



dr hab. inż. Jacek Górka, prof. PŚ
Katedra Spawalnictwa
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice



Gliwice, 21 lipiec 2022

RECENZJA

pracy doktorskiej

Pani mgr inż. Beaty Skowrońskiej

pod tytułem

„Zgrzewanie tarciove ultradrobnoziarnistej stali 316L”

wykonanej pod opieką promotora

Pana prof. dra hab. inż. Tomasza Chmielewskiego,

i promotora pomocniczego

Pana dra inż. Jacka Skiby

opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna

Politechniki Warszawskiej z dnia 01.06.2022 roku

Autorka w niniejszym opracowaniu podejmuje się opracowania warunków wysokoobrotowego zgrzewania tarciove ultradrobnoziarnitej nierdzewnej stali austenitycznej 316L umożliwiających ograniczenie zasięgu zdegradowania mikrostruktury łączonego materiału i zapewnienia własności mechanicznych połączenia zbliżonych do własności stali 316L po wyciskaniu hydrostatycznym. Analizując treść i zakres pracy należy stwierdzić, że wpisuje się ona w pełni w dyscyplinę naukową: **Budowa i Eksploatacja Maszyn** (obecnie Inżynieria Mechaniczna), choć również można się tutaj doszukiwać bardzo wielu aspektów z obszaru Inżynierii Materiałowej.

Od kilku lat obserwuje się dynamiczny rozwój badań nad opracowaniem nowych materiałów inżynierskich cechujących się wyjątkowymi właściwościami użytkowymi, które są uzyskiwane w wyniku zapewnienia im ultradrobnej ziarna lub nanostruktury. Nanomateriały to jedno lub wielofazowe polikryształy charakteryzujące się mikrostrukturalną wielkością ziarna na poziomie od 1×10^{-9} m do 250×10^{-9} m. Przy górnej granicy tego zakresu, częściej używany jest termin „bardzo drobnej wielkości ziarna – ultradrobne ziarno” (wielkości ziarna 250 – 1000nm). Materiały te strukturalnie charakteryzują się dużym udziałem objętościowym na granicach ziaren co znacznie zmienia ich własności fizyczne, chemiczne i mechaniczne w porównaniu do konwencjonalnych materiałów gruboziarnistych,

których wielkość ziarna mieści się zwykle w zakresie 10 - 300 μ m. Dynamiczny rozwój materiałów nanostrukturalnych i ultradrobnoziarnistych rokuje wzrost ich zastosowania w technologiach przemysłowych, tylko wtedy jeżeli zostaną opracowane metody łączenia tego typu materiałów, w taki sposób, aby w obszarze łączenia na następowała utrata własności związanych z ich strukturą. Klasyczne metody spawania, w tego typu materiałach mogą prowadzić do procesu rekrytalizacji oraz rozrostu ziarna w wyniku czego dochodzi do degradacji rozdrobionej mikrostruktury i utraty wysokich własności mechanicznych. Alternatywą dla klasycznych procesów spawania mogą być technologie łączenia w stanie stałym, w którym połączenie powstaje z pominięciem fazy ciekłej (np. procesy zgrzewania tarcowego). Analizując strukturę i własności materiałów nanokrystalicznych i ultradrobnoziarnistych należy stwierdzić, że czynnikiem determinującym uzyskanie odpowiedniego połączenia metodami spawalniczymi jest czynnik technologiczny.

Dlatego mając na uwadze doniesienia literaturowe oraz obecny stan wiedzy na ten temat bardzo celowym wydaje się podjęcie przez Doktorantkę badań dotyczących opracowania warunków technologicznych łączenia ultradrobnoziarnitej nierdzewnej stali austenitycznej 316L po wyciskaniu hydrostatycznym z wykorzystaniem metody zgrzewania tarcowego wysokoobrotowego. Temat ten jest aktualny zarówno pod względem rodzaju badanego materiału (sposobu jego wytworzenia), jak również pod względem zastosowanej technologii łączenia, a osiągnięte rezultaty badawcze pozwolą na zwiększenie zakresu aplikacyjnego stali 316L po wyciskaniu hydrostatycznym.

Autorka rozprawy nie formułuje tezy pracy (w świetle przepisów nie ma takiego obowiązku), ale na podstawie analizy literaturowej i doświadczeń własnych definiuje cel pracy, jakim jest: **„Opracowanie warunków wysokoobrotowego zgrzewania tarcowego umożliwiającego ograniczenie zasięgu zdegradowania mikrostruktury materiału UFG oraz uzyskanie złączy o własnościach mechanicznych zbliżonych do własności stali 316L po wyciskaniu hydrostatycznym”**.

Aby zrealizować cele badawcze Doktorantka:

- dokonała oceny materiału zgrzewanego (stal 316L) po wyciskaniu hydrostatycznym (HE),
- przeprowadziła próby wysokoobrotowego zgrzewania tarcowego, co pozwoliło na opracowanie okna parametrów zgrzewania zapewniającego odpowiednie własności i strukturę złącza,
- przeprowadziła badania metalograficzne za pomocą mikroskopii świetlnej, co pozwoliło na ocenę jakości oraz kształtu obszaru zgrzewania,
- przeprowadziła badania rozkładu twardości w charakterystycznych obszarach złączy zgrzewanych,

- przeprowadziła badania wytrzymałości złączy zgrzewanych w warunkach statycznego i udarowego rozciągania,
- przeprowadziła badania metalograficzne złączy zgrzewanych z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej metodą SEM, EBSD, TEM.

Uważam, że Doktorantka prawidłowo zaplanowała i wykorzystała odpowiednie metody badawcze, które umożliwiły jej osiągnięcie zdefiniowanego celu pracy.

Opiniowana praca doktorska Pani mgr inż. Beaty Skowrońskiej pt. „**Zgrzewanie tarciove ultradroboziarnistej stali 316L**” o klasycznym układzie obejmuje w pierwszej części przegląd piśmiennictwa, w drugiej badania własne. Praca jest złożona ze 160 stron, 8 rozdziałów zawierających 110 rysunków i 11 tablic. Dodatkowo Autorka zamieściła dwa załączniki zawierające zestawienie map IPF (orientacja krystalograficzna) i IQ (jakość obrazu) oraz zestawienie obrazów rozkładu parametrów GOS (rozzut orientacji ziarna) i KAM (średnia dezorientacja). Przegląd literatury oparty jest na 199 pozycjach literaturowych obcojęzycznych i krajowych, w 6 z nich Doktorantka jest współautorem (6 publikacji jest indeksowanych w Bazie WoS, a 3 z nich posiadają IF). Przegląd piśmiennictwa obejmuje zarówno artykuły z czasopism naukowych, materiały konferencyjne jak i opracowania książkowe z krajowego i światowego obiegu literatury. Cytowane źródła literaturowe były w większości opublikowane w ostatnich latach, są różnorodne i pozwoliły na prawidłową analizę badanego zagadnienia.

Klasyczny układ pracy nie budzi zastrzeżeń. We wstępie Autorka, zwróciła uwagę na sposoby umocnienia materiałów metalowych ze szczególnym zwróceniem uwagi na wielkość ziarna i procesy jakie zachodzą w materiałach droboziarnistych w wyniku aktywacji cieplnej. Rozdział II poświęcony jest charakterystyce materiałów ultradroboziarnistych (UFG) i procesom ich wytwarzania (proces dużego odkształcenia plastycznego – SPD, skręcanie pod wysokim ciśnieniem – HTTP, wyciskanie hydrostatyczne – HE). W rozdziale tym opisano również mikrostrukturę materiałów UFG, ich własności oraz zastosowanie. W Rozdziale III, Doktorantka opisała spajalność materiałów UFG, ze szczególnym uwzględnieniem takich zjawisk jak zdrowienie, rekrytalizacja, stabilność cieplna. Rozdział IV zawiera charakterystykę zgrzewania tarciovego. Całość analizy literaturowej podsumowuje Rozdział V, w którym Doktorantka nakreśliła zakres badań praktycznych i ukierunkowuje czytelnika na cel badawczy. Część literaturową oceniam bardzo wysoko, zawiera ona istotne informacje pozwalające zaplanować eksperyment badawczy, uzasadnia założone cele badawcze, jest napisana poprawnie pod względem językowym i nie zawiera błędów merytorycznych. Doktorantka w tej części rozprawy nie ustrzegła się pewnych błędów czy nieścisłości, można do nich zaliczyć:

- w części rysunków brakuje opisu osi i/lub jednostek i/lub zaczynają się od małej litery: np.: rys. 1, rys. 29, rys. 30, rys. 31, rys. 46,
- rozprawa jest napisana w języku polskim, natomiast część rysunków zawiera opisy w języku angielskim (np.: rys. 12),
- co Autorka rozumie pod pojęciem: „spajalność”,
- co Autorka rozumie pod pojęciem „wąski gradient temperatury”?, str. 14,
- na str. 24 Autorka opisuje własności elektrod do zgrzewania oporowego, czy wiadomo jaki jest koszt wytworzenia takich elektrod w stosunku do elektrod tradycyjnych?,
- uważam, że Podrozdział 3.2.1. Stabilność cieplna stali austenitycznej UFG 316L, powinien być przeniesiony do części badawczej pracy,
- na str. 51, Autorka używa pojęcia „stale konstrukcyjne węglowe”, obecnie używa się pojęcia: „stale konstrukcyjne niestopowe”,
- ponadto w pracy można dopatrzeć się drobnych błędów językowych dotyczących niewłaściwej odmiany wyrazów, niewłaściwej interpunkcji, braku łączników wyrazów - błędów tych szczegółowo nie wymieniam.

W rozdziale 6 zatytułowanym: Cel pracy i plan badań, Doktorantka na podstawie wniosków wyciągniętych z analizy dostępnej literatury i na podstawie eksperymentów własnych przedstawiła program badań, który miał pozwolić na osiągnięcie założeń eksperymentu badawczego, oprócz tego przedstawione zostały wyniki dotyczące materiału badawczego: stali 316L po wyciskaniu hydrostatycznym. Doktorantka przedstawiła tutaj charakterystykę stali 316L, własności mechaniczne po procesie wyciskania hydrostatycznego oraz wyniki badań metalograficznych, a także stanowisko badawcze oraz dobór parametrów do zgrzewania tarcowego wysokoobrotowego. Uważam, że te elementy powinny zostać przedstawione w osobnym rozdziale. Odnosząc się do informacji zawartych w tym rozdziale pojawia się pytanie, czy Doktorantka badała skład chemiczny stali 316L, jeżeli tak to jaką metodą?. Kluczowe dla tego zakresu pracy jest ustalenie przez Doktorantkę faktu, że decydującym parametrem wpływającym na przebieg procesu zgrzewania jest prędkość obrotowa, które zapewnia nie tylko poprawność połączenia ale również odpowiednią mikrostrukturę. Uważam, że program badań został dobrany poprawnie i pozwolił na weryfikację założeń przedstawionej pracy.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki badań połączeń zgrzewanych w oparciu o podstawowe i zaawansowane techniki badawcze. Ten zakres pracy uważam, za bardzo cenny pod względem poznawczym i aplikacyjnym. Doktorantka przedstawiła tutaj mechanizm tworzenia złącza zgrzewanego, jego charakterystyczne obszary oraz dokonała bardzo trafnej oceny mikrostruktury w oparciu o skaningową mikroskopię elektronową (SEM), badania

dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) oraz za pomocą transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM). Ocena własności mechanicznych połączeń zgrzewanych została dokonana na podstawie pomiarów twardości, próby wytrzymałości w warunkach statycznego rozciągania oraz próby wytrzymałości na rozciąganie w warunkach obciążenia udarowego. Dodatkowo wyniki badań własności mechanicznych zostały przedstawione z wykorzystaniem odpowiedniej statystyki matematycznej. Jakość tej części badań, zwłaszcza wyniki badań metalograficznych oceniam bardzo wysoko i nie mam do nich żadnych uwag. Jedynie pojawia się pytanie o możliwość przeprowadzenia próby zginania i ewentualne jej rezultaty.

Syntetyczna analiza i dyskusja wyników przedstawiona w rozdziale 8 nie budzi zastrzeżeń. Wszystkie wyniki badań zostały poprawnie opisane i zilustrowane w postaci rysunków i tablic a zakres przeprowadzonych badań w pełni wyczerpuje zagadnienie badawcze. Autorka przedstawiła w tej części rozprawy swoje osiągnięcia naukowe, użyteczne oraz nakreśliła dalsze kierunki badań. Szczególnie zwraca tutaj uwagę na ograniczenie degradacji mikrostruktury poprzez zmianę warunków zgrzewania stosując zgrzewanie zanurzeniowe w otoczeniu ciekłego medium powodującego szybsze odprowadzanie ciepła ze obszaru zgrzewanego czy wstępne obniżenie temperatury materiału zgrzewanego.

Całość pracy podsumowuje 10 wniosków, które wynikają bezpośrednio z przeprowadzonych badań i mają charakter naukowy, poznawczy i aplikacyjny oraz wskazują kierunki dalszych badań, które pozwolą na zwiększenie możliwości zastosowania materiałów ultradrobnoziarnistych w przemyśle.

Na szczególną uwagę zasługują w recenzowanej pracy dwa aspekty świadczące o oryginalności naukowej pracy i wysokim warsztacie badawczym Doktorantki. W pierwszej kolejności należy podkreślić aspekt technologiczny, który dzięki bardzo dobrej analizie literatury i badań wstępnych, pozwolił na opracowanie okna optymalnych parametrów zgrzewania, ze szczególnym uwzględnieniem prędkości zgrzewania, zapewniających odpowiednią jakość i strukturę połączenia. Drugi aspekt, to wyjaśnienie zjawiska tworzenia złącza w przypadku materiałów ultradrobnoziarnistych, określenie ich morfologii i bardzo precyzyjny opis mikrostrukturalny w oparciu o zaawansowane metody badań mikroskopii elektronowej.

Zawarte w mojej recenzji spostrzeżenia, uwagi, czy sugestie dotyczące niniejszej rozprawy, odnoszą się głównie do aspektów językowych oraz technologicznych i mam nadzieję, będą pomocne w dalszych badaniach prowadzonych przez Doktorantkę. Chciałbym podkreślić, że podane uwagi w żaden sposób nie wpływają na obniżenie bardzo wysokiej

oceny opiniowanej pracy doktorskiej Pani mgr inż. Beaty Skowrońskiej. Praca cechuje się wysokim poziomem merytorycznym, bardzo dobrym poziomem językowym i edytorskim, a uzyskane wyniki badań własnych są oryginalne, wartościowe poznawczo i mają bardzo duże znaczenie aplikacyjne.

Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana praca doktorska Pani mgr inż. Beaty Skowrońskiej pod tytułem „Zgrzewanie tarciove ultradrobnoziarnistej stali 316L” spełnia wymogi stawiane pracom na stopień doktora nauk Inżynieryjno-technicznych, w rozumieniu art. 13 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, poz. 595 (z późniejszymi zmianami) oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668). Wniosuję zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Beaty Skowrońskiej do publicznej obrony jak również procedowanie kolejnych etapów w zakresie ubiegania się przez Doktorantkę o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk Inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie: Inżynieria Mechaniczna.

Doceniając jednocześnie bardzo wysoki poziom zaprezentowanej rozprawy, szeroki zakres prac oraz wykorzystanie nowoczesnych metod badawczych, a także aktualność podjętej tematyki i uzyskane perspektywiczne wyniki mogące mieć zastosowanie w przemyśle, a także dorobek naukowy Doktorantki potwierdzający jakość warsztatu badawczego (sumaryczny IF = 8,86) wnioskuje do **Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Warszawskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Beaty Skowrońskiej.**

Opracował:

