

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Beaty Skowrońskiej** pt.:

**"Zgrzewanie tarciove ultradrobnoziarnistej stali 316L"**

wykonana na zlecenie Wydziału Mechanicznego Technologicznego  
Politechniki Warszawskiej z dnia 14.06.2022.

### **1. Ocena tematu i celów pracy**

Rozwój techniki w okresie ostatnich dziesięcioleci stymulowany jest m. in. przez zastosowania nowych zaawansowanych materiałów, do których należy zaliczyć także materiały o strukturze ultradrobnoziarnistej uzyskiwanej poprzez deformację, co prowadzi do znacznego polepszenia ich właściwości mechanicznych, ale i powstania stanu nierównowagi termodynamicznej materiału. Dlatego tak uzyskiwane materiały wykazują skłonność do rekrytalizacji pod wpływem energii cieplnej, co ma miejsce w szczególności podczas stosowania klasycznych procesów spajania, prowadząc do destrukcji mikrostruktury, a w efekcie do utraty pierwotnych właściwości wytrzymałościowych. Łączenie takich materiałów stanowi wyzwanie naukowe i technologiczne, gdyż ogranicza ich potencjał aplikacyjny. Opracowaniem technologii spajania materiałów ultradrobnoziarnistych (UFG) oraz badaniem zjawisk towarzyszącym takiemu procesowi zajmowały się wiodące laboratoria naukowe na świecie. Badano wysokoenergetyczne metody spajania (spawanie laserowe, wiązką elektronową, spawanie hybrydowe, lutowanie, zgrzewanie rezystancyjne), dochodząc do wniosku, że procesem predysponowanym do łączenia materiałów ultradrobnoziarnistych jest spajanie w stanie stałym (ultradźwiękowe, tarciove). Znamienne jednak jest to, że do tej pory nie udało się uzyskać w pełni zadawalającego rozwiązania tego problemu.

W literaturze brakuje wnikliwego opracowania na temat struktury połączenia i mechanizmu łączenia poprzez wysokoobrotowe zgrzewanie tarciove.

Zagadnienia dotyczące szerokiej analizy zmian strukturalnych oraz morfologii mikrostruktury ultradrobnoziarnistej stali 316L i ich wpływu na właściwości mechaniczne zachodzące w warunkach oddziaływania zróżnicowanych parametrów procesu wysokoobrotowego zgrzewania tarciovego, stały się przedmiotem zainteresowania i badań Autorki recenzowanej rozprawy doktorskiej.

**Podjęcie przez Doktorantkę tematyki analizy zjawisk termomechanicznych i dyfuzyjnych zachodzących podczas procesu wysokoobrotowego zgrzewania tarciovego materiałów z ultradrobnoziarnistej stali 316L, jest zatem w pełni uzasadnione i aktualne.** Problematyka niniejszej rozprawy doktorskiej jest ważna zarówno z naukowego, poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia.

Cel, jaki sobie Autorka postawiła („...opracowanie warunków wysokoobrotowego zgrzewania tarcowego umożliwiającego ograniczenie zasięgu zdegradowania mikrostruktury materiału UFG oraz uzyskanie złączy o właściwościach mechanicznych zbliżonych do właściwości stali 316L po wyciskaniu hydrostatycznym”) jest jasny i wykazuje cechy oryginalnego podejścia do rozwiązania zadania.

Wysoko oceniam koncepcję badań oraz dobór metod badawczych, które dobrze świadczą o warsztacie naukowym mgr inż. Beaty Skowrońskiej. Autorka precyzyjnie określiła 6 zadań cząstkowych (rys.39), co dowodzi, że gruntownie przemyślała swoją koncepcję, a jej realizację starannie zaplanowała.

## **2. Układ pracy, ocena ogólna**

Praca doktorska mgr. inż. Beaty Skowrońskiej jest pracą o charakterze eksperymentalnym. Praca składa się z ośmiu rozdziałów, na które składają się w części zasadniczej: rozdział 1 – Wstęp, rozdział 2 – Charakterystyka materiałów ultradrobnoziarnistych (UFG), rozdział 3 – Spajalność materiałów UFG, rozdział 4 – Spajanie w stanie stałym, rozdział 5 – Podsumowanie stanu zagadnienia, rozdział 6 – Cel pracy i program badań, rozdział 7 – Wyniki badań, rozdział 8 – Analiza i dyskusja wyników. Pracę kończą: Wnioski, Bibliografia, Spis rysunków oraz Spis tablic.

Praca została zaopatrzona w wykaz oznaczeń użytych w treści oraz w streszczenia w języku polskim i angielskim. Do pracy dołączono odrębnie dwa załączniki (każdy po 9 stron), zawierające zestawienia map IPF oraz obrazów rozkładu parametrów GOS i KAM obszarów pomiarowych wytypowanych złączy zgrzewanych tarcowo.

Praca w zasadniczej części, tj. bez załączników, liczy 160 stron. Wykaz literatury obejmuje 199 pozycje, trafnie dobrane, przy czym Doktorantka powołuje się na 5 publikacji współautorskich, w których jest pierwszą autorką opublikowanych w 4 czasopismach recenzowanych oraz jedną na konferencji, a także na pracę dyplomową studenta, której była promotorem. Świadczy to znaczącym wkładzie Autorki w rozważaną problematykę badawczą. Tekst rozprawy jest poparty licznymi rysunkami, wykresami i tabelami wyjaśniającymi lub ilustrującymi opisywane problemy. Na podkreślenie zasługuje bardzo duża dbałość Autorki o jakość większości zdjęć, grafik i wykresów. Praca została napisana poprawnym i zrozumiałym językiem polskim.

Układ pracy jest typowy dla prac doktorskich i nie budzi ogólnie zastrzeżeń. Rozpoczyna ją krytyczna zwięzła analiza literatury związanej z tematem (rozd. 2 do 5), po czym następuje sformułowanie celów pracy i program badań (rozd.6). W swej zasadniczej części układ pracy zdeterminowany jest przyjętą strukturą zadań cząstkowych, których rozwiązanie składa się na realizację postawionego celu. Pracę kończy analiza i dyskusja uzyskanych wyników (rozd. 8) wraz z wskazaniem przyszłych kierunków badań oraz wnioski, w których Doktorantka szczegółowo wypunktowała najistotniejsze, Jej zdaniem, osiągnięcia zarówno naukowe, jak i użyteczne, a także podała konkretne propozycje technologiczne wykonywania złączy ultradrobnej austenitycznej

stali 316L HE wykonanych metodą wysokoobrotowego zgrzewania tarcowego. Część teoretyczna rozprawy doktorskiej, przedstawiona w pięciu rozdziałach, jest stosunkowo obszerna i stanowi około 39% objętości pracy.

Przedmiotem badań Autorki były jednoimienne złącza ultradrobnej austenitycznej stali 316L HE wykonane metodą wysokoobrotowego zgrzewania tarcowego, którą to metodę rozwijał w Politechnice Warszawskiej od 2003 r. zespół prof. dr hab. inż. W. Włosińskiego, (m.in. dr inż. Jolanta Zimmerman, prof. Tomasz Chmielewski).

Autorka szczegółowo scharakteryzowała właściwości stali 316L HE, wytworzonej metodą wyciskania hydrostatycznego w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN, a będącej materiałem do badań spajalności. Stwierdziła, że materiał ten posiada wysokie właściwości wytrzymałościowe ( $R_{p0,2} = 1200$  MPa przy wydłużeniu  $A = 11,6\%$ ), a następnie wyjaśniła poprzez obserwacje za pomocą mikroskopii elektronowej, że są one wynikiem nie tylko drobnoziarnistości struktury, ale również silnego odkształcenia (wydłużenie ziaren, liczne pasma ścinania, nano-bliźniaki), a taki stan materiału powoduje obniżenie jego stabilności cieplnej, co znacząco utrudni proces spajania.

Stąd w celu ograniczenia zasięgu degradacji mikrostruktury w procesie spajania przyjmuje słusznie za konieczne „uzyskanie jak najostrzejszego gradientu temperatury w płaszczyźnie łączonych elementów”, co może mieć miejsce przez zastosowanie technologii wysokoobrotowego zgrzewania tarcowego.

**Celem rozprawy doktorskiej** było opracowanie warunków wysokoobrotowego zgrzewania tarcowego umożliwiających ograniczenie zasięgu zdegradowania mikrostruktur materiału UFG oraz uzyskanie złączy o właściwościach zbliżonych do właściwości stali 316L po wyciskaniu hydrostatycznym.

W badaniach przeprowadzonych w pracy doktorskiej mgr inż. Beata Skowrońska dokonała:

- **doboru parametrów wysokoobrotowego zgrzewania tarcowego stali 316L HE**, stwierdzając, że złącza zgrzewane z prędkością  $n=8000$  obr/min i docisku 4 bar pozwoliło uzyskać szerokości SWC poniżej 10% średnicy pręta, z ograniczonym spadkiem twardości oraz wytrzymałością do 85% wytrzymałości materiału rodzimego. Doktorantka parametry procesu zgrzewania wysokoobrotowego dobrała w rozprawie na podstawie wcześniejszych prób przeprowadzanych w ramach pracy dyplomowej studenta realizowanej pod opieką prof. T. Chmielewskiego (pozycja literaturowa 179), oraz pracy dyplomowej (pozycja literaturowa 193), której była promotorem: analizowała parametry procesu od 8 000 do 12 000 obr/min oraz ciśnienia docisku w fazie tarcia wynoszącym 4 i 4,5 bar (pozostałe parametry stałe). Stwierdziła, że większa średnia wielkość ziarna w złączu zgrzewanym występuje przy wyższej prędkości obrotowej, co w efekcie powodowało osłabienie właściwości mechanicznych.

Proces zgrzewania wysokoobrotowego przeprowadzano na stanowisku wyposażonym w nowoczesną wysokoobrotową zgrzewarkę tarcową (RSM210 Harms & Wende).

- **statycznych i dynamicznych badań wytrzymałościowych** złączy zgrzewanych oraz przeprowadziła szczegółową analizę przełomów próbek poddanych badaniom wytrzymałości na rozciągania, stwierdzając ich przebieg w SWC, a badania fraktograficzne oraz SEM pozwoliły wykazać różnice w ich budowie przy różnych prędkościach obrotowych procesu zgrzewania;

- **obszernych badań metalograficznych** poszczególnych stref materiałowych zgrzein, stwierdzając większy wpływ na właściwości mechaniczne złącza stopnia rozdrobnienia mikrostruktury niż poziomu jej zdeformowania, co jest zgodne z zależnością Halla-Petcha.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że Autorka z dużą swobodą posługuje się zaawansowanymi badaniami wytrzymałościowymi i materiałowymi do oceny mikrostruktur (m.in. przy użyciu metod SEM, TEM, EBSD), które posłużyły jej do wyjaśnienia przyczyn uzyskiwanych właściwości wytrzymałościowych złączy przy różnych parametrach procesu zgrzewania.

O ile ogólna ocena układu i zawartości pracy jest jednoznacznie wysoka, to jej lektura skłania jednak do pytań, w tym również o charakterze ogólnym:

- czym można wyjaśnić zmianę średniej wielkości ziarna w zależności od badanych prędkości obrotowych (8 000 a 12 000 obr/min),

- w przeprowadzonych badaniach najlepsze właściwości złącza otrzymano dla najniższych z zastosowanych parametrów tj. przy prędkości obrotowej 8 000 obr/min i ciśnieniu docisku w fazie tarcia wynoszącym 4 bar. Czy dalsze zmniejszenie parametrów (prędkości obrotowej lub docisku w fazie tarcia) nie spowoduje uzyskania lepszych właściwości połączenia?

- w pracy stosowano stałe ciśnienie docisku w fazie spęczania wynoszące 5 bar. Czy zastosowanie wyższego docisku nie spowodowałoby zmniejszenia szerokości SWC, a przez to uzyskania lepszych właściwości połączenia?

Uwagi powyższe nie wpływają na ocenę strony merytorycznej pracy. Stwierdzam, że Autorka zrealizowała cel pracy.

### **3. Uwagi szczegółowe**

W toku lektury pracy, oprócz spostrzeżeń natury ogólnej, pomimo że praca jest opracowana starannie, wyłania się kilka uchybień o charakterze redakcyjnym, a także zwykłych literówek. I tak np.:

1. Str. 21, Rys. 5: w podpisie rysunku widnieje „Porównanie szybkości odkształcenia...” a na rysunku jest „Prędkość odkształcenia...” bez podanych jednostek.

2. Str. 25, Rys. 9: w podpisie rysunku brak podania źródła zaczerpniętych materiałów

3. Str. 27, Rys. 12: w podpisie rysunku brak podania źródła zaczerpniętych materiałów, a na rysunku brak jednostek przedstawianych właściwości mechanicznych.

4. Str. 29, wiersz 12 od góry: jest „...osłabienie...”, a powinno być „...osłabienia...”.

5. Str. 30, wiersz 2 od góry: jest „...przekroczenie...”, a powinno być „...przekroczenia...”,
6. Str. 32, Rys. 14: opis na rysunku częściowo języku angielskim
7. Str. 34, Rys. 17: w podpisie rysunku jest „...z dynamiczną rekrytalizacji stali...”, a powinno być „z dynamiczną rekrytalizacją stali...”
8. Str. 40, Rys. 24; Str. 41, Rys. 25; Str. 61, Rys. 37: w podpisie rysunku brak podania źródła zaczerpniętych materiałów
9. Str. 65, w opisie charakterystyki materiału zgrzewanego brak jest podanej długości otrzymanych próbek po wyciskaniu hydrostatycznym stali 316L
10. Str. 69, Rys. 49 : w opisie na rysunku wymiar długości uchwytu próbki jest jako „m”, a w opisie jako „M”
11. Str. 80, Rys. 53: opis na rysunku częściowo w języku angielskim
12. Str. 85: czy przedstawiony na rys. 57b rozkład twardości w złączu zgrzewanym na promieniu dla prędkości obrotowej 7000 obr/min jest taki sam jak przedstawiony na rys. 58 także dla prędkości obrotowej 7000 obr/min? Czy to są różne próbki?
13. Str. 85, Rys. 57 i 58: Autorka przy wykresach rozkładu twardości w złączach używa zamiennie używa określenia „na promieniu” i „przy promieniu” . Czym różnią się pomiary dla takich dwóch określeń?
14. Str. 84 i 85, Rys. 55 -58: w podpisie rysunku brak podania źródła zaczerpniętych materiałów.

#### **4. Podsumowanie**

Po szczegółowym zapoznaniu się z przedstawioną mi do oceny rozprawą doktorską mgr inż. **Beaty Skowrońskiej** pt.: "**Zgrzewanie tarciove ultradroboziarnistej stali 316L**" stwierdzam, że wykazała się w niej umiejętnością formułowania i samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych. Wykazała się przy tym wiedzą w zakresie technologii zgrzewania tarciovego i badań materiałowych, umiejętnością korzystania z różnorodnych metod badawczych i z nowoczesnej aparatury badawczej oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Rozprawa stanowi oryginalny wkład naukowy w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie ***budowa i eksploatacja maszyn*** w której został otwarty przewód doktorski i mieści się w pełni w dziedzinie nauk inżynierijno -technicznych, w dyscyplinie ***inżynieria mechaniczna***. Rozprawa doktorska mgr inż. **Beaty Skowrońskiej** spełnia wymagania stawiane osobie ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r, Art. 187 (Dz. U, poz. 1668 z dnia 30 sierpnia 2018 r.) i wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

/Andrzej Ambroziak /