

Częstochowa, dn.26.02.2026 r.

prof. dr hab. inż. Zbigniew Konopka, emeryt
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Katedra Metalurgii i Technologii Metali
Politechnika Częstochowska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Deca

**pt.: "Modelowanie mikrostruktury złączy spawanych ze stali AISI304L
i AISI316L w aspekcie poprawy odporności korozyjnej zbiorników
procesowych"**

opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa
Politechniki Rzeszowskiej

1. Ocena przedmiotu rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Deca reprezentuje dyscyplinę Inżynieria Materiałowa i dotyczy opracowania zrobotyzowanego stanowiska do profilowania wymiennika ciepła i jego spawania ze ścianką zbiornika procesowego oraz modelowania mikrostruktury spoin poprzez zmianę ilości wprowadzonego ciepła HI i obróbkę pospawalniczą w aspekcie podwyższenia właściwości mechanicznych i odporności na korozję wżerową.

Praca o charakterze aplikacyjnym przedstawia wyniki własnych prac projektowych nowej konstrukcji zbiornika procesowego wykonanego metodą spawania z austenitycznych stali nierdzewnych ASSs (Austenitic Stainless Steels), gatunku AISI 304L (1.4307) i AISI 316L (1.4404). W zakresie naukowym, w pracy rozwiązywane jest zagadnienie wpływu parametrów procesu spawania i cieplnej obróbki pospawalniczej na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne i odporność na korozję spoin.

Celem wdrożeniowym pracy było zwiększenie odporności spoin na korozję i poprawa warunków wymiany ciepła w zbiorniku przy mniejszym ciśnieniu medium grzewczo-

chłodzącego, a w konsekwencji zwiększenie jego trwałości. Złącza spawane z austenitycznych stali nierdzewnych, będące przedmiotem niniejszej pracy, są powszechnie stosowane w praktyce przemysłowej. Badania przedstawione w pracy bazują na znanej teorii kształtowania mikrostruktury i właściwości stali austenitycznych odpornych na korozję i wpływu procesów spawania na jakość spoin. Zagadnienie oddziaływania powyższych czynników technologicznych i materiałowych na krystalizację oraz kształtowanie struktury i właściwości spoin jest opisane i przedstawione w literaturze światowej.

W przemyśle spożywczym do przetwarzania owoców, warzyw i produktów mlecznych stosowane są linie technologiczne wyposażone w zbiorniki procesowe ze stali ASSs, które spełniają wysokie wymagania dotyczące odporności na korozję, trwałości oraz neutralności wobec przetwarzanych produktów spożywczych. Właściwości te są szczególnie istotne w kontekście procesów obróbki termicznej tych produktów. Stal nierdzewna AISI 316L, dzięki zawartości molibdenu, wykazuje wysoką odporność na korozję wżerową i szczelinową, co zdecydowało o jej zastosowaniu na urządzenia do wytwarzania środków spożywczych o wysokiej zawartości soli i kwasów, takich jak przeciery owocowe czy koncentraty. Z kolei stal AISI 304L, choć mniej odporna na agresywne środowiska, doskonale sprawdza się w przetwarzaniu produktów mniej agresywnych (np. mleka) zapewniając korzystniejszy stosunek kosztów do trwałości. Obie te stali odznaczają się neutralnością w kontakcie z żywnością, co zapobiega zmianom smaku, zapachu lub składu chemicznego produktów.

Wielokierunkowe badania mikrostruktury i właściwości spoin obejmujące opis mechanizmu krystalizacji i powstawania różnych morfologii wydzieleni ferrytu δ w stalach nierdzewnych nie został do tej pory jednoznacznie opisany. Wynika to ze złożoności nierównowagowego procesu krystalizacji stopu zależnego od zmiennych szybkości chłodzenia i w konsekwencji segregacji pierwiastków stopowych, które decydują o ilości i morfologii wydzieleni ferrytu δ . W krystalizacji ferrytyczno-austenitycznej, charakterystycznej dla badanego w pracy, materiału drutu AISI 316L w strukturze stali, obserwuje się wydzielenia ferrytu δ o morfologii wermikularnej (dendrytycznej, szkieletowej), wermikularnej–siatkowej, listkowej (lathy), koronkowej (lacy) i ferryt międzyblokowy w zależności od szybkości chłodzenia. Szereg autorów uważa, że obecność ferrytu δ w mikrostrukturze złącza zwiększa jego odporność na pękanie na gorąco, a także wpływa korzystnie na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie. Wzrost udziału ferrytu δ o morfologii listkowej (lathy) poprawia właściwości korozyjne i wytrzymałościowe oraz udarność w porównaniu do materiału o wyższym udziale ferrytu δ o morfologii

vermikularnej. Potwierdzono, że przy małej szybkości chłodzenia uzyskuje się ferryt δ o morfologii wermikularnej, a zastosowanie dużej szybkości chłodzenia powoduje tworzenie ferrytu o morfologii listkowej (lathy). Oznacza to, że możliwe jest sterowanie morfologią ferrytu δ poprzez zmianę szybkości chłodzenia spoiny kontrolowaną zmiennymi parametrami procesu spawania. Powyższe przesłanki jednoznacznie wskazują na konieczność prowadzenia badań eksperymentalnych i w pełni uzasadniają podjęcie badań w tym zakresie.

Pracę wykonano we współpracy z firmą FME Food Machinery Europe Sp. z o.o., która podjęła decyzję o potrzebie udoskonalenia konstrukcji i procesu technologicznego wytwarzania zbiorników procesowych, bazującej na innej koncepcji budowy, w której wymiennik ciepła wykonany jest w kształcie węzownicy połączonej spoinami ze ścianką zewnętrzną zbiornika. Zdecydowano, że złącza spawane będą wykonywane metodą TIG, za którą przemawia względnie niski koszt urządzeń, szerokie możliwości regulacji przebiegów prądowych oraz niska masa źródeł prądu i osprzętu spawalniczego, a zatem wysoka ich mobilność. W metodzie tej ochronę jeziora ciekłego metalu prowadzi się zwykle mieszankami gazów na bazie argonu z uwagi na ich akceptowalną cenę. Jako gaz do osłony grani spoiny wykorzystuje się argon, azot lub mieszanki argonu z wodorem oraz azotu z wodorem.

Wytworzenie, zgodnego z normami, zbiornika procesowego nowej konstrukcji według zaproponowanej w pracy procedury materiałowo-technologicznej jest innowacyjnym rozwiązaniem ponieważ: ulepsza wymianę ciepła w zbiorniku, zwiększa jakość spoin, zwiększa odporność na korozję i w konsekwencji zwiększa trwałość zbiornika.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że Autor zaproponował innowacyjne rozwiązanie, a wyniki przedstawione w pracy mogą służyć jako algorytm poprawy jakości spoin wykonanych z zastosowaniem stworzonej bazy danych. Z uwagi na specyfikę badań wynikającą z szerokiego zakresu zmian parametrów spawania i dużej liczby kryteriów jakościowych odbioru, wyniki pracy mogą być wykorzystane do badania i sterowania jakością konkretnego zbiornika. Jest to zagadnienie naukowo-badawcze o dużej wartości poznawczej i innowacyjnej z dużym potencjałem wdrożenia wyników do praktyki przemysłowej.

Wybór tematyki badań uznaję za trafny i celowy, a praca lokuje się w innowacyjnym obszarze badań naukowych. Proponowane w pracy rozwiązanie wynika z rosnącej konkurencji i potrzeby rynkowej, które stawiają coraz większe wymagania jakościowe zbiornikom procesowym stosowanym dla przetwórstwa żywności.

2. Ocena rozprawy

Tekst rozprawy liczy 60 stron, który uzupełniają: bibliografia zawierająca 105 pozycji literaturowych, wprowadzenie oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa składa się z dwóch głównych części. W pierwszej części przedstawiono obszerny przegląd literatury dotyczący: problematyki wytwarzania i eksploatacji zbiorników procesowych w tym wymagań materiałowych, zjawiska korozji i jej zapobiegania oraz opisu tworzenia struktury złączy spawanych austenitycznych stali nierdzewnych,

Ten fragment rozprawy został opracowany bardzo dobrze ponieważ Autor dokonał trafnego doboru materiału źródłowego informacji naukowej pod względem zakresu, przedstawiony opis jest skoncentrowany na tematyce pracy, bez zbędnych, nieistotnych dla badanej tematyki informacji, opis jest wnikliwy i jasny a ważne treści odpowiednio wzbogacono odpowiednimi wykresami. Przełożyło się na wysoką jakość opracowania tej części pracy pod względem merytorycznym, językowym i edytorskim. Przegląd literatury kończy rozdział 4 przedstawiający podsumowanie przeglądu literatury, uzasadnienie podjęcia badań własnych Autora i dwie tezy pracy w brzmieniu.

- 1. zastosowanie do wytwarzania wymienników ciepła zbiorników procesowych, zautomatyzowanego stanowiska do profilowania wężownicy oraz zautomatyzowanego stanowiska spawania metodą TIG do jej łączenia z płaszczem zbiornika, pozwoli na znaczną poprawę jakości złączy spawanych oraz powtarzalności ich mikrostruktury z uwagi na zawartość ferrytu,*
- 2. zastosowanie nowo opracowanej obróbki pospawalniczej złączy spawanych zbiorników procesowych pozwoli na modelowanie mikrostruktury w aspekcie podwyższenia wytrzymałości na rozciąganie oraz odporności korozyjnej.*

W tezie pierwszej sformułowano oczekiwaną poprawę jakości złączy spawanych w wyniku modelowania mikrostruktury, głównie obecności ferrytu uzyskaną w sterowanym i kontrolowanym procesie spawania TIG. Teza druga formułuje związek przyczynowo-skutkowy wpływu obróbki pospawalniczej na mikrostrukturę złącza. Tezy w pełni odpowiadają na postawione cele pracy i stanowią nowe podejście do rozwiązania postawionego zagadnienia w skali przedsiębiorstwa. W podsumowaniu oceny tej części pracy stwierdzam, że przedstawiony przegląd literatury odpowiada wymogom pracy doktorskiej na poziomie wyróżniającym.

W drugiej części pracy zatytułowanej „Badania własne” Autor przedstawia wyniki badań własnych formułując na wstępie cele pracy, zakres badań i zastosowaną metodykę.

Celem naukowym pracy było zwiększenie właściwości mechanicznych i odporności na korozję wżerową spoin w wyniku modelowania procesu krystalizacji i mikrostruktury złączy spawanych poprzez zmianę ilości wprowadzonego ciepła w procesie spawania i obróbkę pospawalniczą. Celem wdrożeniowym było opracowanie zrobotyzowanego stanowiska do profilowania ścianki zewnętrznej wymienników ciepła i jego spawania ze ścianką zbiornika i wykonanie testowego zbiornika procesowego z wymiennikiem ciepła.

Dla osiągnięcia celu pracy zrealizowano program badawczy obejmujący badania w skali laboratoryjnej i w warunkach produkcyjnych w ramach współpracy z firmą FME Food Machinery Europe Sp. z o.o. Zakres badań, w części projektowej, obejmuje następujące prace:

- opracowanie koncepcji zautomatyzowanego stanowiska wytwarzania wężownic,
- wykonanie symulacji komputerowej do oceny dopuszczalnych naprężeń w nowo opracowanym wariantcie konstrukcyjnym wężownicy dla zbiornika o średnicy 1200 mm i wysokości 2000mm przy różnych szerokościach wężownicy w zakresie 50-150mm,
- opracowanie wpływu parametrów spawania na sprawność cieplną procesu TIG ,
- opracowanie parametrów spawania zapewniających klasę jakości B spoin,
- testowanie fizyczne prototypowego wycinka wymiennika ciepła dla zbadania jego odporności na odkształcenia,
- wykonanie prototypowego stanowiska,
- wykonanie testowego zbiornika procesowego z wymiennikiem ciepła.

W części dotyczącej modelowania mikrostruktury spoin minimalizującej zawartość ferrytu δ zrealizowano następujące prace:

- badania wpływu wydzieleni ferrytu δ na inicjację korozji wżerowej w spoinach,
- modelowanie fizyczne mikrostruktury spoin drogą obróbki pospawalniczej zapewniającej minimalizację udziału ferrytu δ ,
- badania porównawcze wytrzymałości na rozciąganie i udarność złączy spawanych przed i po obróbce pospawalniczej.

W szczególności opisanej metodyce badań przedstawiono: stosowane materiały, procedury wykonania próbek i pomiarów z zastosowanymi parametrami oraz dokumentację zdjęciową elementów wykonywanego zbiornika. Zastosowane metody pomiarowe, zaplanowany zakres badań, metody obliczeniowe i weryfikacji są adekwatne do osiągnięcia oczekiwanego celu pracy.

W rozdziale 6 przedstawiono następujące wyniki badań:

1. Zaprojektowano i wykonano nowy typ wężownicy o przekroju ceowym oraz uruchomiono zautomatyzowane stanowisko spawalnicze do wytwarzania zbiorników procesowych, w którym w jednym cyklu technologicznym następuje kształtowanie ścianki zewnętrznej wężownicy w walcierce rolkowej i przyspawanie jej do płaszcza zbiornika procesowego. Dotychczas stosowane zbiorniki zawierają wymienniki ciepła zbudowane z dwóch płaszczy z blachy połączonych ze sobą spoinami punktowymi, w których pomiędzy płaszczyzami odbywa się wymuszony przepływ medium grzewczo-chłodzącego o kontrolowanej temperaturze na wlocie i na wylocie wymiennika ciepła.
2. Wytypowano kanał wężownicy o szerokości 85mm, wysokość 18mm i grubości 1,5mm o profilu ceownika, wykonanej ze stali AISI 304, w którym w wyniku komputerowej symulacji poziomów naprężeń i odkształceń w ściance zewnętrznej wężownicy o w warunkach obciążenia jej medium roboczym o temperaturze 160°C i ciśnieniu 6 barów nie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych odkształceń sprężystych dla założonych parametrów pracy wymiennika ciepła.
3. Uzyskano wartości głębokości wklęsłości spoiny, dopuszczalne według normy, poniżej $h=0,45\text{mm}$, pozwalające zakwalifikować spoiny w klasie jakości B, wartości liczby ferrytowej FN 7,4, 8,5 i 10,1 dla trzech następujących wariantów spawania ze zmiennym natężeniem prądu, napięciem łuku elektrycznego i prędkości spawania:
 - wariant I 140A, 11,8V i 5,0mm/s,
 - wariant II 100A, 10,4V i 3,3mm/s,
 - wariant III 100A,10,4V i 6,7mm/s
4. Wyznaczono następujące wartości sprawności cieplnej procesu wytwarzania testowych, złączy spawanych odpowiednio 0,72, 0,71 i 0,58 oraz ilości wprowadzonego ciepła HI 0,237kJ/mm, 0,023kJ/mm i 0,09kJ/mm. Autor stwierdził, że wraz z obniżeniem ilości ciepła wprowadzanego HI, wzrasta ilość ferrytu δ , co uzasadnił krótszym czasem krzepnięcia i schładzania spoiny, co powoduje, że mniejsza ilość ferrytu δ ulega przemianie w austenitu. Efektem wprowadzenia mniejszej HI, jest silniejsze rozdrobnienie mikrostruktury.
5. Autor wykazał dla wszystkich badanych wariantów spawania obecność w mikrostrukturze spoin ferrytu δ o zróżnicowanej morfologii z przewagą wermikularnego z niewielkimi ilościami listkowego.
6. W wyniku zastosowania cieplnej obróbki pospawalniczej o zmiennych wartościach temperatury nagrzewania, czasu nagrzewania, wygrzewania i szybkości chłodzenia

zmniejszyła się zawartość ferrytu δ i liczba FN na długości spoiny w porównaniu do spoin bez obróbki pospawalniczej,

7. W badaniach mikroskopowych korozji wżerowej Autor wskazał na silne zróżnicowanie składu chemicznego ferrytu δ i przylegającego do niego austenitu, jako główną przyczynę tworzenia się mikroogniw korozyjnych.
8. Autor potwierdził korzystny wpływ obróbki pospawalniczej na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie do wartości 602-614 MPa w porównaniu do 580 MPa dla spoin bez obróbki oraz udarność złączy do wartości 116 J/cm² w porównaniu do wartości 108 J/cm² stanie bez obróbki pospawalniczej,

Uzyskane wyniki, wynikające z teorii i praktyki technologii spawania stali nierdzewnych dowodzą jednoznacznie tezy pracy i potwierdzają osiągnięcie założonych celów pracy. Autor poprawnie zinterpretował uzyskane wyniki. Wyniki badań pracy są innowacyjne w skali krajowej i mają duże znaczenia praktyczne, a także wnoszą nową wiedzę w teorię i praktykę procesu spawania stali nierdzewnych. Podsumowując wyniki badań własnych Autora stwierdzam, że:

- Autor potwierdził doświadczalnie możliwość sterowania mikrostrukturą, właściwościami i jakością złączy spawanych gwarantującą dotrzymanie wymagań norm odbioru ,
- autorskie rozwiązanie projektu automatycznej linii spawalniczej wymienników ciepła zbiorników procesowych znalazło zastosowanie w praktyce przemysłowej. W 2022 roku Autor uzyskał patent nr PL 241864 na przedstawioną technologię pt. „Stanowisko spawalnicze do wykonywania węzownicy na zewnętrznej powierzchni płaszcza zbiornika oraz sposób wykonania węzownicy na zewnętrznej powierzchni płaszcza zbiornika”.
- Autor udowodnił korzystny wpływ cieplnej obróbki pospawalniczej na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie i udarność złączy spawanych i odporność na korozję wżerową przez sterowanie zawartością ferrytu δ w mikrostrukturze spoin ze stali nierdzewnych.

Sekwencję badań własnych kończy podsumowanie i wnioski. Autor przedstawia wnioski poznawcze zgodne ze znaną do tej pory teorią oraz użytkowe. Opracowanie to dowodzi dojrzałości naukowej i dużej wiedzy praktycznej Doktoranta, a także jego zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W moim przekonaniu Autorowi udało się osiągnąć cel pracy, co potwierdza prawidłowość przyjętych założeń, odpowiednie zastosowanie naukowej metodyki badań i realizację praktyczną wykonanych eksperymentów.

3. Ocena końcowa

W pracy nie dostrzegłem błędów i uchybień w zakresie edycji i prezentacji wyników. Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Andrzeja Deca spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim ponieważ:

- sformułowano problem badawczy i określono jego cel,
- zaplanowano i zrealizowano badania stosując nowoczesne narzędzia naukowe według przyjętej metodyki badań, co dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta,
- zinterpretowano uzyskane wyniki i sformułowano wnioski na gruncie znanej teorii, co wskazuje na szeroką ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata,
- Doktorant osiągnął cel pracy, a uzyskane wyniki wnoszą oryginalny wkład naukowy i praktyczny w teorię i praktykę kształtowania mikrostruktury złączy spawanych ze stali AISI304L i AISI316L.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Andrzeja Deca pt.: „**Modelowanie mikrostruktury złączy spawanych ze stali AISI304L i AISI316L w aspekcie poprawy odporności korozyjnej zbiorników procesowych**” spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Andrzeja Deca do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej.

