

Warszawa, 27czerwca 2016r.

dr hab. inż. Tomasz Babul  
Instytut mechaniki Precyzyjnej  
ul. Duchnicka 3  
01-796 Warszawa

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Skuzy  
pt. „Wieloskalowa charakterystyka połączeń w platerach Ti/Cu spajanych  
metodą wybuchową”**

opracowana na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej  
PAN w Krakowie

### 1. Uwagi ogólne

Pierwsze wzmianki o możliwości zastosowania materiałów wybuchowych do łączenia materiałów metalowych pochodzą z II dekady ubiegłego wieku. Jednak systematyczne prace związane z wykorzystaniem energii detonacji materiałów wybuchowych do procesów spajania w tym m.in. zgrzewania wybuchowego rozwinęły się na przełomie lat czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku. W Polsce nad tą technologią rozpoczęto w 1958r. Przez wiele lat Polska utrzymywała się i utrzymuje w czołówce krajów posiadających tą technologię. Często wiodąc prymat w osiągnięciach z tego zakresu. Przykładem może być uzyskanie po raz pierwszy na świecie połączeń typu miedź – szkło metaliczne /Cu<sub>50</sub>Zr<sub>50</sub>/ czy szkło metaliczne – szkło metaliczne. Technologia zgrzewania wybuchowego charakteryzują się wieloma cechami, które są nieosiągalne lub prawie nieosiągalne do uzyskania innymi metodami. Pozwala ona na łączenie powierzchniowe metali i ich stopów znacznie zróżnicowanych pod względem właściwości fizycznych i chemicznych, o różnych gabarytach od kilkucentymetrowych do kilku, a nawet kilkunastometrowych oraz o znacznych różnicach grubości łączonych materiałów.

Oczywiście technologia ta posiada również swoje wady do których można zaliczyć objętościową deformację obu połączonych metali po procesie zgrzewania oraz występujące wady w strefie pośredniej pomiędzy platerowanymi materiałami. Problem jakości związany z rozwiązaniem ww. zagadnień został rozwiązany do tej pory połowicznie tzn. odkształcenia wyeliminowano poprzez zastosowanie procesu walcowania natomiast drugie zagadnienie wymaga prowadzenia dalszych badań. Wynika z to z faktu iż po pierwsze coraz to nowe materiały podlegają zgrzewaniu wybuchowemu i po drugie coraz bardziej nowoczesna aparatura badawcza, nowe metodyki ale również wiedza z zakresu inżynierii materiałowej pozwalają na pełniejszą, bardziej doskonałą charakterystykę strefy połączenia jak również określenie własności użytkowych bi - i multiplaterów.

Dlatego też próbę określenia charakterystyk strefy połączenia tytanu z miedzią uzyskiwanych w procesie zgrzewania wybuchowego jak również właściwości elektrycznych uzyskanego bimetalu podjętą przez Doktoranta w recenzowanej rozprawie uważam za w pełni uzasadnioną zarówno ze względów poznawczych jak i może głównie aplikacyjnych.

Kompleksowość ujęcia problemu badawczego zaprezentowana w opiniowanej pracy, wykorzystanie nowoczesnych technik badawczych, sprawia, że praca stanowi aktualne i niewątpliwie wartościowe opracowanie o charakterze naukowym.

Uważam, że wybór tematyki rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Skuzy dobrze wpisuje się w dziedzinę inżynierii materiałowej.

## **2. Charakterystyka i ocena rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z 7 rozdziałów oraz wykazu literatury, łącznie 93 strony. Wykaz cytowanej literatury obejmuje 103 pozycje, z czego większość z ostatnich 10 lat. Pozycje literaturowe, na które powołuje się Autor rozprawy, charakteryzują stan wiedzy związany z tematyką rozprawy.

Autor w rozdziale 2 pt.: *Wstęp Teoretyczny* na 18 stronach opisał zagadnienia związane z zgrzewaniem wybuchowym. W rozdziale 3 zawarł tezę i cel pracy. Kolejny rozdział zawiera opis użytych materiałów i procesu zgrzewania wybuchowego, metodykę badań mikroskopowych, rentgenowskich, mechanicznych oraz pomiarów oporności elektrycznej. W rozdziale 5 autor przedstawił wyniki badań

strukturalnych wykonywanych w skali makro/mezo, mikro, nano oraz platerów po procesach wygrzewania. Dwa ostatnie rozdziały to dyskusja wyników oraz podsumowanie i wnioski.

Praca napisana jest poprawnym językiem oraz jest bardzo dobrze opracowana edytorsko: zawiera czytelne, poprawne graficznie wykresy pomimo braku na niektórych z nich, opisu osi współrzędnych.

Oceniając rozprawę należy podkreślić, że Autor podjął próbę oceny głównych zjawisk mających miejsce na styku powierzchni miedzi platerowanej tytanem.

Celem badań był identyfikacja i opis zjawisk zachodzących w procesie zgrzewania wybuchowego miedzi z tytanem ze szczególnym uwzględnieniem strefy przejściowej. Wieloskalową analizę przeprowadzono w skali: makro w celu opisanie jej specyficznej morfologii; mikro szczególnie w zakresie budowy stref przetopionych ich składu chemicznego, fazowego; nano do opisów struktur pomiędzy łączonymi materiałami. Badania prowadzono stosując trzy materiały wybuchowe o trzech prędkościach detonacji 2000m/s, 2500m/s oraz 3000m/s. Przyjęto dla celów eksperymentu różne odległości pomiędzy łączonymi, w układzie równoległym, płytami poczynając od 1,5mm i zwiększając ją skokowo kolejne 1,5 aż do 9,0mm. W sumie do badań przyjęto 17 wariantów technologicznych. We wszystkich przypadkach płytę nieruchomą /podstawową/ stanowiła miedź o czystości 99.95% natomiast płytą napędzaną był tytan o strukturze heksagonalnej  $\alpha$ .

Autor przeprowadził badania metaloznawcze korzystając z fazową bardzo wysokiej klasy mikroskopów typu SEM oraz TEM wyposażonych w dodatkowe wysokospecjalistyczne oprzyrządowanie. Pozwoliło to na określenie wartości współczynników RGP oraz BLF opisujących zależności pomiędzy długością linii połączenia a polem powierzchni o charakterystycznej budowie. Autor przeprowadził analizy punktowe, liniowe, powierzchniowe składu chemicznego, pomiary geometrii złącza takie jak wysokość fali i odległość pomiędzy ich maksimumami dla wszystkich wariantów badawczych. Szczególnie interesujące są wyniki badań TEM/BF w obszarze złącza jak również rentgenowskiej analizy fazowej. Badania mechaniczne w pracy obejmowały pomiary mikrotwardości, wytrzymałości na ścinanie oraz na zginanie w temperaturach otoczenia, - 60°C oraz - 196°C /ciekły azot/.

Autor przedstawił również ciekawe wyniki badań strukturalnych po próżniowym wygrzewaniu plateru w temperaturze 700°C stosując czasy procesu 1h, 10h oraz

100h /niestety tylko dla jednego wariantu technologicznego/. Zaproponowany i w pełni uzasadniony przez Doktoranta bardzo szeroki program badań został zrealizował w pełni. Zdaniem recenzenta również wartościowe wyniki Doktorant uzyskał w badaniach oporności złącza mierzonych metoda Kelvina.

Należy stwierdzić, że Doktorant w pełni zrealizował założony program badań, odpowiedział na postawioną tezę pracy oraz wykazał się opanowaniem nowoczesnych technik badawczych. Na podkreślenie zasługuje bardzo wysoki poziom przeprowadzonych badań metaloznawczych, jak również jakość uzyskanych wyników w postaci zdjęć, rozkładów, dyfraktogramów itd.

### 3. Uwagi krytyczne

Zwyczajem, jak i obowiązkiem recenzenta jest wyeksponowanie silnych, mocnych stron pracy jak i „wyszukanie” tych słabszych. Jak w każdej pracy naukowej tak i w niniejszej mają one miejsce. Oto niektóre z nich:

- Autor stosuje własną terminologię nie korzystając z dotychczas powszechnie stosowanego słownictwa. Prowadzi to czasami do lapsusów i dwuznaczności tekstu. Stosowany przez Doktoranta zwrot "spajanie metodą wybuchową" nie jest technologią, ale grupą technologii w skład której m.in. wchodzi zgrzewanie wybuchowe, któremu to poświęcona jest niniejsza praca. W skład tej samej grupy technologicznej wchodzi też natryskiwanie detonacyjne, nakładanie powłok typu e-gun i inne.

Dlatego sformułowanie *spajanie metodą wybuchową* w wielu miejscach pracy nie ma najmniejszego uzasadnienia. Co więcej brak jest konsekwencji. Autor czasami stosuje zamiennie sformułowanie *spajanie metodą wybuchową*, czasami umieszcza go w pojedynczym apostrofowym cudzysłowie /tak jakby sam nie był pewien czy jest to jest to dobre zastosowanie tego wyrażenia/, a czasami stosuje prawidłowe sformułowanie tzn. zgrzewanie wybuchowe. Podobnie używa sformułowania "detonator elektryczny" mając na myśli zapalnik. Najprościej byłoby podać jego symbol. Podobnie dotyczy to "płyty lotnej" - powinno być płyty napędzanej lub ruchomej, ewentualnie platerującej.

Użycie sformułowania "początkowa odległość pomiędzy płytami" powoduje duże zamieszanie. Jeżeli jest *odległość początkowa* to też istnieje *odległość końcowa*, która faktycznie wynosi zero /sytuacja po platerowaniu blach/. Jeżeli tak, to: z jednej strony jakie są odległości pośrednie pomiędzy *początkową* i *kończącą*

/dotyczy to przypadku gdy układ zgrzewania jest równoległy/, a z drugiej strony jak opisać układ nie równoległy, w którym płyta napędzana ma różne odległości /początkową i końcową / w stosunku do płyty podstawowej. W praktyce prawidłowo Autor powinien usunąć słowo początkowa, ponieważ może to spowodować błędy interpretacyjne przy analizie wykresów *m.in.* 30, 31, 33, 36. Bardziej jednoznaczny byłby zapis *odległość pomiędzy zgrzewanymi materiałami / platerami, blachami/*.

- bardzo często Autor używa słów w cudzysłowie takich jak: "zafalowania" str. 54, "na złączu" str. 47, "duża" strefa przetopień str. 50, "czysta" granica str. 50, 51, "zamknięte" obszary str. 52 i jeszcze w wielu, wielu miejscach pracy. Wprowadzenie do pracy tego znaku wywołuje niejasności. Bo jak zrozumieć słowa *duża* lub *czysta*, są to pojęcia względne nic nie mówiące.

- literatura. Autor powołuje w większości na literaturę angielskojęzyczną zapominając zupełnie o literaturze polskiej. Co prawda w kilku miejscach cytuje autorów polskich zajmujących się badaniem połączeń uzyskiwanych metodami zgrzewania wybuchowego pomijając zupełnie krajową literaturę opisującą proces zgrzewania wybuchowego, procesy jakie zachodzą w trakcie zgrzewania, mechanizmy połączeń jak i wpływ parametrów procesu na właściwości uzyskiwanych połączeń. Tylko w jednym miejscu powołuje się na pracę profesora W.Walczaka z 1989r, a od tego czasu zostało opublikowanych w kraju przynajmniej kilkanaście prac z tego zakresu dotyczących praktyki i teorii z zakresu zgrzewania wybuchowego. Nieobecność literatury polskojęzycznej jest prawdopodobnie przyczyną licznych błędów językowych jakie występują w części dotyczącej zgrzewania wybuchowego. Absolutnie niezrozumiale jest również pominięcie przez autora współczesnej literatury rosyjskiej, a przecież jest to kraj w którym najprężniej rozwija się ta technologia. Oparcie się na starych publikacjach prof. A.A.Deribasa z lat 60- tych V.V Efremova z lat 70-tych nie było trafne ze względu na zupełnie zmienione spojrzenie na ten proces w ostatnich latach. Również niezrozumiale jest niekorzystanie przez Doktoranta z periodyku *Fizyka Gorienja i Vzryva*, w którym opisane są między innymi procesy zgrzewania wybuchowego miedzi, tytanu oraz obu tych metali.

Część literatury nie dotyczy przedmiotu rozprawy i można by ją z powodzeniem pominąć np. poz. 6, 9, 10, 14, 17, 21 itd. zastępując literaturą bardziej zbliżoną tematycznie. Można wrzucić prace Okleja L.N który zajmował się zgrzewaniem wybuchowym miedzi i tytanu

- w literaturze m.in. w pozycjach 56, 60 brak jest numerów czasopism, w innych np. poz. 12 roku wydania.

- w pracy brak jest opisu podstawowych parametrów i efektów procesu zgrzewania wybuchowego, m.in. na rys 3 brak jest *strumienia odwrotnego*, a w teście Autor w żadnym miejscu nie używa sformułowania "*strefa pośrednia*", które jest stosowane na całym świecie i dużo łatwiej byłoby mu interpretować wyniki. Zastosowanie teorii *anormalnego transportu masy* w znacznym stopniu ułatwiłoby mu interpretację wyników obserwacji metalograficznych w strefie pośredniej na granicy Cu-Ti,

- autor używa materiałów wybuchowych o trzech prędkościach detonacji. Jednak w żadnym miejscu nie pisze, czy są to trzy różne materiały? Czy jest to jeden materiał z zastosowaniem różnej ilości flegmatyzatora? Podobnie pytania dotyczą prędkości detonacji. Skąd Autor wie jakie są rzeczywiste prędkości detonacji użytych materiałów wybuchowych? Jak je mierzono? Czy mierzono odchylenia standardowe prędkości dla zastosowanych mieszanin wybuchowych? i na jakiej krotności prób?

- nie jest jasne dlaczego badania wytrzymałości na zginanie prowadzono w temperaturach poniżej zera, natomiast w drugiej części pracy próbki wygrzewano przez 1h, 10h i 100h w temperaturze 700°C i to tylko dla jednego wariantu. Dlaczego zastosowano takie parametry wygrzewania?

- nie istnieje pojęcie "szerokość warstwy międzymetalowej". Po pierwsze warstwa odnosi się do powierzchni zewnętrznej, po drugie sugeruje że pomiędzy dwoma metalami znajduje się inna warstwa, a więc jaka? niemetalowa? a po trzecie jest to po prostu *warstwa pośrednia* czasami zwana przejściową

- tablica 2 i rys 20 należałoby przenieść do Wstępu Teoretycznego.

- nie jest jasne w jaki sposób pobierano próbki do badań wytrzymałościowych. Doktorant pisze, że pobierano "w kierunku równoległym do kierunku rozchodzenia się fali detonacyjnej".

- nie jasna jest interpretacja rysunków 48 i 49. Autor powinien absolutnie wprowadzić pojęcie strefy pośredniej, w której występują strefy umocnienia zgniotem zarówno miedzi jak i tytanu, o czym świadczy odkształcenie plastyczne obu łączonych materiałów i wzrost twardości w obszarze złącza /rys. 48a i 49a/. Również strefa pośrednia, ale bardziej złożona występuje na rys. 48b i 49b. Co oznaczają dwa zera na osi X, czy ta strefa nie ma wymiaru? Co oznacza gwałtowny spadek twardości i zapis "Pomiar w obszarze miedzi" po stronie Ti?

- rys. 50 Jak Autor wyjaśni zjawisko amorficzności, bo strefy przetopionej nie widać na zdjęciach, jeżeli czas proces zgrzewania liczony jest w milisekundach.

A może zastosować pojęcia *anormalny transport masy* lub przemiana porządek - nieporządek w wyniku wprowadzenia dużej energii i w miejscu zderzenia płyt?

- rys 36 – inny zapis legendy niż na pozostałych rysunkach 30-33.


Niezależnie od uwag zawartych w recenzji, pozytywnie oceniam rozprawę doktorską Pana mgr inż. Wojciecha Skuzy.

Doktorant wykazał się dużą dojrzałością badawczą oraz dobrą znajomością zagadnień z zakresu inżynierii materiałowej w szczególności w zakresie charakteryzacji strefy złącza uzyskiwanego w wyniku zgrzewania wybuchowego tytanu z miedzią. Wnioski kończące rozprawę mają swoje potwierdzenie w wynikach badań. Mogą być wykorzystane zarówno w badaniach naukowych jak i przemysłowych.

Podsumowując chciałbym stwierdzić, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, a Doktorant Pan mgr inż. Wojciech Skuza udowodnił, że zasługuje na uzyskanie stopnia doktora nauk technicznych.

#### 4. Wniosek końcowy

Opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odnośne ustawy i na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. WOJCIECHA SKUZĘ do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie.

  
Tomasz Bielecki