

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Joanna Wyciślik - Sośnierz

pod tytułem:

**Wpływ parametrów technologicznych spawania
laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję na
wielkość emisji pyłu, jego skład chemiczny i morfologię**

przygotowanej pod kierunkiem:

prof. dr hab. inż. Janusz Adamiec

promotor pomocniczy:

dr inż. Michał Urbańczyk

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.).

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

- 1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- 2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
- 3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Uwagi ogólne

Opiniowana praca powstała pod opieką prof. dr hab. inż. Janusza Adamca na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej w Katedrze Metalurgii i Recyklingu. W kierowanej przez Profesora Katedrze od lat prowadzone są badania aplikacyjne nad rozwiązaniami materiałowymi i technologiami na potrzeby przemysłu. Recenzowana praca doskonale wpisuje w ten nurt prac badawczych – analizę nowych rozwiązań w obszarze innowacyjnych technologii spajania tworzyw metalicznych.

Współczesne konstrukcje stalowe powstają z elementów, które łączone są ze sobą głównie w procesie spawalniczym. Jednakże spawanie i procesy pokrewne należą do grupy procesów wytwórczych oddziałujących niekorzystnie na środowisko. Jest to związane z emisją dymu spawalniczego (aerozol dwufazowy kondensacyjny), który jest mieszaniną cząstek stałych (pyłu oraz gazów) i powoduje wystąpienie u pracowników szeregu negatywnych skutków zdrowotnych. Pył spawalniczy został sklasyfikowany zgodnie z wytycznymi Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem do grupy czynników o udowodnionym działaniu kancerogennym. Ilość powstających zanieczyszczeń uzależniona jest od metody spawania, rodzaju materiału podstawowego i materiałów dodatkowych oraz parametrów technologicznych procesu spawania.

W przemyśle dominującą technologią łączenia jest spawanie łukowe, dlatego też dotychczasowe badania emisji zanieczyszczeń obejmowały głównie ten proces. Jednakże ze względu na coraz większe zastosowanie technik laserowych i hybrydowych (łukowo-laserowych) pojawiła się konieczność rozszerzenia zakresu badań w tym obszarze technologicznym. Istotne jest określenie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi procesów spawania laserowego i hybrydowego wybranych gatunków stali (w tym w szczególności stali odpornych na korozję), a wielkością emisji pyłu całkowitego, jego składem chemicznym, fazowym i morfologią cząstek.

Spodziewane do uzyskania wyniki badań pozwoliłyby projektantom i technologom na wybór procesu charakteryzującego się mniej szkodliwym wpływem na środowisko oraz zdrowie pracowników.

Z przeprowadzonej przez Doktorantkę analizy literatury wynika, że brak jest pełnych informacji odnośnie do zagrożeń związanych z emisją pyłu spawalniczego podczas procesu spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych.

Doktorantka postawiła sobie za cel wyznaczenie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi spawania laserowego i hybrydowego najczęściej używanych gatunków stali austenitycznych, a wielkością emisji pyłu, jego składem chemicznym, fazowym i morfologią cząstek.

Realizując ten cel Doktorantka opracowała metodykę oceny zagrożenia związanego z powstawaniem pyłu spawalniczego oraz opracowała wytyczne technologii spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych w aspekcie ochrony środowiska i zdrowia pracowników.

Recenzowana praca dotyczy, moim zdaniem, zagadnień o istotnej wartości poznawczej i przede wszystkim aplikacyjnej. Podjęto w niej bardzo istotny z punktu widzenia technologii materiałów wątek badawczy – doskonalenie procesów spawania w aspekcie ochrony zdrowia pracowników.

Uwagi redakcyjne

Recenzowana dysertacja jest kompletna i napisana w sposób komunikatywny. Ma klasyczny układ i została podzielona na następujące główne rozdziały: *Analiza stanu zagadnienia; Teza, cel i zakres pracy; Próby technologiczne procesu spawania; Określenie wielkości emisji zanieczyszczeń pyłowych powstałych w procesie spawania; Charakterystyka zanieczyszczeń pyłowych powstałych w procesie spawania; Analiza wyników badań; Wytyczne i zalecenia w aspekcie zdrowia i bezpieczeństwa pracowników dla spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję; Wnioski.*

W rozdziale *Analiza stanu zagadnienia* Doktorantka przedstawiła charakterystykę stali odpornych na korozję, aspekt metalurgiczny procesów ich spawania oraz charakterystykę pyłów powstających podczas spawania. Następnie Autorka dysertacji sformułowała tezę, cel i zakres badań oraz, w kolejnym rozdziale, próby technologiczne procesu spawania wybranych stali austenitycznych. Kolejne rozdziały Doktorantka poświęciła opisowi emisji zanieczyszczeń pyłowych charakteryzując ich skład chemiczny, fazowy i morfologię cząstek. W oddzielnych rozdziałach Autorka rozprawy dokonała analizy otrzymanych wyników, po czym sformułowała wytyczne i zalecenia odnośnie do parametrów technologii spawania laserowego i hybrydowego w kontekście ochrony zdrowia i bezpieczeństwa pracowników. Konkluzje i podsumowanie Doktorantka przedstawiła w rozdziale *Wnioski*.

Pracę czyta się z dużym zainteresowaniem tym bardziej, że jest ona napisana poprawnie pod względem językowym i praktycznie nie zawiera błędów redakcyjnych. Na uwagę zasługują trafnie dobrane i aktualne powołania literaturowe (161 pozycji).

Teza, cel i zakres pracy

Z przeprowadzonej przez Doktorantkę analizy aktualnego stanu wiedzy związanego z tematem pracy wynika, że brak jest „szczegółowych danych dotyczących wskaźników emisji pyłu powstającego podczas spawania laserowego i hybrydowego oraz informacji na temat wpływu parametrów technologicznych procesu spawania laserowego i hybrydowego na wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych, na ich skład chemiczny i morfologię cząstek”.

Doktorantka założyła, że określenie tych zależności dla wybranych gatunków stali odpornych na korozję pozwoliłoby na wskazanie sposobu zmniejszenia obciążenia środowiskowego związanego ze stosowaniem procesów spawania laserowego i hybrydowego w różnych gałęziach przemysłu.

Fakt ten był bezpośrednią inspiracją Autorki rozprawy do sformułowania następującej tezy badawczej:

„Energia liniowa wiązki laserowej oraz układu hybrydowego (laser + MIG) podczas spawania stali o strukturze austenitycznej decyduje o wielkości emisji pyłu, jego składzie chemicznym i morfologii”.

Weryfikacja postawionej tezy oparta została na realizacji trzech rodzajów celów:

- Cel metodyczny

Dotyczy opracowania metodyki oceny jakościowej i ilościowej pyłu powstającego podczas spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych.

- Cel poznawczy

Zakłada określenie wielkości emisji pyłu podczas spawania laserowego i hybrydowego wybranych gatunków stali austenitycznych oraz oznaczenie jego składu chemicznego, fazowego i morfologii cząstek. Ponadto wyznaczenie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych, a wielkością emisji pyłu, jego składem chemicznym i morfologią.

- Cel użyteczny

Zaaplikowanie uzyskanych wyników badań do opracowania zaleceń spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych przy założeniu uzyskania połączenia spełniającego wymagania poziomu jakości B oraz redukcję emisji pyłu.

Jako efekt końcowy - opracowanie wytycznych technologii spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych w aspekcie ochrony środowiska i zdrowia pracowników.

Koncepcja dowodzenia tezy przyjęta przez Doktorantkę zakładała przeprowadzenie badań obejmujących kilka etapów:

- dobór materiałów do badań z grupy stali odpornych na korozję oraz przeprowadzenie prób technologicznych spawania łukowego, laserowego i hybrydowego w celu doboru parametrów technologicznych,
- uzyskanie połączenia spełniającego wymagania poziomu jakości B według norm, przeprowadzenie badań laboratoryjnych i analiza uzyskanych wyników dla wybranych procesów spawania łukowego, laserowego i hybrydowego mających na celu określenie wielkości emisji pyłu całkowitego, oznaczenie składu chemicznego i fazowego pyłu oraz analizę morfologii cząstek pyłu,
- analiza wyników badań pod kątem weryfikacji postawionej tezy badawczej.

Analiza pyłu spawalniczego została przeprowadzona na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym wyposażonym w komorę pyłową. Umożliwiło to określenie wielkości emisji pyłu całkowitego.

Uważam, że zaplanowane do wykonania przez Doktorantkę badania dostarczyły spójnych informacji, które pozwoliły na realizację celów pracy i rzetelne zweryfikowanie postawionej tezy. Chciałbym podkreślić duże znaczenie zarówno poznawcze jak i przede wszystkim praktyczne uzyskanych wyników badań.

W podsumowaniu stwierdzam, że cel i zakres opiniowanej pracy w pełni spełniają wymagania stawiane badaniom będącym przedmiotem rozpraw doktorskich.

Ocena rozprawy doktorskiej

Zagadnienia dotyczące wpływu parametrów technologicznych procesu spawania laserowego i hybrydowego na wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych i jego skład chemiczny, fazowy i morfologię cząstek nie były dotychczas szczegółowo opisane w literaturze. Istniejące dane dotyczą jedynie pojedynczych wskaźników dla tych procesów

spawania. Autorka dysertacji bardzo dobrze zidentyfikował istniejący problem badawczy nakierowany na uzupełnienie wiedzy związanej z ulepszeniem technologii spawania laserowego i hybrydowego mającej na celu zmniejszenie zagrożenia zdrowia i środowiska pracy wywołowanego przez emisję pyłów spawalniczych.

Autorka rozprawy poprawnie postawiła tezę i sformułowała cele badawcze oraz dobrała techniki badawcze adekwatnie do zaplanowanych zadań. Z lektury doktoratu można wywnioskować, że Doktorantka wykonała eksperymenty w większości samodzielnie, a uzyskane wyniki badań poddała szczegółowej analizie konfrontując je z aktualnym stanem wiedzy. Dowodzi to, że mgr inż. Joanna Wyciślik-Sośnierz posiadała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Z kolei realizując zadania badawcze Doktorantka wykazała, że posiada niezbędną wiedzę w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa, która skutecznie pozwoliła Jej na realizację planu badawczego.

Istotnym, z punktu widzenia praktycznego, jest opracowanie przez Doktorantkę metodyki oceny zagrożenia związanego z powstawaniem pyłu spawalniczego. Opracowana metodyka zapewnia uzyskanie pełnej charakterystyki pyłu obejmującej wielkość emisji, jego skład chemiczny i fazowy oraz morfologię cząstek pyłu. Umożliwiło to przeprowadzenie oceny zagrożenia związanego z powstawaniem pyłu podczas spawania laserowego, hybrydowego i łukowego wybranych do analizy stali 1.4301 (nierdzewna) i 1.4828 (żaroodporna).

Wartościowym wynikiem badań w kontekście aplikacyjnym jest wykazanie przez Autorkę rozprawy, na podstawie przeprowadzonych badań, że spawanie łukowe metodą MIG charakteryzuje się największą emisją pyłu w porównaniu do spawania laserowego i hybrydowego. Doktorantka dowiodła również, że wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych podczas spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję zależy od energii liniowej procesu (mocy wiązki laserowej i prędkości spawania oraz, w przypadku spawania hybrydowego, również od prędkości podawania drutu).

Warte podkreślenia jest wskazanie przez Doktorantkę, że wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych podczas spawania laserowego zależy również od techniki spawania – spawanie laserowe z jeziorkiem charakteryzuje się mniejszą emisją pyłu całkowitego w porównaniu do techniki spawania z oczkiem.

Bardzo wartościowym wątkiem dysertacji jest analiza emisji do środowiska pyłu zawierającego przede wszystkim związki chromu(VI) i niklu - substancji o udowodnionym działaniu rakotwórczym. Zawartość chromu(VI) w pyłe w zależności od energii liniowej była najmniejsza w przypadku spawania hybrydowego.

Z kolei najmniejszą emisją tlenku chromu(III,) żelaza(II) i spinelu Cr_2FeO_4 charakteryzowały się procesy spawania laserowego techniką z oczkiem i jeziorkiem, natomiast największa emisja wystąpiła podczas spawania łukowego. Na wielkość emisji tych związków wpływ mają parametry technologiczne - moc wiązki laserowej i prędkość spawania oraz w przypadku spawania hybrydowego także prędkość podawania drutu.

Równie istotnym badaniem, z punktu widzenia określenia szkodliwości pyłu spawalniczego pochodzącego ze spawania hybrydowego i laserowego, jest analiza wielkości jego cząstek która wykazała, że ponad 20% cząstek pyłu wchodzi w skład frakcji respirabilnej i tchawicznej stanowiących największe zagrożenia dla zdrowia (tj. o wymiarze poniżej 10 μm).

Bardzo cennym rezultatem aplikacyjnym prowadzonych przez mgr inż. Joannę Wyciślik-Sośnierz badań jest propozycja umieszczenia w protokole kwalifikowania technologii spawania - *WPQR (Welding Procedure Qualification Record)* informacji odnośnie do wielkości emisji pyłu w powiązaniu z parametrami technologicznymi spawania. Ma to istotne znaczenie ponieważ na podstawie tego protokołu opracowywana jest Instrukcja Technologiczna Spawania (*WPS – Welding Procedure Specification*), która przekazywana jest spawaczom. Umieszczenie tych informacji pozwoli podnieść świadomość inżynierom technologom zagrożeń związanych z oddziaływaniem pyłów spawalniczych na zdrowie i bezpieczeństwo spawaczy.

W efekcie końcowym Doktorantka przyjmując jako kryteria uzyskanie połączenia spełniającego wymagania poziomu jakości B oraz redukcję emisji pyłu, opracowała wytyczne i zalecenia w aspekcie zdrowia i bezpieczeństwa pracowników dla spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że zaplanowany przez Doktorantkę program badawczy został w pełni zrealizowany. Dogłębnie zweryfikowała hipotezę badawczą oraz osiągnęła cele pracy (metodyczny, poznawczy i użytkowy).

Moim zdaniem rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Wyciślik-Sośnierz stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego o charakterze aplikacyjnym, bardzo dobrze osadzonego w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Uzyskane przez Doktorantkę wyniki badań wnoszą nową wiedzę w obszarze inżynierii spawania stali austenitycznych.

Uwagi

W rozdziale 7.1. „Analiza wyników badań” Doktorantka przypomina założenie, że „w pracy przyjęto, że energia liniowa wiązki laserowej oraz układu hybrydowego (laser + MIG) podczas spawania stali o strukturze austenitycznej decyduje o wielkości emisji pyłu, jego składzie chemicznym i morfologii”. Ponadto odnosi się do definicji energii liniowej stwierdzając, że „przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, że energia liniowa nie jest pojęciem jednoznacznym. Jest to wielkość łącząca ze sobą podstawowe parametry procesu – natężenie prądu spawania, napięcie łuku i prędkość spawania. Energia liniowa (EI) często w literaturze jest określana jako ilość wprowadzonego ciepła (Q) na jednostkę długości, jednak między tymi dwoma wielkościami istnieją pewne różnice”.

Skoro energia liniowa spawania nie jest jednoznacznym pojęciem (w istocie wieloparametrowym) to sformułowana teza badawcza (energia liniowa wiązki laserowej oraz układu hybrydowego decyduje o wielkości emisji pyłu, jego składzie chemicznym i morfologii) wydaje się oczywista. W tym kontekście, moim zdaniem, w niniejszej rozprawie rezygnacja z tak sformułowanej hipotezy badawczej w niczym nie umniejszyłoby wartości naukowej dysertacji.

Badając wpływ gatunku materiału na wielkość emisji pyłu spawalniczego (rozdział 5.3.1) Doktorantka stwierdziła, że „spawanie łukowe i hybrydowe stali 1.4301 charakteryzowało się większą emisją pyłu w porównaniu do spawania stali 1.4828, natomiast w przypadku spawania laserowego obiema technikami wyższa emisja pyłu wystąpiła dla stali 1.4828”.

Jak zatem wytłumaczyć różnice w ilości emitowanego pyłu pomiędzy badanymi gatunkami stali w kontekście ich różnicy w składzie chemicznym dla poszczególnych technik spawania?

Analizując skład chemiczny pyłu spawalniczego (rozdział 6.1.4) Doktorantka zauważyła „większą zawartość chromu w pyłe emitowanym podczas spawania laserowego techniką z jeziorkiem, natomiast większa zawartość żelaza, niklu i krzemu wystąpiła dla techniki spawania laserowego z oczkiem”.

Czy Doktorantka mogłaby podać fizyczną interpretację zaobserwowanych różnic pomiędzy składem chemicznym pyłu podczas spawania laserowego z jeziorkiem i z oczkiem?

Analiza uzyskanych wyników badań spawania laserowego (rozdział 6.1.4) doprowadziła Autorkę dysertacji do wniosku, że „dla spawania laserowego zarówno techniką z oczkiem, jak i z jeziorkiem, wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej zwiększa się udział masowy chromu i manganu, natomiast zmniejsza się udział żelaza i niklu”. Dlaczego niezależnie od techniki spawania laserowego wzrost mocy wiązki lasera powoduje różnice (selektywność) emisji poszczególnych pierwiastków?

Doktorantka przeprowadziła próby technologiczne spawania łukowego, laserowego i hybrydowego (laser + MIG) na zrobotyzowanym, laboratoryjnym stanowisku znajdującym się w Laboratorium Technologii Laserowych Łukasiewicz-Centrum Spawalnictwa Ł-GIT w Gliwicach przy stałych parametrach ciśnienia atmosferycznego, temperatury otoczenia i wilgotności powietrza.

Czy, i ewentualnie jak, zdaniem Doktorantki, w warunkach przemysłowych zmiana wilgotności powietrza (suche, bardzo wilgotne) może wpłynąć na wielkość emisji pyłu spawalniczego - zważywszy na zależność pomiędzy parowaniem (prężnością par) a wilgotnością powietrza?

3. Wniosek końcowy

Bardzo dobrze oceniam pracę doktorską mgr inż. Joanny Wyciślik-Sośnierz. Autorka pracy wybrała bardzo interesujący problem badawczy, umiejętnie sformułowała tezę, cel i zakres pracy oraz wnikliwie przeprowadziła analizę otrzymanych wyników badań pod kątem weryfikacji postawionej tezy badawczej.

Uzyskane przez Autorkę dysertacji wyniki badań dowiodły, że energia liniowa łuku spawalniczego wpływa na wielkość emisji pyłu, jego skład chemiczny i morfologię cząstek. Przeprowadzone przez Doktorantkę badania posłużyły również do opracowania wytycznych i zaleceń w aspekcie zdrowia i bezpieczeństwa pracowników dla spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję.

Szczegółowa analiza rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Wyciślik-Sośnierz pozwala stwierdzić, że:

- Zrealizowane przez Doktorantkę badania, które pozwoliły na określenie zależności pomiędzy energią liniową spawania, a emisją pyłu spawalniczego dowodzą, że posiadała Ona umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

- Umiejętność krytycznej analizy otrzymanych przez Doktorantkę wyników badań pod kątem ich wykorzystania w praktyce składa się na dużą wartość badawczą recenzowanej rozprawy. Dowodzi to, że Autorka rozprawy posiada wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.
- Doktorantka podjęła się rozwiązania oryginalnego problemu badawczego, a uzyskane wyniki przyczyniły się do poszerzenia wiedzy w zakresie aspektów bezpieczeństwa prowadzenia procesów spawania. Przedstawione w rozprawie doktorskiej badania wnoszą nową wiedzę w obszarze inżynierii spawania.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora mgr inż. Joannie Wyciślik-Sośnierz w dziedzinie nauk Inżynieryjno-Technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Chciałbym podkreślić, że uzyskane w niniejszej rozprawie wyniki badań stanowią oryginalny wkład do rozwoju wiedzy w obszarze technologii spawania. Uważam, że Doktorantka wykazała nieprzeciętną zdolność do zidentyfikowania i skutecznej realizacji ambitnego celu badawczego.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Joanny Wyciślik-Sośnierz pt. „Wpływ parametrów technologicznych spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję na wielkość emisji pyłu, jego skład chemiczny i morfologię”.