

Częstochowa, 22.07.2024 r.

dr hab. inż. Piotr Szota, prof. P.Cz.

Dane adresowe:

ul. Gajowa 3 m 7

42-229 Częstochowa

piotr.szota@pcz.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Wojciecha Weilera

pt.: „**Wpływ małowykrętowego skręcania oscylacyjnego z zastosowaniem impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę mosiądzu CuZn30**”

przygotowanej pod kierunkiem

dra hab. inż. Zbigniewa Zimniaka, prof. uczelni,

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego

z dnia 27 maja 2024 r.

1. Charakterystyka i opis rozprawy

1.1. Tematyka

Recenzowana praca Pana mgr inż. Wojciecha Weilera dotyczy analizy wpływu impulsów prądowych na odkształcalność mosiądzu w gatunku CuZn30 w próbach plastometrycznych małowykrętowego skręcania oscylacyjnego. Tematyka pracy stanowi ważny obszar badawczy zajmujący się poprawą warunków odkształcalności metali, który bezpośrednio może przekładać się na korzyści, nie tylko poznawcze w zakresie badań podstawowych, ale także mających potencjalne zastosowanie technologiczne. Poszukiwanie metod zwiększania plastyczności metali przy jednoczesnym obniżaniu parametrów siłowo-energetycznych jest jednym z podstawowych celów badawczych. Istotnym elementem tych badań jest również dążenie do ulepszania własności mechanicznych metali, między innymi poprzez rozdrobnienie mikrostruktury, która bezpośrednio wpływa na własności użytkowe. Obecny stan wiedzy dotyczący obróbki plastycznej metali jednoznacznie mówi o korzystnym wpływie stosowania

dużych odkształceń na rozdrobnienie mikrostruktury i poprawę właściwości. Do tego sposobu kształtowania metali należą szeroko rozumiane procesy z wymuszoną drogą odkształcenia, których celem jest uzyskiwanie mikrostruktury drobnoziarnistej lub nawet ultra drobnoziarnistej. Obecnie obserwuje się ciągle zainteresowanie procesami przeróbki plastycznej z dużymi odkształceniami nazwane *Several Plastic Deformation* (SPD), które są cały czas udoskonalane i modyfikowane pod potrzeby zastosowań przemysłowych.

Zagadnienia badawcze poruszane w recenzowanej pracy wpisują się w aktualną tematykę trendów badawczych, zmierzający do poprawy warunków kształtowania, zwiększenia odkształcalności, poprzez wymuszoną drogę odkształcenia co wpływa na zwiększenie udziału dodatkowych kierunków odkształcania. Stosowanie dużych odkształceń wiąże się często z występowaniem znacznych sił, stąd też wynika konieczność stosowania wymuszonej drogi odkształcenia w celu ich obniżania. Dużą trudność stanowi przeróbka plastyczna stopów metali trudnoodkształcalnych takich jak tytan, magnez i inne, których zakres plastyczności jest mocno ograniczony. Z tych względów poszukuje się nowych rozwiązań przeróbki plastycznej takich jak odkształcanie z udziałem impulsów prądowych czy odkształcenia w niskich temperaturach.

Tematyka pracy jest aktualna i interesująca a także może stanowić znaczny wkład w obszar badań naukowych dotyczący zwiększenia plastyczności materiałów metalicznych. Może stanowić również podstawy aplikacyjnych w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie inżynierii mechanicznej jak również materiałowej.

1.2. Ocena formalna

Recenzowana praca Pana mgr inż. Wojciecha Weilera pt.: Wpływ małocyklowego skręcania oscylacyjnego z zastosowaniem impulsów prądowych na odkształcalność i mikrostrukturę mosiądzu CuZn30, przygotowana pod kierunkiem Promotora dr hab. inż. Zbigniewa Zimniak, prof. PWR, składa się z 14 rozdziałów.

Praca posiada klasyczny układ, w którym wyraźnie widoczny jest podział na część teoretyczną związaną z przeglądem literatury i część badawczą zawierającą badania własne. Praca doktorska obejmuje 198 stron maszynopisu, a przyjęta struktura pracy jest właściwa. Badania własne i ich analiza stanowią ponad 64% całej objętości pracy.

Wstęp zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki dysertacji, następnie Autor przechodzi do rozdziałów zawierający przegląd literatury związany z tematyką prowadzonych badań.

Kolejne rozdziały obejmują, sformułowanie celu i tezy pracy wraz z opisem metodyki badań, prezentację wyników badań własnych, a zakończenie zawiera podsumowanie i wnioski oraz odwołania literaturowe.

Cytowana literatura obejmuje 213 pozycji, jej dobór jest adekwatny do tematyki rozprawy. Bibliografia zawiera pozycje ze światowej literatury (76%), które zostały opublikowane w cenionych czasopismach. Analiza stanu wiedzy w tematyce dysertacji została poparta publikacjami wydanymi w ciągu ostatnich 20 lat (75% pozycji literaturowych). Wśród pozycji literaturowych znajduje się 6 publikacji oraz 9 patentów, w których Doktorant jest współautorem. Literatura zebrana w pracy jest dobrana poprawnie i dotyczy tematyki pracy.

Strona edycyjna rozprawy doktorskiej jest poprawna. Należy podkreślić, że recenzowana praca została przygotowana z należytą starannością i dbałością o jakość prezentowanych wyników.

2. Merytoryczna ocena

Przegląd literatury

Przed postawieniem tezy pracy, w przeglądzie literatury, Doktorant szczegółowo opisał zagadnienia związane z procesami kształtowania materiałów metalicznych z dużymi odkształceniami. Autor scharakteryzował szczegółowo najważniejsze metody odkształcania SPD (między innymi takie jak: *HPT* - *high pressure torsion*, *ECAP* - *equal channel angular pressing*, *ECAE* - *equal channel angular extrusion*, *CCDF* - *continuous closed die forging*, *KOBO* i wiele innych) wpływające na rozdrobnienie mikrostruktury i poprawę właściwości mechanicznych. Metody te podzielił na stosowane w warunkach laboratoryjnych, półciągłych i ciągłych, wymieniając ich wady i zalety a także zastosowanie. Ponadto w pracy zostały opisane metody badań plastometrycznych oraz aparaturę a także mechanizmy odkształcenia występujące w materiałach metalicznych oraz wpływ odkształceń cyklicznych na właściwości mechaniczne i mikrostrukturę różnych materiałów w tym mosiądzu CuZn30.

W kolejnym rozdziale 3 Autor zawarł informację na temat wpływu ciągłego i impulsowego oddziaływania prądu elektrycznego w trakcie odkształcenia plastycznego (*EAF* - *electrically assisted forming*). W tej części przeglądu literatury, Autor opisuje stan wiedzy związany z przepływem prądu elektrycznego podczas odkształcania materiałów metalicznych i jego wpływ na stan naprężenia i odkształcenia materiałów. Wymienia najczęściej spotykane teorie, opisujące zmiany zachowania się materiałów w trakcie odkształcania, dzieląc je na termalne

i atermalne. W części badawczej na podstawie tego podziału, Autor prowadził badania plastyczności w warunkach atermalnych, tzn. z minimalizacją wpływu przepływu prądu elektrycznego na rozkład temperatury w badanych próbkach.

Ta część pracy doktorskiej stanowi ciekawą i wyczerpującą podbudowę merytoryczną, opisującą problemy badawcze związane z dużymi odkształceniami materiałów metalicznych i efektami przepływu prądu elektrycznego podczas odkształcania, która zakończona jest podsumowaniem (rozdział 4). Przeprowadzony przegląd literatury jest adekwatny do tematyki oraz potwierdza, że Doktorant posiada odpowiednią wiedzę i przygotowanie teoretyczne do prowadzenia badań.

Teza i cel pracy

Na podstawie przeglądu literatury Autor sformułował tezę pracy (rozdział 5), w której stwierdza, że: „dzięki odpowiednio dobranemu schematowi małowykłowego skręcania oscylacyjnego mosiądzu jednofazowego CuZn30 i zastosowaniu przepływu impulsów prądowych, można doprowadzić do świadomego i kontrolowanego sterowania przebiegami naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia”.

Tak postawiona teza pracy nie jest w pełni poprawnie sformułowana, gdyż trudno mówić o świadomym sterowaniu przebiegiem naprężenia uplastyczniającego, które jest odpowiedzią materiału na odkształcenie w zależności od warunków odkształcania. Poprawnie sformułowana teza pracy powinna brzmieć: *dzięki odpowiednio dobranemu schematowi przepływu impulsów prądowych podczas małowykłowego skręcania oscylacyjnego mosiądzu jednofazowego CuZn30 można wpłynąć na wartość odkształcenia całkowitego i wartość naprężenia uplastyczniającego.*

Główny celem pracy jest: „... poznanie zjawisk zachodzących podczas małowykłowego, oscylacyjnego skręcania mosiądzu CuZn30 z jednoczesnym przepływem impulsów wysokoprądowych i bez nich, w warunkach odkształcania obejmujących różne stany odkształcenia i naprężenia, w szerokim zakresie odkształceń i prędkości odkształcenia, w temperaturze pokojowej i podwyższonej”.

W ten sposób sformułowany cel pracy jest zbyt ogólny i wymaga doprecyzowania. Nie jest oczywiste, co Autor rozumie przez szeroki zakres prędkości odkształcenia. Przyjęta przez Autora metodyka i zakres prowadzonych badań są ukierunkowane na zrealizowanie założonego celu pracy, jednak nie w tak szerokim zakresie jaki może sugerować, tak sformułowany cel pracy.

Badania własne

Część badawcza pracy obejmuje rozdziały od 6-tego do 11-tego, w których Doktorant przedstawił konieczne badania do zrealizowania celu pracy. Swoje rozważania, Doktorant rozpoczął od charakterystyki stopów miedzi z cynkiem nazywanych mosiądzami. W rozdziale 6 został opisany wpływ pierwiastków stopowych na właściwości mosiądzów jednofazowych i dwufazowych ich zastosowanie, wady i zalety. Pod koniec rozdziału Autor skupił się na przyjętym materiale badawczym jakim był stop mosiądzu jednofazowego CuZn30, który charakteryzuje dobrymi właściwościami plastycznymi przez, co często stosowany jest w procesach przeróbki plastycznej np. do wytwarzania łusek naboju. Na potrzeby własne Autor przygotował wlewki w Zakładach Przetwórczo-Hutniczych Metali Nieżelaznych „HUTMEN”, z których następnie zostały wyciśnięte pręty o średnicy 20 mm. Tak przygotowany materiał został zbadany pod względem składu chemicznego a także mikrostruktury (EBSD) a następnie zostały wykonane próbki badawcze.

W rozdziale 7 Autor opisał szczegółowo plastometr skrętny współautorskiej konstrukcji, który był przedmiotem 9 patentów wymienionych w spisie literatury. Wymienił i scharakteryzował poszczególne elementy plastometru a także przedstawił zasadę pomiaru siły i momentu obrotowego. Na szczególną uwagę zasługuje udział Doktoranta w projektowaniu plastometru skrętnego a także udoskonalenie urządzenia badawczego do badań małocyklowego skręcania próbek z udziałem impulsowego przepływu prądu elektrycznego. Dostosowanie urządzenia do potrzeb badawczych będących przedmiotem dysertacji należy uznać za osiągnięcie Autora w dyscyplinie inżynierii mechanicznej.

Rozdział 8 zawiera informacje o przyjętej metodyce badawczej. Autor zaplanował szereg badań plastometrycznych małocyklowego skręcania oscylacyjnego, które prowadzone były: dla dwóch zakresów temperatury 20°C i 600°C; trzech wartości jednostkowego odkształcenia cyklicznego 0,03; 0,06 i 0,3; trzech prędkości odkształcenia 0,01; 0,1 i 1 s⁻¹ a także z różnymi wariantami przepływu impulsowego prądu elektrycznego. Przyjęte wartości prędkości odkształcenia podyktowane były zmniejszeniem wpływu efektu termicznego podczas odkształcania, co jest słusznym podejściem.

W ramach badań zostały przeprowadzone również monotoniczne próby skręcania w celach porównawczych. Zakres planowanych badań budzi uznanie, natomiast przyjęte parametry badań dla mosiądzu CuZn30, który jest materiałem plastycznym mogą stanowić trudność, o czym Autor wspomina w dalszej części pracy. Ciekawym elementem metodyki

badawczej jest koncepcja uwzględnienia naprężeń i odkształceń sprężystych w analizie wyników cyklicznego skręcania próbek.

Rozdział 9 poświęcony jest badaniom plastometrycznym w warunkach skręcania monotonicznego. Wyniki zostały przedstawione w sposób czytelny w postaci graficznej dla każdego z założonych wariantów. Rysunki od 9.12 do 9.14 są zbędne, gdyż wartości naprężenia uplastyczniające są zupełnie inne i ich porównywanie jest bezcelowe. Niedosyt budzi analiza mikrostruktury, która jest dość lakoniczna. Należało przeprowadzić analizę statystyczną geometrii ziaren, co pozwoliłoby na miarodajną analizę i możliwość porównania z mikrostrukturą początkową.

Kolejnym etapem badań (rozdział 10) były próby plastometryczne skręcania małowyprężonego w temperaturze otoczenia i 600°C. Ze względu na dużą plastyczność stopu CuZn30 Autor miał trudności z przeprowadzeniem prób dla odkształceń 0,03 i 0,06 z prędkością 0,01 s⁻¹, które związane były z brakiem możliwości rejestracji wyników. Wyniki badań plastometrycznych nie budzą wątpliwości natomiast analiza wielkości ziarna za pomocą wzorników mikrostruktury w przypadku struktur niejednomodalnych może być niedokładna, szczególnie w przypadku stosowania dużych odkształceń ze zmienną drogą odkształcenia.

W rozdziale 11 Autor wykonał podobne badania jak w rozdziale 10, skupiając się na próbach wykonanych z odkształceniem 0,06 i prędkością odkształcenia 0,1 s⁻¹ przy różnych wariantach przepływu prądu elektrycznego różniących parametryzując je czasem „trwania” i czasem „przerwy”. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale należą do najciekawszych i stanowią nowość w obszarze badawczym. Autor na podstawie przeprowadzonych badań udowodnił wpływ impulsów prądu elektrycznego na wartości naprężania a także całkowitego odkształcenia podczas prób plastometrycznych. W przypadku analizy mikrostruktury próbek otrzymanych w tym etapie badań, trudno jest mówić o miarodajnej ocenie mikrostruktur ze względu na niską jakość przygotowanych zglądów metalograficznych. Trudno też ocenić czy dana struktura jest z miarodajnego obszaru pomiarowego wynoszącego 2/3 promienia próbki. Część próbek nie została przez Autora przeanalizowana np.: rys. 11.15, 11.16, 11.19, 11.34-11.40.

Przeprowadzone badania Autor podsumowuje obszernie w rozdziale 12 a w rozdziale 13 przedstawia wnioski końcowe potwierdzając nowość otrzymanych wyników badań i określając możliwości i ograniczenia. Wnioski sformułowane przez Autora są trafne i mają potwierdzenie w przeprowadzonych badaniach.

2.1. Uwagi dyskusyjne

- 1) Na stronie 80 Autor pisze „Często wybór mosiądzu jest podyktowany czynnikami ekonomicznymi, bo to akurat najtańszy materiał konstrukcyjny, jaki można zastosować” – mosiądz nie jest najtańszym materiałem konstrukcyjnym, chyba że Autor miał na myśli szerszy kontekst stwierdzenia. proszę o wyjaśnienie?
- 2) W rozdziale 6.4 na stronie 80 Autor pisze: „Przeznaczony do badań mosiądz CuZn30 został odlany w postaci wlewków z czystej miedzi i cynku, co pozwoliło na wyeliminowanie dodatkowych zanieczyszczeń, występujących w stopach handlowych.” stop ten został wykonany w Zakładach Przetwórczo-Hutniczych Metali Nieżelaznych „HUTMEN” we Wrocławiu, natomiast na w tabeli 6.1 Autor pokazuje skład chemiczny z licznymi domieszkami. Czy rzeczywiście handlowy mosiądz w gatunku CuZn30 odbiega składem chemicznym od przedstawionego w pracy i co jest w nim ważne z punktu widzenia prowadzonych badań? Czy Autor może przedstawić normowany skład chemiczny tego stopu?
- 3) W tym samym rozdziale na stronie 84 Autor pisze: „Próbki wykonane z badanego mosiądzu zostały wygrzane w różnych temperaturach, w przeciągu różnych czasów. Następnie przeprowadzono badania metalograficzne, na podstawie których przyjęto optymalne warunki wyżarzania ujednorodniającego: temperatura 700 °C i czas 60 minut.”, co to znaczy optymalne warunki i jakie parametry wyżarzania były brane pod uwagę? Stop CuZn30 jest powszechnie znanym i przebadanym stopem, czy nie można było wykorzystać dostępnej wiedzy?
- 4) Autor w następnym akapicie pisze o wygrzewaniu próbek w temp. 700°C w czasie 10 min po wyżarzaniu ujednorodniającym prowadzonym w temp. 700°C w czasie 60 min. Jaki był cel wygrzewania tych próbek?
- 5) Doktorant w swoich badaniach wykorzystał zaprojektowany plastometr skrętny , który posłużył do badania próbek ze złożoną drogą odkształcenia, czy plastometr posiada możliwość pomiaru temperatury podczas badania? Jest to istotny parametr z punktu widzenia badań plastometrycznych.
- 6) W rozdziale 7.4, Autor jako aparaturę badawczą wykorzystuje kamerę termowizyjną FLIR T440. Czy zostały przeprowadzone badania efektu cieplnego podczas odkształcania w próbie monotonicznego skręcania (rozdział 9 i 10)? Efekt cieplny jest

istotny przy tego typu badaniach a wyniki w postaci przebiegów temperatury byłby interesujące.

- 7) Na stronie 108 Autor stwierdził, że miarodajnym obszarem badań próbki na przekroju poprzecznym jest $2/3$ promienia próbki. Czy parametry badań plastometrycznych takich jak wielkość odkształcenia cyklu i prędkość odkształcenia, a w konsekwencji prędkość obrotowa, został dobrana dla tego promienia?
- 8) W rozdziale 8, Autor opisuje metodykę analizy wyników z uwzględnieniem odkształceń sprężystych. Jak ta metoda sprawdza się podczas analizy wyników prób plastometrycznych z udziałem impulsów prądu elektrycznego dla CuZn30 (rozdział 11)? W przeglądzie literatury w rozdziale 3.3.2 zamieszczono informacje o redukcji sprężynowania powrotnego podczas gięcia blach stalowych, aluminiowych i tytanowych nawet do 90%.
- 9) Autor w rozdziale 11 pokazuje porównanie rozkładów naprężenia uplastyczniającego prób plastometrycznych skręcania cyklicznego i skręcania cyklicznego z udziałem impulsów prądu elektrycznego, W przypadku prób skręcania cyklicznego z udziałem impulsów prądu elektrycznego temperatura wynosiła ok 285°C natomiast bez udziału impulsów prądu elektrycznego badania były prowadzone w temperaturze otoczenia. Czy można porównywać rozkłady naprężenia uplastyczniające w próbach plastometrycznych dla różnych temperatur?

2.2. Uwagi szczegółowe

- 1) str. 5, akapit 2: „...temperatura pokojowa...” – temperatura otoczenia;
- 2) str. 51, akapit 2: „Stwierdzili oni że zastosowanie” – powinno być *Stwierdzili oni, że zastosowanie...*;
- 3) str. 54, akapit 4: „...w materiale przez który przepływa prąd...” – powinno być: *w materiale, przez który przepływa prąd*;
- 4) str. 68, akapit 1: „...w ograniczonym zakresie. natomiast metody...” – przecinek zamiast kropki;
- 5) str. 76, akapit 1, „...dwufazową inazywane są niekiedy” – brak spacji;
- 6) str. 93, akapit 3: „Zasadę działania głowicy przedstawiono na rys. 6.3...” – powinno być na rys. 7.3;
- 7) str. 173, akapit 1: „...długi czas życia...” - powinno być *dłuższą trwałość*;

- 8) str. 178, wniosek 12: „...w porównaniu do prób monotonicznych nie były aż tak spektakularne, jak przy skręcaniu cyklicznym z prędkością $0,1 \text{ s}^{-1}$...” - należy unikać tego rodzaju określeń, nie stanowią one wartości naukowej;
- 9) str. 178, wnioski 16, 17 i 20, Zbyt oczywiste stwierdzenia dotyczące związku pomiędzy naprężeniem a temperaturą w próbach plastometrycznych;
- 10) str. 178, wniosek 18, Stwierdzenie nie jest oczywiste ze względu na różne temperatury próbek;
- 11) str. 180, wniosek 28, Wniosek nie wypełni prawdziwy – próbka nie posiadała temperatury pokojowej tylko ok 285°C

3. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę aktualność doboru tematu, który ma bardzo istotne znaczenie poznawcze i praktyczne, wartościową tezę rozprawy, która została udowodniona, a także umiejętności Doktoranta, który wykazał dobre opanowanie warsztatu naukowego w dyscyplinie inżynierii mechanicznej oraz pokrewnej inżynierii materiałowej, a także posiada umiejętności wykorzystania narzędzi komputerowych do analizy danych, pracę doktorską Pana mgr. inż. Wojciecha Weilera oceniam pozytywnie.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn - inżynieria mechaniczna .

dr. hab. inż. Piotr Szota, prof. P.Cz.
Częstochowa, 22.07.2024 r.