

Warszawa, 14.07.2022

Dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. Uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Instytut Technik Wytwarzania
02-524 Warszawa, ul. Narbutta 85

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Kozłowskiego pod tytułem „Analiza parametrów próby spawalności stali konstrukcyjnych o grubości poniżej 30 mm w oparciu o wytyczne SEP 1390”

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Kierownika Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej z dnia 30.05.2022 zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej nr 18/2021/2022 z dnia 14.04.2022.

1. Tematyka rozprawy

Problematyka spawalności materiałów, a w szczególności stali konstrukcyjnych jest jednym z ważniejszych zagadnień w procesie projektowania konstrukcji spawanych. Spawalność materiałów decyduje bowiem o możliwości zaistnienia określonych procesów i zjawisk na etapie spawania, które umożliwiają utworzenie trwałego złącza charakteryzującego się wymaganymi właściwościami eksploatacyjnymi. Widać więc, że od spawalności materiałów zależy bezpośrednio trwałość eksploatacyjna konstrukcji spawanych. Z drugiej strony niedostateczna spawalność prowadzi może do powstawania niezgodności spawalniczych, zarówno na etapie procesu spawania czy także w okresie późniejszym, z których najbardziej niebezpieczną dla złącza jest groźba powstania pęknięć. Skutkować to może obniżeniem trwałości eksploatacyjnej złącza spawanego czy wręcz doprowadzić do jego przedwczesnego zniszczenia i innych czasami nawet katastrofalnych efektów obejmujących większe zespoły konstrukcji. Stąd problematyka spawalności materiałów i sposobów jej oszacowania jest ciągle jednym z najważniejszych zagadnień badawczych, które zasługują na analizę.

Zaproponowana w pracy tematyka badawcza związana z zagadnieniem spawalności stali konstrukcyjnych w powiązaniu z grubością elementów spawanych w oparciu o wytyczne próby SEP 1390 wydaje się zatem aktualna, zwłaszcza w kontekście rozszerzenia wyników badań na zakres grubości materiałów wykraczający poza ten ujęty w wymaganiach tej próby.

Celem naukowym pracy było zbadanie oraz analiza parametrów próby technologicznej służącej do oceny spawalności stali konstrukcyjnej na podstawie próby spawalności SEP 1390 dla grubości blachy poniżej 30 mm. Badania przeprowadzono wykonując napoiny na blachach

ze stali S355, które poddano następnie badaniom na maszynie wytrzymałościowej w próbie zginania w celu oceny i analizy rozwoju pęknięć w spoinie, SWC i materiale rodzimym.

Biorąc pod uwagę szeroki obszar potencjalnego zastosowania złączy spawanych ze stali konstrukcyjnych w wielu dziedzinach przemysłu, a także istotną rolę złączy spawanych w przenoszeniu obciążeń eksploatacyjnych można stwierdzić, że podjęte przez Autora zagadnienie badawcze wydaje się celowe oraz aktualne.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa liczy 134 strony i składa się z 13 rozdziałów, choć ostatni z nich liczy jedynie 3 akapity (kierunki dalszych badań) i w zasadzie nie powinien stanowić osobnego rozdziału. Rozprawę można podzielić na część opisową (literaturowo-przeglądową) oraz część badań własnych, głównie o charakterze eksperymentalnym. Rozdziały 11 i 12 obejmują analizę wyników badań oraz wnioski końcowe oraz propozycję kierunków dalszych badań (rozd. 13). Kończąca pracę Bibliografia liczy 97 pozycji, wśród których znajdują się 4 pozycje Autora. Dość duża część (ok. 30%) pozycji literaturowych pochodzi sprzed ponad 40 lat.

Część opisowa pracy skupia się na trzech zagadnieniach: charakterystyce stali konstrukcyjnych (rozd. 2), spawalności stali konstrukcyjnych i kwalifikowaniu technologii spawania (rozd. 3 i 4) oraz badaniach spawalności według próby SEP 1390 (rozd. 5). Każdy z rozdziałów zakończony jest podsumowaniem. Na ich podstawie Autor wyciągnął wniosek, że możliwe jest postawienie tezy, związanej z możliwością oceny spawalności stali konstrukcyjnych o grubościach poniżej 30 mm zgodnie z wytycznymi zawartymi w próbie SEP 1390.

W drugiej, własnej części badań Autor przedstawił cel pracy jakim było przeprowadzenie analizy parametrów, a raczej analiza parametrów próby technologicznej spawalności według SEP 1390 dla stali konstrukcyjnej (S355) o grubości poniżej 30 mm, nieujętej w wymienionej próbie SEP 1390 (wg zaleceń tej próby zakres grubości wynosi od 30 do 50 mm). Sformułowano tezę, która stwierdza, że właściwy dobór parametrów próby technologicznej do oceny spawalności według SEP 1390 umożliwi prawidłowe przeprowadzenie oceny spawalności materiałów w także w zakresie grubości 20 – 30 mm.

Następnie przedstawiony został zakres pracy związany z analizą parametrów próby SEP 1390, wykonaniem próbek do badań technologicznych, oprzyrządowania do badań wytrzymałościowych (zginanie trójpunktowe), przeprowadzeniem prób zginania przygotowanych próbek oraz doбором parametrów do badań dla obniżonej grubości blach w zakresie 20-30 mm (rozd. 7-9). Rozdział 10 zawiera zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla wszystkich próbek o różnych grubościach blachy, głównie w postaci tzw. kart badań próbek zawierających parametry próby, wykres z maszyny wytrzymałościowej, zdjęcia z badań penetracyjnych napoiny po zginaniu oraz zwięzłą ocenę wyników próby. W rozdziale 11 zamieszczono analizę otrzymanych wyników badań wraz z podsumowaniem, a w rozdz. 12 zawarto wypunktowane wnioski z pracy (sześć). Ostatni rozdział 13 dotyczy kierunków dalszych badań jakie można, czy należałoby przeprowadzić w ramach tej tematyki w celu jeszcze szerszej czy pełniejszej oceny spawalności stali na podstawie próby SEP 1390.

3. Ocena merytoryczna

Część literaturowo-przeglądowa jest dość zwięzła. Rozdział 2 poświęcony charakterystyce stali konstrukcyjnych przedstawia ogólną klasyfikację tych stali, czy wpływ różnych pierwiastków na właściwości stali, ale nie podaje żadnego przykładu zestawienia gatunków stali należących do tej grupy. Zamieszczone w dalszej części tego rozdziału definicje właściwości fizycznych, mechanicznych i cieplnych wydają się zbędne, ponieważ są powszechnie znane. Brakuje za to zestawienia gatunków tych stali, oznaczenia, składu chemicznego i właściwości mechanicznych.

W kolejnym podrozdziale Autor skupia się na spawaniu stali konstrukcyjnych, ale w kontekście spawalności – podając wzory na wyznaczenie temperatury podgrzewania wstępnego czy wzór na wyznaczenie równoważnika węgla CET oraz jego zależność od grubości materiału spawanego. Ten podrozdział moim zdaniem powinien zostać połączony z późniejszym rozdziałem poświęconym spawalności stali konstrukcyjnych.

Kolejny rozdział zawiera informacje związane z kwalifikowaniem technologii spawania, nawiązując do norm, wymiarów próbek czy badań nieniszczących oraz niszczących jakie przeprowadzane są w ramach kontroli złącza próbnego. W następnym podrozdziale (właściwości połączeń spawanych) omówione zostały główne rodzaje spoin i różnice w przenoszeniu obciążeń między spoinami czołowymi i pachwinowymi oraz przygotowanie krawędzi do spawania i czynniki jakie należy wziąć pod uwagę przy wyborze sposobu przygotowania rowka spawalniczego. Brakuje mi tu zamieszczenia choćby kilku rysunków obrazujących rodzaje spoin czy sposoby ukosowania krawędzi. Podrozdział opisujący zastosowanie stali konstrukcyjnych jest bardzo skromny. Ilość i rodzaj aplikacji tych stali w konstrukcjach spawanych w wielu gałęziach przemysłu jest olbrzymi, znacznie szerszy niż to co zostało zaprezentowane. Można było z powodzeniem zamieścić przykłady ze zdjęciami chociaż kilku konkretnych zastosowań tych stali w najczęściej spotykanych obszarach z przemysłu. Moim zdaniem rozdział 3 charakteryzuje się dość dużym poziomem ogólności – brakuje w nim tabel z oznaczeniami gatunków i właściwości stali konstrukcyjnych, praktycznie brak jest jakichkolwiek rysunków, schematów czy zdjęć przykładów aplikacji tych stali w przemyśle.

Rozdział 4 – jeden z głównych, opisujący spawalność stali konstrukcyjnych. Przedstawiono różne definicje spawalności oraz czynniki jakie na nią wpływają. Zamieszczono także metody oceny spawalności dzieląc je na symulacyjne, analityczne, technologiczne. W ramach metod symulacyjnych odniesiono się do programów symulacyjnych (Sysweld, Simufact welding, Adina), które wykorzystywane są do modelowania procesów spawania oraz symulatorów cykli cieplnych spawania. O ile te ostatnie wykorzystuje się do symulacji cyklu cieplnego spawania na próbkach materiału badanego, o tyle nie mogę zgodzić się ze stwierdzeniem, że można ocenić spawalność materiałów poprzez modelowanie za pomocą programów opartych na MES, które służą głównie do analizy pola temperatury i naprężeń w procesach spawania (ale tylko Sysweld i Simufact.Welding natomiast Adina jest nie jest programem dedykowanym do symulacji spawania).

W ramach metod analitycznych ocenę spawalności przeprowadza się w oparciu o tzw. równoważnik węgla. Wskazano, że istnieją różne warianty tego równoważnika w zależności od

Instytucji, która go wykorzystuje. Brakuje mi tutaj wskazania Autora, którą zależnością należałoby się posługiwać, jeśli mamy kilka do wyboru. Brakuje mi także wskazania w ramach metod analitycznych (teoretycznych) oceny spawalności na podstawie krzywych CTP-s dla danego materiału.

Trzecia grupa metod oceny spawalności to metody technologiczne służące głównie do oceny odporności złączy spawanych ze stali konstrukcyjnych na pęknięcia gorące i pęknięcia kruche. Autor, w ramach pęknięć gorących wymienił tylko nazwy tych prób technologicznych bez szerszego opisu. W przypadku pęknięć kruchych przedstawiono krótką charakterystykę kilku wybranych prób technologicznych i tu także brakuje mi choćby prostego schematu opisującego omawianą próbę. Dopiero w kolejnym podrozdziale skupiono się szerzej i opisano szczegółowo próbę Kommerela, która było podwaliną próby SEP 1390, będącą przedmiotem rozprawy. Rozdział 5 skupia się wyłącznie na charakterystyce próby SEP 1390, przedstawia zakres grubości stosowanych próbek oraz wymagane wielkości geometryczne (parametry) dla przeprowadzenia próby zginania, wymiary próbek oraz napoiny i jej geometrię, a także warunki przygotowania napoiny. Zamieszczono również przykładowe wizualizacje próbek po gięciu wraz z oceną przeprowadzenia próby, która bazuje na rozwoju pęknięć w trakcie zginania, które przechodzą ze spoiny do SWC i dalej do materiału rodzimego, gdzie mają zostać zatrzymane. Istotny w procesie oceny jest minimalny kąt gięcia jaki powinien być uzyskany dla danej grubości materiału. Odniesiono się także do charakteru przełomu jaki powstaje w próbce po całkowitym jej przelamaniu. Część opisową kończy podsumowanie, z którego Autor formułuje wstępnie tezę swojej rozprawy, związaną z możliwością oceny spawalności stali konstrukcyjnych na podstawie próby SEP 1390, ale w zakresie grubości 20 – 30 mm, który ta próba nie obejmuje. Brakuje mi tutaj próby odpowiedzi na pytanie, dlaczego próba spawalności SEP 1390 nie obejmuje grubości poniżej 30 mm. Pojawia się także pytanie, dlaczego Autor zdecydował się na rozszerzenie badań spawalności według próby SEP 1390 na mniejsze grubości, skoro jak zostało wcześniej przedstawione istnieje cała gama innych różnych prób technologicznych oceny spawalności stali konstrukcyjnych – chodzi o to jaka była geneza podjęcia decyzji o rozszerzeniu badań spawalności na podstawie próby SEP 1390.

Drobne uwagi jakie nasunęły mi się do tej części pracy dotyczą głównie uwag redakcyjnych:

- Strona 9 – „Najczęściej stosowanym materiałem do wytworzenia konstrukcji używane są stale konstrukcyjne”, (styl)
- Strona 14 – tytuł podpunktu 2.3 moim zdaniem nie powinien dotyczyć spawania, a spawalności bo do tego nawiązuje jego treść i generalnie powinien być włączony do rozdziału „Spawalność stali konstrukcyjnych”.
- Strona 18 – „spoiny czołowe są najczęściej wykonywane na grubość elementów łączonych” (styl)
- Strona 19 – „Spoiny pachwinowe to najczęściej wykonywane spoiny w konstrukcjach spawanych” – tak, ale tylko w przypadku nie przenoszenia dużych obciążeń, ponieważ rozkład naprężeń w takiej spoinie jest nierównomierny w przeciwieństwie do spoin czołowych

- Strona 21 – „aby spełniły wyginania stawiane konstrukcją” – powinno być „wymagania stawiane konstrukcjom”.
- Strona 27 – pod równaniem (3) „Jako kryterium przyjmuje się:” (styl) Jako kryterium czego przyjmuje się?
- Strona 27,28 i strona 15 – podano w sumie trzy różne wzory na równoważnik węgla (CET, Ceq, Cej). W takim razie, który z nich jest odpowiedni do analizy spawalności, z czego wynika wybór jednego z nich do obliczeń dla stali badanych w pracy.
- Strona 28, rozdz. 4.3.2 Metody analityczne – dlaczego pominięto w opisie metodę oceny spawalności na podstawie krzywych CTPs?
- Strona 29 – „Im większy współczynnik szerokości lica do głębokości warstwy, tym większa skłonność złącza do pęknięć gorących”. Współczynnik głębokości wtopienia, czyli stosunek szerokości lica do głębokości wtopienia, powinien być na poziomie co najmniej 1,5 lub większym, żeby krystalizacja przebiegała w kierunku lica, a nie w kierunku osi spoiny zabezpieczając przez pozostaniem kruchej eutektyki w osi spoiny. A więc skłonność do pęknięć na gorąco będzie większa im węższe będzie lico spoiny. Wzrost szerokości lica będzie sprzyjał krystalizacji w kierunku lica (prostopadle do linii wtopienia) i wyprowadzenia kruchej eutektyki do żuźla.
- Strony 29-31 – tutaj aż się prosi o schemat (rysunek) obrazujący daną próbę, a na stronach wcześniej przy próbach na gorąco pęknięcia są tylko wymienione ich nazwy.
- Strona 33 – „odprężanie w temp. Od 500°C do 600°C po spawaniu znacznie poprawia wyniki próby” (styl) – poprawia w jaki sposób?
- Strona 40 rozdz. 5.3 „Przebieg badania i wyniki” – Jaka jest prędkość gięcia w próbie SEP 1390?
- Strona 40, tabela V, ostatni wiersz – odległość podpór Lf powinna być chyba 280, a nie 208 mm.
- Strona 43 „postawić tezę, że dobór właściwych parametrów dla technologicznej próby ...” – właściwych parametrów to znaczy jakich?, co one powinny zapewnić, jakie kryteria o tym decydują, że będą właściwe?

Druga część pracy dotyczy badań własnych, w których Autor na wstępie przedstawił cel pracy, w postaci przeprowadzenia analizy parametrów próby technologicznej oceny spawalności stali konstrukcyjnych o grubości mniejszej niż 30 mm w oparciu o wytyczne próby SEP 1390.

Ponadto postawiono tezę, że właściwy dobór parametrów próby technologicznej do oceny tej spawalności umożliwi prawidłowe przeprowadzenie tej oceny dla materiałów o grubości w zakresie 20-30 mm. Tutaj moim zdaniem Autor powinien wskazać co rozumie przez sformułowanie właściwy dobór parametrów. Chodzi o to jakie kryteria powinny być przyjęte i spełnione, aby stwierdzić później, że ten dobór był właściwy.

W dalszej części przedstawiony został zakres pracy obejmujący początkowo analizę parametrów stosowanych w próbie spawalności wg SEP1390 dla zakresu grubości 30-50 mm, w dalszej kolejności przygotowanie próbek ze stali S355 o grubościach 20, 25 i 30 mm do

przeprowadzenia prób technologicznych, wykonanie oprzyrządowania, które umożliwi przeprowadzenie badań gięcia dla różnych parametrów próby, przeprowadzenie właściwych badań gięcia przygotowanych próbek oraz dobór parametrów do przeprowadzenia próby technologicznej w zakresie grubości blachy 20 -30 mm.

W ramach zaplanowanego eksperymentu badawczego (rozdz. 6) przygotowano serie próbek wyciętych ze stali S355J2+N o grubościach 20, 25 i 30 mm. Próbki wycinano wzdłuż kierunku walcowania blach, ale także w kierunku poprzecznym w celu porównania wyników. Na podstawie danych producenta wyznaczono równoważnik węgla dla badanej stali (różne wytopy). Brak jest jednak adnotacji z jakiego wzoru na równoważnik węgla korzystano.

W kolejnym podrozdziale omówiono stanowisko badawcze z oprzyrządowaniem umożliwiającym zmianę parametrów próby technologicznej oraz sposób przeprowadzenia badania (próby gięcia). Badane próbki oceniano na podstawie kąta gięcia, przy którym pojawiają się pęknięcia oraz kształt, kierunek i długość powstających pęknięć. Ocenę długości pęknięć przeprowadzono z wykorzystaniem badań penetracyjnych, które umożliwiają zobrazowanie pęknięć, które mogą nie do końca być widoczne gołym okiem. Ocenę danej próby przedstawiono jako wynik pozytywny, nieważny lub negatywny, przy czym Autor nie pokusił się o podanie tutaj jakie kryteria decydują o danym wyniku. Można się o tym zorientować dopiero później na podstawie opisów przeprowadzonego badania na kartach badań próbek.

Z analizy parametrów próby SEP 1390 dla próbek o grubości 30 do 50 mm wyznaczono zależność między średnicą trzpienia gnącego i rozstawu podpór od grubości próbki oraz zależność naprężeń rozciągających w próbce gięcia od grubości próbki. Z tej ostatniej zależności wynika, że jedynie przy grubości blachy 30 mm naprężenie rozciągające jest niższe od tego, jakie wyznaczone jest dla grubości 35, 40, 45 i 50 mm, co jak Autor zauważa może prowadzić do tego, że pęknięcia w próbce dla grubości 30 mm mogą nie rozwinąć się na tyle aby przeszły do materiału rodzimego co uniemożliwi uzyskanie pozytywnego wyniku próby. Jest to uwaga słuszna, ale brakuje mi to dalszej dyskusji Autora jakie należałoby podjąć działania, aby wyeliminować taką ewentualność. Z drugiej strony próba technologiczna SEP 1390 jest powszechnie znana i stosowana i jej Twórcy z pewnością dobrze ją przetestowali dla grubości 30 mm przy zmniejszonym naprężeniu rozciągającym w stosunku do wartości naprężenia dla większej grubości materiału. Trudno więc jest podważać wiarygodność parametrów podanych w wytycznych próby SEP 1390.

Kolejny rozdział nr 10 zawiera wyniki wszystkich przeprowadzonych w pracy badań poczynając od grubości 30 mm a kończąc na grubości 20 mm. Przy badaniach dla grubości 30 mm Autor zaproponował własne parametry próby, inne niż te opisane w teście SEP 1390. Zmniejszono średnicę trzpienia do 90 mm co zwiększyło naprężenie rozciągające do wartości identycznej z tymi jakie są dla większych grubości blach w próbce SEP 1390. W kolejnych przeprowadzonych próbach dla grubości 25 oraz 20 mm Autor przedstawił w tabelach zaproponowane parametry przeprowadzenia badań próbek dobierając je jak stwierdził na podstawie regresji liniowej zbioru parametrów stosowanych w próbce SEP 1390 dla grubości 30-50 mm. Tutaj nasuwa się pytanie czy jednak inne zestawy parametrów (inny metodyka doboru

tych parametrów) nie mogłyby być zastosowane i umożliwić uzyskanie wyników próby oznaczonych jako pozytywne.

Przedstawione na kartach badań wyniki próby technologicznej zawierają wszystkie niezbędne informacje o parametrach badania oraz zdjęcie powierzchni napoiny obrazujące powstałe pęknięcia. Brakuje mi tu jednak zdjęć makro pęknięć bez penetranta, który jednak zamazuje trochę obraz powierzchni czy też zdjęć bocznych płyt po gięciu dla pełnej dokumentacji z przeprowadzonej próby. W części prób zastosowano zmniejszenie średnicy trzpienia, które miało na celu zwiększenie naprężenia rozciągającego i przez to w pewnym sensie „ułatwienie” przejścia pęknięcia do materiału rodzimego i uzyskanie pozytywnego wyniku badań.

W rozdziale 10 „Analiza wyników badań” zestawiono wszystkie parametry prób przeprowadzonych dla blach o grubości 30, 25 i 20 mm. Jak pokazały wyniki badań, część prób uzyskała ocenę nieważny, zwłaszcza te dla grubości 20 mm (ponad połowa wszystkich próbek). W dalszej kolejności Autor komentuje wyniki badań po kolei dla grubości 30, 25 i 20 mm. W przypadku grubości 30 mm Autor wskazuje, że parametry stosowane w oparciu o wytyczne SEP 1390 dają często wyniki na granicy oceny pozytywnej i nieważnej i trudno jest ocenić, w którym miejscu zatrzymuje się pęknięcie - w SWC czy tylko w napoinie. Zaproponowanie zmniejszenia średnicy rolek podporowych miało na celu zwiększenie siły i naprężeń podczas zginania.

W przypadku próbek o grubości 25 mm, które nie są ujęte w teście SEP 1390, Autor wykonał serię 8 prób zginania przy różnych parametrach, ale dobranych tak aby utrzymać naprężenie rozciągające na poziomie identycznym jak przy próbie dla grubości 30 mm (525 MPa). Stwierdzono, że zmniejszenie średnicy do 75 mm zwiększa siłę nacisku i naprężenia co przełożyło się na uzyskanie pozytywnego wyniku testu dla wszystkich takich próbek. Z drugiej strony Autor stwierdza, że z całej przeprowadzonej serii badań dla grubości 25 mm pierwotnie przyjęte parametry (średnica trzpienia 75 mm, rozstaw podpór 130 mm i średnica podpór 100 mm) są najbardziej odpowiednie, ponieważ pozwalają uzyskać wynik pozytywny i utrzymać warunki zginania założone przez próbę SEP 1390. Stwierdzenie takie wydaje mi się jednak niezbyt przekonujące. Warunki zginania założone przez próbę SEP 1390 nie odnoszą się w ogóle do grubości 25 mm, ponieważ jej nie obejmują. Natomiast pozytywny wynik próby jak pokazują wyniki badań został uzyskany w każdej próbce o średnicy podpór 75 mm, czego nie można powiedzieć o każdej próbce ze średnicą podpór 100 mm.

Badania dla próbek o grubości 20 mm wykonano w serii 10 prób o różnych parametrach zginania. Podobnie starano się dobrać te parametry tak, aby uzyskać podobną wartość naprężenia rozciągającego jak w teście SEP 1390 (525 MPa). W tych badaniach ponad połowa prób okazała się nieważna, z uwagi na brak pęknięć w napoinie lub rozwijanie się drugiego pęknięcia od krawędzi płyty co zinterpretowano jako wada materiałów w pobliżu krawędzi. W zasadzie Autor nie dokonał tutaj próby jakiegokolwiek dyskusji na temat braku rozwinięcia się pęknięcia do SWC i nieuzyskania wyniku pozytywnego.

W zakresie wszystkich grubości próbek analizowano i porównano wyniki dla próbek wyciętych z arkusza wzdłuż i w poprzek kierunku walcowania (w sumie 21 serii) w celu oceny czy ma on wpływ na wynik badań. Ustalono, że przy próbkach wyciętych prostopadłe do

kierunku walcowania powstaje mniej pęknięć w napoinie, ale nie można na tej podstawie określić jak kierunek walcowania wpływa na wartość siły przy zginaniu. Ponownie, brakuje mi tutaj dyskusji po stronie Autora mającej na celu próbę wyjaśnienia powstania większej liczby pęknięć w napoinie próbki wyciętej prostopadłe do kierunku walcowania.

Ostatnim elementem analizy wyników była próba określenia wpływu średnicy podpór na występowanie pęknięć. Stwierdzono jednoznacznie, że zmniejszenie średnicy podpór zwiększa zarejestrowaną siłę o 20 do 30% i sprzyja występowaniu pęknięć przy grubościach 25 mm oraz zwiększa siłę o 5-8% przy grubościach 20 mm. Nasuwa się pytanie czy nie powinno się dobrać parametrów próby w taki sposób, aby właśnie zmniejszać średnicę podpór dla zapewnienia pozytywnego wyniku próby technologicznej. Tutaj także brakuje mi szerszej dyskusji Autora na ten temat – np. co może oznaczać wzrost siły podczas próby przy stosowaniu mniejszych średnic podpór.

W ostatnim podrozdziale analizy wyników Autor przedstawił podsumowanie badań. Stwierdził, że uzyskane wyniki pozwalają na rozszerzenie zakresu próby spawalności SEP 1390 dla grubości materiałów 25 i 20 mm. Dalej Autor stwierdza, że dla grubości 30 mm parametry z wytycznych SEP 1390 są niejednoznaczne i powinny być zmienione np. na te zaproponowane w pracy dla tej grubości. Tutaj można zadać pytanie czy duża liczba nieważnych prób technologicznych dla grubości 20 mm nie prowadzi także do uzyskiwania niejednoznacznych wyników, a przez to nie pozwala uzyskać pewności co do rozszerzenia zakresu testu SEP 1390 właśnie na grubość 20 mm. W końcowym podsumowaniu Autor jednoznacznie stwierdza, że podane w tabeli XXVI parametry umożliwią przeprowadzenie próby SEP 1390 z wynikiem pozytywnym dla grubości materiału od 20 do 30 mm. Parametry te niejako wpisują się w rozszerzenie liniowej zależności średnicy trzpienia oraz rozstawu podpór od grubości materiału z zakresu 30-50 mm na zakres 20-50 mm.

Rozdział 10 zawiera sześć wypunktowanych wniosków końcowych z pracy. Wskazują one głównie parametry jakie należy zastosować zgodnie z wytycznymi próby SEP 1390, aby uzyskać pozytywny wynik próby dla grubości 20, 25 i 30 mm. Autor zwraca uwagę na właściwy dobór parametrów, które np. zwiększają czułość badania. We wniosku 5 Autor zaleca przeprowadzenie próby zginania aż do kąta 90 stopni, co ma również zwiększyć czułość badania. Brakuje mi tu wyjaśnienia co Autor rozumie przez czułość badania, jakie parametry i w jaki sposób na nią wpływają.

Ostatni rozdział związany z kierunkami dalszych badań zawiera 3 akapity i moim zdaniem powinien być połączony z wnioskami końcowymi. Autor wskazuje tu na dalsze badania spawalności materiałów o jeszcze mniejszych grubościach, czy materiałów o wyższej wytrzymałości na rozciąganie. Postuluje także analizę wpływu zmian składu chemicznego materiału na łatwość i propagację pęknięć. W moim odczuciu należałoby rozszerzyć badania na inne gatunki stali konstrukcyjnych, aby potwierdzić (albo wykluczyć) możliwość pełnego rozszerzenia próby SEP 1390 na grubości blach poniżej 30 mm dla większej grupy stali konstrukcyjnych poza badaną S355.

Oprócz przedstawionej powyżej oceny zaprezentowanego materiału, lektura tej części pracy nasunęła mi także szereg pytań i uwag związanych z pracą:

- Strona 45, „Maksymalna wartość równoważnika CEV nie może być wyższa, dla tej stali niż 0,45%” – według którego z omawianych wcześniej wzorów policzono równoważnik węgla?
- Strona 52, na samym dole – wyniki próby. Jakie przyjęto kryteria zakwalifikowania próby do jednego z przedstawionych wyników. Jaka jest różnica między wynikiem nieważnym a wynikiem negatywnym?
- Strona 56, ostatni akapit – naprężenia w próbie SEP 1390 dla grubości 30 mm są inne niż dla większych grubości (467 MPa w przeciwieństwie do 525 MPa). Z czego to może wynikać? Próba SEP 1390 jest powszechnie uznana i stosowana, dlaczego więc poddawana jest przez Autora wątpliwość uzyskiwania negatywnych wyników przy niższym naprężeniu dla grubości 30 mm?
- Strona 57, tabela XV, Autor zaproponował inne swoje parametry próby dla materiałów o grubości 30 mm. Z czego wynikało przyjęcie takich, a nie innych wartości tych parametrów (średnica trzpienia i rozstaw podpór), dlaczego zmieniano tylko średnicę podpór, a nie zmieniano pozostałych parametrów? Jaka była prędkość gięcia?
- Strona 113, „Dodatkowo przeprowadzono analizę wyników w celu określenia optymalnej, ze względu na powstawanie pęknięć, średnicy trzpienia” Czy przeprowadzono w pracy optymalizację parametrów próby z zastosowaniem metod optymalizacji, czy też arbitralnie uznano, że dane parametry są optymalne (i na jakiej podstawie?)
- Strona 114, „Próbki wykonywane zgodnie z wytycznymi SEP 1390 bardzo często dają wyniki na pograniczu wyniku pozytywnego i próby nieważnej...” Na jakiej podstawie Autor formułuje takie stwierdzenie?
- Strona 115, akapit „Porównując próby 2.1 i 2.2 między sobą można uznać, że parametry badania zostały dobrane prawidłowo ... Uzyskany nieważny wynik dla próby 2.1 ma związek ze szczególnymi właściwościami materiału, z którego została pobrana próbka” Proszę o wyjaśnienie o jakie szczególne właściwości próbki 2.1 chodzi, że akurat uzyskano dla niej wynik nieważny. Przecież wszystkie próbki zostały wykonane z tego samego materiału więc mają podobne właściwości.
- Strona 119 rozdz. 11.4. „dla próbek ze stali pobranych w poprzek kierunku walcowania powstaje mniej pęknięć w napoinie”. Dlaczego na podstawie tej informacji nie można wyciągnąć wniosku o wpływie kierunku walcowania na wynik próby czy siłę przy zginaniu. Co w takim razie spodziewano się uzyskać podczas próby gięcia próbek wyciętych w kierunku wzdłużnym i poprzecznym? Jakie wyniki umożliwiłyby stwierdzenie, że kierunek walcowania ma wpływ na uzyskiwane wyniki w próbie technologicznej?
- Strona 120, rozdz. 11.5, Autor stwierdza na podstawie wyników, że zmniejszenie średnicy podpór wpływa na maksymalną siłę zginania – następuje wzrost siły od kilku do nawet 20-30% dla grubości 25 mm. Czy wzrost siły zginania wpływa także na zwiększenie liczby pęknięć w napoinie i SWC? Jaka jest tutaj zależność.

- Strona 121, „Należy pamiętać, że w każdym materiale, występuje segregacja pierwiastków stopowych oraz zanieczyszczenia, co wpływa miejscowo na właściwości mechaniczne materiału i trudno jest przewidzieć ostateczny wynik próby”. Na tej zasadzie można by stwierdzić, że w jakichkolwiek innych badaniach trudno jest przewidzieć wynik próby bo występuje segregacja pierwiastków albo jeszcze jakieś inne rzeczy. Dlatego przeprowadza się badania na odpowiedniej liczbie próbek i stosuje się odpowiednie metody statystyczne opisu wyników, które pozwalają z dużym prawdopodobieństwem zaakceptować uzyskane wyniki jako poprawne.
- Strona 124, wniosek 1 – „właściwy dobór parametrów próby ... umożliwa ...” Co to znaczy właściwy dobór? Chyba powinny być tutaj przyjęte jakieś kryteria, które po spełnieniu pozwolą na takie stwierdzenie.
- Strona 124, wniosek 2 – „zwiększa się przez to czułość badania dla materiałów o grubości 30 mm” . Co to jest czułość badania i co na nią wpływa?
- Strona 124, wniosek 3 – Zastosowanie trzpienia o średnicy $D=75$ mm i rozstawu podpór 130 mm dla materiału o grubości 25 mm pozwala uzyskać wynik pozytywny. Zgadza się, ale także dla innych parametrów przy tej grubości materiału także uzyskiwano wynik pozytywny np. $D=70$ mm, $L=130$ mm, czy dla $D=70$ mm, $L=105$ mm.
- Strona 124, wniosek 4 – tutaj także dla innych parametrów np. $D=50$ mm/ $L=100$ mm uzyskano wynik pozytywny. Dlaczego więc Autor wskazuje tylko na jedne wybrane parametry, które dają wynik pozytywny?
- Strona 124, wniosek 5 – „Dla materiałów z przedziału 20-30 mm zaleca się przeprowadzanie próby zginania aż do osiągnięcia kąta 90 stopni, dla zapewnienia odpowiedniej czułości badania”. Na jakiej podstawie Autor formułuje takie zalecenie i co oznacza sformułowanie odpowiednia czułość badania?
- Strona 125, rozdz. 13 „przeprowadzenie analizy wpływu zmian składu chemicznego materiału na łatwość powstawania i propagacji pęknięć”. W jakim celu? Przecież skład chemiczny materiału wpływa bezpośrednio na spawalność poprzez choćby równoważnik węgla – jest tam ujęty.

Pozostałe błędy napotkane w pracy:

- Strona 44, pierwsze zdanie „Celem rozprawy ... było przeprowadzenie analizy parametrów...” (styl) – chyba raczej powinno być „Celem rozprawy ... była analiza parametrów ..”
- Strona 47, Tabela XI – brak danych CEV i właściwości mechanicznych (brak ostatniego wiersza).
- Strona 49 na samym dole „Do przeprowadzenie prób ...oprzyrządowanie umożliwiające dowolne ustawienie odległości między podporami ...” (styl) Chyba nie dowolne, bo wg rys. 12 mocowanie jest na otworach, które wykonane są z określonym odstępem.
- Strona 116, „Próbka została poprana...” – została pobrana (gramatyka)
- Strona 118 „Dla próby 3.7 średnica podpór wynosił” – wynosiła, „Zmiana średnicy trzpienia gnącego zwiększyły naprężenia” – zwiększyła

- Strona 119, rozdz. 11.4, „wpływa na uzyskanie wyników zginania” (Styl)
- Strona 121, „Proponowane parametry dla przeprowadzenia próby SEP 1390 w rozszerzonym zakresie grubości od 20 do 50 mm zostały przedstawione ...” Powinno być od 20 do 30 mm, bo tylko takie były w pracy badane.
- Strona 122, rys. 32 jest praktycznie powieleniem rys. 5 i rys. 7.
- Strona 125, rozdz. 13 „Przeprowadzenie analizy wpływu zmian składu chemicznego materiału na łatwość powstawania i propagacji pęknięć” - brak orzeczenia w zdaniu (gramatyka)

Do najważniejszych osiągnięć w pracy zaliczyć należy:

- Przeprowadzenie dużej liczby prób technologicznych spawalności opartej na próbie SEP 1390, dla grubości 20, 25 i 30 mm, a w szczególności dla grubości poniżej 30 mm, które nie są uwzględnione w próbie SEP 1390.
- Analiza zachowania się stali 355JR z napoiną w próbie gięcia przy różnych parametrach geometrii gięcia.
- Wykonanie oprzyrządowania zapewniającego możliwość łatwej zmiany parametrów geometrycznych w próbie gięcia.
- Wykazanie, że istnieją określone zestawy parametrów w próbie gięcia umożliwiające uzyskanie pozytywnego wyniku badań dla grubości 20 i 25 mm,
- Wykazanie, że dla grubości 30 mm, możliwe jest zastosowanie innych parametrów gięcia niż te zawarte w wytycznych próby SEP 1390 i uzyskanie dla nich pozytywnych wyników próby.

Zamieszczone powyżej uwagi mają w dużej mierze charakter dyskusyjny lub wyjaśniający. Ogólnie pracę oceniam pozytywnie, choć zauważam pewne niedociągnięcia. Uważam, że tematyka pracy stanowi wartościowy materiał, który może poszerzyć wiedzę w zakresie technologicznych badań spawalności na podstawie próby SEP 1390.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim zawarte w ustawie o stopniach i tytułach naukowych. Jej tematyka mieści się w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna. Stanowi rozwiązanie zagadnienia o charakterze naukowym. Postawiony w pracy cel został osiągnięty, a zakres pracy zrealizowany. Autor pracy wykazał się umiejętnością prowadzenia samodzielnej pracy badawczej. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie pracy do obrony publicznej.

