

## **R E C E N Z J A**

rozprawy doktorskiej pt.:

### **„Analiza pola temperatur i kształtu strefy przetopieniowej w procesie spawania laserowego”**

Autor: mgr inż. **Rafał Banak**

#### **Uwagi wstępne**

We wszystkich dziedzinach gospodarowania obowiązują z jednej strony: rozsądna ekonomia i oszczędność, a z drugiej ochrona środowiska naturalnego. Nie inaczej jest w przypadku korzystania z niekonwencjonalnych źródeł energii, między innymi biogazu. Zalety biogazu spowodowały duże zainteresowanie jego zastosowaniem, jako paliwa w silnikach spalinowych.

Biogaz ma niestety poważną wadę. Jego składnikiem jest siarkowodór, który w procesie spalania w komorze silnika przechodzi w kwas siarkowy powodujący intensywną korozję, zwłaszcza świec zapłonowych. Żywotność świec zapłonowych podwyższa nałożenie na końcówki elektrod nakładek ze spieków irydowych lub platynowo irydowych. Poważnym problemem pozostaje jednak proces nakładania. W świecie stosowane są dwa procesy: zgrzewanie rezystancyjne oraz spawanie laserowe. Zdecydowanie lepsze wyniki daje spawanie laserowe, chociaż proces spawania jest trudny, a szereg związanych z nim problemów nadal wymaga rozpracowania.

Właśnie spawanie laserowe nakładek irydowych i platynowo irydowych z niklem stanowiącym zwykle materiał elektrody stanowi przedmiot badań ujętych w recenzowanej rozprawie doktorskiej. Uważam, że tematyka rozprawy jest aktualna i atrakcyjna, a otrzymane wyniki mają nie tylko duże znaczenie poznawcze, ale będą mogły znaleźć, a częściowo już znalazły wykorzystanie praktyczne. Istotna zarówno z naukowego, badawczego, jak i użytkowego punktu widzenia problematyka rozprawy uzasadnia jej podjęcie.

Badania ujęte rozprawą zostały przeprowadzone w ramach projektu badawczego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, zakończonego pomyślnie w 2012 roku. Doktorant uczestniczył w pracach zespołu wykonawczego projektu.

## Uwagi ogólne

Istotną częścią rozprawy jest obszerny przegląd literaturowy. Zestaw źródeł bibliograficznych obejmujący dziewięćdziesiąt w miarę aktualnych pozycji został solidnie przeanalizowany.

Doktorant skupił się na dwóch problemach.

Problem pierwszy to spawanie laserowe elementów o milimetrowych grubościach z materiałów różnoimiennych charakteryzujących się temperaturami topności różniącymi się o kilkaset jednostek w skali Kelwina (temperatura topnienia niklu wynosi 1728 K, a temperatury topnienia platyny i irydu wynoszą odpowiednio 2053 K oraz 2720 K, ponadto temperatura topnienia irydu jest niewiele niższa od temperatury wrzenia niklu wynoszącej nieco ponad 3000 K). Uzyskanie poprawnych połączeń bez doprowadzenia do parowania niklu i bez niezgodności spawalniczych w złączach spawanych wymaga stosowania spawania laserowego z małym wtopieniem. Jest to spawanie metodą przewodnościową (conduction welding), będące przeciwieństwem znacznie szerzej stosowanego w praktyce spawania metodą z głębokim wtopieniem (keyhole welding).

Problem drugi to numeryczne modelowanie (symulowanie) zjawisk topnienia i krystalizacji metali w procesach spawania. Literatura podaje bardzo dużo modeli dla różnych procesów spawania. W modelach tych uwzględnione zostały rozliczne czynniki decydujące o przebiegu tych procesów. Wszystkie te czynniki mają swoje znaczenie, jednak uporządkowanie i scalenie, a zwłaszcza wykorzystanie wyników badań jest trudne. Trafne jest spostrzeżenie Doktoranta dotyczące braku danych dotyczących sprawy w rozprawie najważniejszej, a mianowicie niewielkiej liczby prac dotyczących spawania materiałów różnoimiennych, a zwłaszcza materiałów o znacząco różnych temperaturach topnienia.

Z powodu braku danych, Doktorant podjął się modelowania wstępnego zjawisk fizycznych występujących w trakcie procesu spawania laserowego. Do modelowania wykorzystał pakiet ANSYS, a w szczególności solver Fluent. W modelowaniu uwzględnił: prawo zachowania masy i energii, równanie transportu masy, model przepływu turbulentnego oraz zjawiska fizyczne związane z napięciem powierzchniowym płynnego metalu i mechanizmy zachodzące w trakcie mieszania się dwóch materiałów. Wyniki modelowania zostały przedstawione w postaci szeregu złożonych, interesujących równań. Jednak trudno jest ocenić poprawność dochodzenia do tych równań ze względu na zastosowane skróty myślowe.

Dysponując modelami wstępnymi Doktorant zajął się modelami przewodnościowego spawania laserowego trzech różnych zestawów materiałów.

Najprostszy model dotyczył popularnej stali węglowej S235 w połączeniu z austenityczną stalą nierdzewną 304. Chodziło o zbadanie zjawiska topnienia i krzepnięcia materiałów dobrze spawalnych oraz mieszania się składników w niezbyt wysokich temperaturach. Chodziło też o zaoszczędzenie drogich materiałów wysokotopliwych. Zarówno proces symulacji, jak i weryfikacja doświadczalna spawania, do którego zastosowano laser CO<sub>2</sub>, zakończona analizą metalograficzną zglądów wykonanych spoin wykazały dobre odwzorowanie procesu topnienia i krzepnięcia dwóch różnych materiałów. Wykazały również, że przy określonych parametrach spawania można uzyskać złącza bez niezgodności spawalniczych, a wymieszanie składników łączonych stali zachodzi w zadawalającym stopniu.

Doświadczenia zebrane przy łączeniu stali upoważniły do zajęcia się modelami teoretycznymi opisującymi oddziaływanie wiązki laserowej w przypadkach spawania materiałów różniących się znacząco temperaturami topnienia. Celem głównym było opracowanie modelu, który mógłby być wykorzystany jako narzędzie pomocnicze do opracowania metody spawania laserowego nakładek z czystego trudnotopliwego irydu z końcówkami elektrod niklowych w świecach zapłonowych. Przy opracowaniu modelu uwzględnione zostały liczne czynniki odgrywające istotną rolę w procesie spawania. Głównym problemem było wyznaczenie zakresu temperatur, w którym z jednej strony dochodzi do stopienia irydu o temperaturze topności 2720 K (to warunek podstawowy uzyskania spoiny), a z drugiej – nie zostaje przekroczona temperatura wrzenia niklu wynosząca 3186 K i będąca tylko nieznacznie wyższa od temperatury topnienia irydu. Wrzenie i następnie odparowanie niklu prowadzi do powstawania niezgodności spawalniczych powodujących obniżenie trwałości świecy i skrócenie czasu jej eksploatacji.

Założono model dwu i trójwymiarowy. Ten drugi okazał się szczególnie przydatny do zbadania przebiegu procesu spawania nakładek platynowych z końcówkami elektrod niklowych w świecach zapłonowych oraz do regulacji parametrów procesu spawania. W modelach przyjęto wykorzystanie lasera Nd:YAG pracującego w trybie impulsowym. Zbadano też wpływ wstępnego podgrzewania na temperatury osiągane w jeziorku spawalniczym. Chodziło o osiągnięcie temperatury topnienia platyny i równocześnie nieprzekroczenie temperatury wrzenia niklu.

Obliczenia numeryczne pozwoliły na wyznaczenie parametrów pracy lasera, przy których proces spawania nakładek irydowych z końcówkami niklowymi przebiega stabilnie. Jednak, jak stwierdza Doktorant, są problemy z uzyskaniem przetopu na całej powierzchni styku łączonych elementów bez przekroczenia temperatury wrzenia niklu. Nasuwa się zatem pytanie, jak braki przetopu, albo wrzenie i parowanie niklu wpłyną na jakość i trwałość świec zapłonowych? Tym bardziej, że Doktorant informuje o stosowaniu w produkcji przemysłowej świec zapłonowych nie samego spawania laserowego, ale połączonych procesów zgrzewania rezystancyjnego i spawania laserowego.

Wyniki badań numerycznych dotyczące przypadków spawania materiałów różniących się znacząco temperaturami topnienia odniesiono do wyników badań otrzymanych doświadczalnie. Analiza porównawcza okazała się pozytywna.

Podsumowując recenzję można stwierdzić, że Doktorant wykazał się dobrą umiejętnością samodzielnego korzystania z technik numerycznego modelowania i symulacji procesów spawania laserowego oraz parametrów i czynników związanych z tym procesem. Wykazał się również znajomością praktycznego stosowania spawania laserowego z wykorzystaniem lasera gazowego CO<sub>2</sub> i na ciele stałym Nd:YAG. Na podkreślenie zasługuje bardzo duża liczba wykonanych różnorodnych badań numerycznych.

Rozprawę zamyka podsumowanie – analiza wyników przeprowadzonych badań własnych oraz zebranych doświadczeń. Analiza potwierdziła osiągnięcie założonego celu oraz upoważniła do sformułowania wniosków o charakterze poznawczym i użytkowym.

Rozprawa ma zadowalający poziom merytoryczny. Poszczególne rozdziały, ułożone w logicznej kolejności są proporcjonalne do wagi prezentowanej w nich problematyki. Została napisana poprawnym polskim językiem technicznym. Tekst

został poparty licznymi wzorami, rysunkami i wykresami ilustrującymi opisywane problemy.

### **Uwagi szczegółowe**

Moja ogólna ocena rozprawy jest pozytywna. Mam drobne uwagi szczegółowe, które przedstawiam.

Doktorant używa terminu : „spawanie odporowe” – prawidłowo mówi się „zgrzewanie rezystancyjne”.

Normy spawalnicze mówią o „niezgodnościach spawalniczych”, a nie o „defektach”.

Zauważyłem trochę błędów redakcyjnych, które zaznaczyłem na marginesach.

Podaję dwa przykłady ze str. 9:

w drugim akapicie jest: „... wysoka temperatura ... która przekraczająca ...”,

w drugim akapicie jest „procesowi korozji sprzyja”, a w trzecim akapicie jest „odporność na erozję”

oraz inny przykład ze str. 11:

„Spawanie jest procesem ... polegający na ich ...”.

### **Wnioski końcowe**

Biorąc pod uwagę:

- ciekawą i aktualną tematykę rozprawy,
- jasny cel i prawidłowe tezy rozprawy,
- obszernie i dogłębne badania,
- interesujące wyniki badań,
- wysnute wnioski naukowe i aplikacyjne

stwierdzam, że rozprawa doktorska, przygotowana pod opieką promotora i promotora pomocniczego:

- stanowi oryginalne rozwiązanie przedstawionego w rozprawie problemu naukowego

- wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną autora rozprawy w dziedzinie nauk technicznych

- wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez autora rozprawy,

a zatem spełnia wymagania stawiane ustawą o stopniach i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony.

