniki krzywych rozciągania pokazują, że aplikacja impulsów prądowych w próbie rozciągania stopu 5754-H111, może skutkować zwiększeniem wydłużenia dla wybranych parametrów prądowych. Jest to widoczne zwłaszcza dla intensywnego grzania (dla impulsu o czasie trwania 300 ms) przy którym, zostało osiągnięte największe wydłużenie dla każdej prędkości odkształcania. Z kolei wraz ze wzrostem prędkości odkształcania, zaobserwowano spadek maksymalnej wartości wydłużenia, jakie zostało osiągnięte bez aplikacji prądowej. W uzasadnieniu, Autor tłumaczy to zjawisko spadkiem generowanego ciepła Joule'a i zanikiem procesów zdrowienia oraz rekrytalizacji, co prowadzi do zmniejszenia kształtowalności materiału. W podsumowaniu przeprowadzonych badań dla materiału 5754-H111 stwierdzono, że analiza zachowania się materiału w różnych warunkach pozwoliła na dobór optymalnych parametrów prądowych, zapewniających największy wzrost plastyczności badanego stopu. Ponadto, dokonano analizy i wyznaczenia rzeczywistej wartości spadku



naprężenia oraz uznano (w oparciu o analizę mikrostruktury), że procesy zdrowienia dynamicznego są odpowiedziane za wzrost wydłużenia badanych stopów.

W **rozdziale 8** przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych dla prób rozciągania stopu aluminium **5754-H22** (stop umocniony). Tym razem w próbach rozciągania zastosowano jedną prędkość odkształcania (najmniejszą), spośród zastosowanych prędkości we wcześniejszych badaniach z wykorzystaniem materiału wyżarzonego. Dla wybranych parametrów prądowych i zastosowanej prędkości odkształcania udało się osiągnąć wydłużenie próbek powyżej 100%, co zdecydowanie przewyższa (pięciokrotnie) wartość uzyskaną dla rozciągania przeprowadzonego w temperaturze 150°C. Autor w tej części badań zajął się szczegółowym wyjaśnieniem zjawiska znacznego wydłużenia, które udało się uzyskać w drodze doboru optymalnych parametrów prądowych. Według Autora, procesy zdrowienia dynamicznego oraz rekrytalizacji dynamicznej są odpowiedzialne za tak znaczny wzrost wydłużenia badanego stopu. W opracowaniu tego wyjaśnienia pomogły obserwacje mikrostruktury przy pomocy transmisyjnej mikroskopii elektronowej.

W ostatnim, **9 rozdziale** dotyczącym opracowanych badań, przedstawiono wyniki pomiarów wytrzymałościowych (próby tłoczenia), zrealizowanych na maszynie do testowania blach typu: Erichsen, z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych. Próby tłoczenia przeprowadzono dla materiału: aluminium 5754, a wyniki w postaci przebiegu siła-przemieszczenie wykonane zostały dla dwóch wariantów zestawów narzędzi, różniących się umiejscowieniem elektrod (elektrody-narzędzia oraz elektrody na bokach). Próby tłoczenia zostały zrealizowane przy użyciu dwóch trybów dostępnych w maszynie Erichsen. Pierwszy tryb: SHQR (z 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. Tryb ten został zastosowany, w celu zbadania możliwości ograniczenia przepływu ciepła z próbki do narzędzi. Drugi tryb: DPS (z 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. W wyniku przeprowadzonych prób tłoczenia z aplikacją impulsów prądowych, nie zaobserwowano, zwiększenia się plastyczności materiału lub było ono nieznaczne. Niestety, przeniesienie parametrów prądowych z prób rozciągania na próby tłoczenia okazało się nieskuteczne. Wynikało to z tego, że geometria procesu i dodatkowe oprzyrządowanie mające styczność z kształtowaną próbką prowadziło do zaburzenia procesu podgrzewania samego materiału. Dlatego, zaproponowane zostały inne warianty kształtu próbek do tłoczenia oraz wydłużone impulsy prądowe (400 oraz 500 ms), co miało doprowadzić do znacznego zwiększenia energii dostarczanej do tłoczonych próbek. Pomimo jednak znacznego zwiększenia energii dostarczanej do tłoczonych próbek, nie uzyskano pożądanych wartości temperatur. Przedstawione przez Autora wyjaśnienia obejmowały, po pierwsze: fakt występowania większych przekrojów próbek stosowanych w procesach tłoczenia, po drugie: nadmierny odbiór/przepływ ciepła z tłoczonej próbki, co nie pozwala na wystarczający wzrost jej temperatury. Analiza mikrostruktury pokazała, że przepływ prądu pulsującego, może przyspieszyć szybkość zarodkowania przy wzroście temperatury, wyzwalając mechanizmy zdrowienia rekrytalizującego, co prowadzi do wzrostu plastyczności.

Podsumowanie wyników, Autor zamieścił w **rozdziale 10**, gdzie przedstawił wnioski końcowe odnoszące się do treści naukowych oraz użytkarnych. Do podstawowych osiągnięć Autora, stanowiących o Jego oryginalnym wkładzie w badania naukowe, zaliczyć można następujące punkty:

- przeprowadzone próby rozciągania dla stopów aluminium gatunku 6016, pokazały nieznaczny wpływ impulsów prądowych na wzrost plastyczności, co ostatecznie nie daje podstaw do przekonania o możliwości zwiększenia tłoczności tych stopów w próbach tłoczenia,



- wraz ze spadkiem prędkości odkształcenia (z aplikacją impulsów prądowych w jednoosiowej próbie rozciągania stopu aluminium 5754-H111), wzrasta jego plastyczność oraz spada naprężenie uplastyczniające,
- potwierdzono dużą czułość stopu aluminium 5754-H22 (z aplikacją impulsów prądowych w jednoosiowej próbie rozciągania) na wzrost jego plastyczności oraz spadek naprężenia uplastyczniającego, określając optymalne parametry prądowe (czas impulsu oraz gęstość prądu),
- potwierdzono przewagę aplikacji impulsów prądowych w próbie rozciągania (dla stopu aluminium 5754-H22), w stosunku do prób przeprowadzonych w temperaturze 150°C, o czym świadczyły zdecydowanie większe wydłużenia,
- określono, że za znaczący wzrost plastyczności (stopu aluminium 5754-H22) podczas aplikacji impulsów prądowych w próbie rozciągania odpowiada chwilowy wzrost temperatury (wpływając na zmianę mikrostruktury),
- analiza mikrostruktury (z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej) pozwoliła zidentyfikować zjawisko zdrowienia dynamicznego, jako główną przyczynę dodatkowego wzrostu plastyczności w stopie aluminium 5754-H111, oraz zjawisko zdrowienia dynamicznego odpowiedzialnego za wzrost plastyczności z aplikacją impulsów prądowych dla stopu 5754-H111,
- oceniono, że procesy kształtowania wspomagane przepływem prądu mogą być mało konkurencyjne dla przemysłowych metod kształtowania na ciepło lub gorąco tam, gdzie wymagane są większe prędkości odkształcenia,
- oceniono, że pojawiające się problemy w procesach tłoczenia z jednoczesną aplikacją impulsów prądowych, mogą zostać ograniczone za pomocą dodatkowych rozwiązań konstrukcyjnych technicznych lub technologicznych.

#### Komentarz:

W zakresie przeprowadzonych przez Autora dysertacji badań głębokiego tłoczenia należy zaznaczyć, że konstrukcja przyrządu powinna być ściśle uzależniona od zaleceń dotyczących zakresu stosowanego podgrzewania, określonych części tłoczonego elementu, tak jak to podano w kluczowej dla zastosowanego w rozprawie rozwiązania konstrukcyjnego, publikacji [113]. Podgrzanie całej próbki bowiem (jak to miało miejsce w omawianej dysertacji), nie jest pożądane z punktu widzenia analizy mechanicznej. Dlatego zaprojektowany przyrząd powinien umożliwiać generowanie impulsów elektrycznych przepływających jedynie przez obszary kluczowe dla polepszenia odkształcalności, tj.: kołnierza i narożników matrycy. W zaproponowanym przez Autora dysertacji rozwiązaniu konstrukcyjnym przyrządu do tłoczenia, nie znalazły się kluczowe elementy transmisji impulsów prądowych (tzw. katody stałe i ruchome, z ang. fixed and floating cathode), tak jak to miało miejsce we wskazywanym rozwiązaniu literaturowym [113]. Dzięki temu, autorzy tej publikacji uzyskali dwie korzyści: po pierwsze: możliwość podgrzewania próbki jedynie w wybranych obszarach kołnierza i narożnika matrycy, po drugie: uruchomienie procesu podgrzewania jeszcze przed rozpoczęciem właściwej próby tłoczenia i kontynuowanie podgrzewania do zakończenia procesu. Dlatego, opracowanie właściwego rozwiązania konstrukcyjnego (z punktu widzenia podłączenia elektrod), wydaje się kluczowym elementem w aplikowaniu impulsów prądowych.

**Podsumowując ocenę uzyskanych wyników i sformułowanych wniosków końcowych, należy podkreślić dużą systematyczność w redagowaniu opracowania niniejszej dysertacji. Każda część opracowania (dotycząca przeprowadzenia badań) posiada jasno określony cel badawczy oraz podsumowanie treści badań. W niniejszej rozprawie doktorskiej bardzo czytelnie określono zakres**



badzeń odnosząc się do potrzeby stałego podnoszenia znaczenia prób i pomiarów doświadczalnych na potrzeby przemysłu. Pozwala to, na dobieranie właściwych (optymalnych) parametrów technologicznych oraz poszukiwanie nowych, bardziej oszczędnych oraz ekologicznych rozwiązań technologicznych, co zostało szczegółowo opisane w wnioskach końcowych.

## 6. Układ i redakcja pracy

Praca została opracowana zgodnie z wytycznymi odnośnie prac doktorskich. Zawarte zostały w dysertacji następujące treści: strona tytułowa (w języku polskim i angielskim), streszczenia (w języku polskim i angielskim), wraz ze słowami kluczowymi, spis treści, opracowanie literaturowe, sformułowanie celu i tezy pracy, charakterystyka metodyki badań oraz część badawcza. Praca zawiera 158 stron opracowania tekstowego oraz bardzo obszerny spis literatury (w sumie 145 pozycji). Praca jest bogato ilustrowana ze szczegółowym opisem przeprowadzonych badań pomiarowych i licznymi wynikami w postaci wykresów, zdjęć mikrostruktur, schematów i tabel. W skład pracy wchodzi jedenaście rozdziałów poczynając od wstępu (rozdział 1) poprzez opracowanie literaturowe (rozdziały 2,3), podanie celu i tezy pracy (rozdział 4), opis materiałów i metody badań (rozdział 5), badania doświadczalne (rozdziały 6-9, składające się z prób rozciągania dla trzech typów materiału i próby tłoczenia dla jednego materiału). Pracę kończą obszerne opisy w postaci wniosków i spisu literatury (rozdziały 10,11). Zaproponowany w opisie układ pracy tworzy logiczną całość. Praca jest wykonana starannie, poprawnie stylistycznie oraz bogato ilustrowana. Treść rozprawy jest zrozumiała, a zamieszczone rysunki i wykresy są czytelne i prawidłowo opisane.

**Podsumowując układ i redakcję pracy warto zaznaczyć ogromny wkład edytorski zarówno od strony treści, jak i grafiki. Zamieszczone liczne opisy i bardzo czytelne wykresy sprawiają, że praca jest czytelna i zrozumiała. Brak jest uwag do strony formalnej.**

## 7. Podsumowanie recenzji

W świetle powyższych uwag należy stwierdzić, że wymogi stawiane recenzowanej rozprawie doktorskiej (art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce), zostały spełnione w następujących trzech obszarach:

- Autor rozprawy doktorskiej prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w obszarze budowania jasno sformułowanych celów badawczych na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej,
- Autor dowiódł, że potrafi samodzielnie prowadzić pracę naukową, realizując niezwykle obszerny i złożony proces eksperymentalnych badań naukowych,
- zaprezentowane zostały umiejętności Autora w zakresie rozwiązywania postawionego problemu naukowego dotyczącego badania wpływu zjawiska elektroplastyczności na kształtowanie plastyczne, co stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie możliwego zastosowania wyników własnych badań naukowych w obszarze przemysłu motoryzacyjnego oraz lotniczego.

Do najważniejszych osiągnięć recenzowanej rozprawy zaliczyć należy, następujące naukowe i użyteczne wartości:

- w świetle aktualnych, światowych osiągnięć jest to technika wspomagania procesów wytwarzania bardzo przyjazna dla środowiska i cenna z punktu widzenia możliwych do



osiągnięcia takich korzyści, jak: spadek naprężenia uplastyczniającego, czy zwiększenie wydłużenia,

- sformułowane przez autora cele i teza są właściwym kierunkiem badań do uzyskania w pełni satysfakcjonującej odpowiedzi na stawiane pytania odnośnie zjawiska elektroplastyczności,
- opracowanie licznych zestawów wyników i opisów dla przeprowadzonych badań wytrzymałościowych oraz mikrostrukturalnych, charakteryzujących się wysoką jakością pomiarów dzięki zastosowanej zaawansowanej aparaturze badawczej i interdyscyplinarnemu podejściu,
- bardzo obszerne przedstawienie przeglądu literatury przedmiotu, która w mojej ocenie stanowi właściwą, krytyczną analizę dotychczasowego stanu wiedzy na zaproponowany temat, co pozwoliło Autorowi na właściwe wskazanie celu i zakresu badań,
- opracowanie technologiczne i konstrukcyjne dla badań jednoosiowego rozciągania z aplikacją impulsów prądowych, co pozwoliło potwierdzić skuteczność tej techniki w podnoszeniu właściwości plastycznych,
- opracowanie i dobór optymalnych rozwiązań technologicznych w zakresie aplikacji prądowej, co sprzyja rozwiązaniom w obszarze technologii przemysłowej,
- opracowanie zestawu materiałów oraz wytycznych w zakresie aplikacji impulsów prądowych do realizacji procesów obróbki plastycznej, co stanowi oryginalny wkład autora do osiągnięć na polu wdrażania nowoczesnych, zrównoważonych technologii w przemyśle.

W swojej szczegółowej analizie rozprawy doktorskiej zwróciłem uwagę (pojawiające się komentarze) na kilka kwestii, starając się jedynie podkreślić znaczenie proponowanych przez Autora dysertacji rozwiązań. Do wspomnianych kwestii rozprawy zaliczają się elementy rozwiązań konstrukcyjnych i opracowań merytorycznych, co w żaden sposób nie wpływa na ocenę końcową.

**Podsumowując swoją recenzję stwierdzam, że przedstawione przez Autora dysertacji wyniki badań są pionierskie w skali Polski, a w niektórych obszarach, także w skali światowej (zwłaszcza w obszarze optymalizacji parametrów technologicznych elektroplastyczności). Dlatego, wnoszę o wyróżnienie pracy z uwagi na jej obszerny, doświadczalny charakter poznawczy, nowatorskie podejście i oryginalny wkład w rozwój nauki w obszarze Inżynierii Mechanicznej.**



Sławomir Świtło