

Ocena rozprawy doktorskiej **mgr inż. Piotra Myśliwca** na temat: „**Analiza efektu uplastycznienia cienkich blach ze stopów aluminium i magnezu w procesie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem do zastosowania w konstrukcjach lotniczych i samochodowych**”, wykonanej w Katedrze Przeróbki Plastycznej Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w roku 2020.

Promotor pracy: Prof. dr hab. inż. Romana Ewa Śliwa; promotor pomocniczy: Dr inż. Robert Ostrowski

Metoda zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW), obecnie klasyfikowana jako „green technology”, zrewolucjonizowała proces łączenia metali lekkich, w szczególności niespawalnych stopów aluminium serii 2XXX i 7XXX. Dokonało się to niezwykle szybko, gdyż od jej wynalezienia, dokładniej złożenia wniosku patentowego przez Instytut Spawalnictwa (TWI) w Cambridge w 1991r do pierwszego przemysłowego zastosowania minęło niespełna 5 lat i już w 1995r metodą FSW wytwarzano aluminiowe panele chłodzące przeznaczone do głębokiego mrożenia ryb na skandynawskich kutrach morskich, a niedługo potem, konstruowano pokłady i grodzie statków.

Obecnie zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem z powodzeniem stosowane jest nie tylko przy budowie statków i pojazdów szynowych czy konstrukcji zbiorników kriogenicznych, ale również w bardzo odpowiedzialnych strukturach lotniczych, rakietach balistycznych i pojazdach kosmicznych. Jest więc procesem wszechstronnego zastosowania, a przy tym energooszczędnym i przyjaznym dla środowiska, czym góruje nad innymi sposobami łączenia, włącznie z bardzo popularnymi technikami spawalniczymi. Niezwykła atrakcyjność metody FSW wynika z możliwości jej realizacji w stanie stałym i tym samym zapobiegnięciu wadom (szczególnie pękaniu), powstającym podczas krzepnięcia stopionego złącza co zdarza się w operacjach spawania. Również istotny jest fakt, że przy użyciu FSW w jednym „przejściu” można łączyć elementy o grubości od 0,3 do 75mm (a techniką „dwustronną” nawet do 150mm).

W konstrukcjach lotniczych, proces FSW stanowi korzystną alternatywę operacji nitowania i to zarówno ze względu na bardzo dobrą jakość utworzonego złącza, w tym jego wysokich własności mechanicznych, jak i konkurencyjną prędkość wykonania (40%-towe skrócenie czasu łączenia).

Panuje powszechne przekonanie, że dopóki trudnospawalne czy całkowicie niespawalne stopy lekkie będą wykorzystywane w przemyśle lotniczym i kosmicznym, technologia ich łączenia będzie traktowana nadzwyczaj priorytetowo. Rzeczywiście, już obecnie obserwuje się ogromne zaangażowanie w tym obszarze takich firm jak Boeing, Lockheed Martin czy Marshall Space Flight Center.

Dysponentem większości technologii dotyczących FSW, jak również z jednej strony oferentem technicznych, kompleksowych rozwiązań „pod klucz”, a z drugiej propagatorem i koordynatorem badań rozwojowych, jest Instytut Spawalnictwa w Cambridge, który do tej pory udzielił zainteresowanym organizacjom blisko 200 licencji.

W ciągu ostatnich 10 lat, na świecie zgłoszono ponad 6 000 patentów z obszaru FSW, z czego blisko 2 000 aktualnie przechodzi procedurę związaną z przyznaniem międzynarodowej ochrony. Procesem FSW bardzo aktywnie interesuje się środowisko naukowe, o czym świadczą: około 8 000 artykułów opublikowanych w tym krótkim czasie, oraz

zapoczątkowane w 1999r, i odbywające się coroczne, międzynarodowe konferencje poświęcone tylko temu jednemu tematowi. Należy podkreślić, że problematyka związana z FSW jest z powodzeniem rozwijana w kilku polskich ośrodkach naukowo-badawczych, w konsekwencji czego powstają zarówno specjalistyczne opracowania, w tym prace doktorskie i habilitacyjne, jak i szereg publikacji.

Pomimo spożytkowania potężnych środków finansowych pochodzących z przemysłu jak i budżetów poszczególnych krajów i organizacji ponadpaństwowych (np.: europejskie projekty OASIS, czy ENABLE), ogromnego wysiłku licznych zespołów naukowo-badawczych i inżynierskich na całym świecie, wiele zagadnień związanych z metodą FSW zarówno w sferze technicznej jak i poznawczej, nadal oczekuje na praktyczne rozwiązanie oraz wyjaśnienie od strony towarzyszących jej zjawisk fizycznych. Dotyczy to szczególnie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem cienkich elementów, w tym głównie blach ze stopów aluminium i magnezu o grubości nie przekraczającej 0,5mm, ponieważ uważa się, że proces ten może znacząco odbiegać od łączenia blach „grubych”. Chodzi tu nie tylko o utrudnienia techniczne związane z niewielką zdolnością łączonych, cienkich elementów konstrukcyjnych do przenoszenia obciążeń towarzyszących realizacji FSW, ale przede wszystkim o bilans cieplny (duża powierzchnia zgrzeiny w stosunku do jej objętości) decydujący o przebiegu i strukturalnych skutkach procesu. Jest to istotne z uwagi na 3 zasadnicze cechy metody FSW, a to:

- nagrzewanie materiału przez ciepło tarcia pomiędzy nim a obracającym się narzędziem (głównie oporą), powiększone o ciepło odkształcenia,
- przemieszczenie zmiękzonego (nagrzanego) materiału z przed trzpienia za trzpień, oraz
- zapobieganie niekontrolowanemu wypływowi stygnącego materiału z ograniczonej oporą strefy przemieszania.

W powyższą tematykę dobrze wpisuje się recenzowana praca doktorska pana mgr inż. Piotra Myśliwca zatytułowana: „Analiza efektu uplastycznienia cienkich blach ze stopów aluminium i magnezu w procesie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem do zastosowania w konstrukcjach lotniczych i samochodowych”, która w części teoretycznej obejmuje logiczny, wyczerpujący i krytyczny opis problematyki związanej z procesem FSW oparty na 174 pozycjach poprawnie dobranej literatury przedmiotu, a w części doświadczalnej referuje i komentuje wyniki precyzyjnie przeprowadzonych badań własnych. W tym przypadku, nie sprawdza się stare, polskie przysłowie: „Od przybytku głowa nie boli”. Z jednej strony występuje nadzwyczaj obfity zbiór dostępnych prac na temat metody FSW, z drugiej pojawia się niedosyt związany z niezaspokojoną potrzebą pełnej identyfikacji mechanizmu zgrzewania, optymalizacji warunków prowadzenia procesu, a także dalszych oczekiwanych przez przemysł etapów jego modernizacji, co postawiło Doktoranta przed bardzo poważnym zadaniem. Na szczęście zespół kierowany przez promotor pracy panią Prof. dr hab. inż. Romanę Śliwę, którego Doktorant był członkiem, od szeregu już lat skutecznie angażuje się w tematykę łączenia blach ze stopów aluminium i magnezu przeznaczonych dla konstrukcji lotniczych, koncentrując badania na procesie FSW. Doktorant mógł więc wykorzystać zarówno doświadczenie zespołu, jak i specjalistyczną aparaturę naukowo-badawczą zgromadzoną w Katedrze Przeróbki Plastycznej Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, gdzie prowadził swoje badania.

Recenzowana praca ma, ściśle doświadczalny charakter, a świadomie wybraną drogę i konsekwencję jej realizacji, należy ocenić jako uzasadnioną i twórczą. Uznanie budzi nie tylko trafność wyboru tematyki, jej potencjał i atrakcyjność, ale w równym stopniu bardzo szeroki zakres zaplanowanych i zrealizowanych badań obejmujący różne zestawy materiałowe i wariantowe techniki FSW. Można zastanawiać się, dlaczego Doktorant nie wzorował się na kierunku aktualnie prowadzonych badań w Instytucie Spawalnictwa w Cambridge, skoncentrowanych na zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem cienkich (0,3mm) blach aluminiowych w niższej temperaturze i pod mniejszym obciążeniem od dotychczas stosowanych. Czy uznał, że konieczne wówczas wstępne ocynowanie blach niekorzystnie wpłynie na własności użytkowe chemicznie wzbogaconych zgrzein?

Praca w części teoretycznej, obejmuje stan wiedzy odnoszący się do metody FSW, przywołując szereg wyników doświadczalnych oraz rozważań naukowych, które w wyczerpujący sposób naświetlają obszar zainteresowań Doktoranta. Zastrzeżenie budzi jedynie zbędne rozwinięcie rozdziału „2.3. Generowanie ciepła w procesie FSW” o numeryczne modele jego generacji. Oczywiście istnieje kilka akceptowanych, matematycznych podejść umożliwiających określenia pola temperatur oraz ruchu (płynięcia) materiału w zgrzeinie w zależności od jego rodzaju i zastosowanych parametrów procesu zgrzewania. Wykorzystywane są zarówno opisy oparte na mechanice płynów jak i modele termodynamiczne, bezsiatkowe i analityczne, które mają na celu optymalizację procesu i po weryfikacji doświadczalnej z użyciem termopar i markerów przepływu, mogą być wykorzystane do jakościowej oceny zgrzein. Jednak Doktorant, pomimo bardo drobiazgowej prezentacji poszczególnych modeli, nigdy do nich nie nawiązał w części doświadczalnej, a „jakość uzyskanych zgrzein FSW oceniał na podstawie pomiaru siły podczas realizacji procesu i wyników badań niszczących (statyczna próba rozciągania, niskocyklowe badania zmęczeniowe) pomiarów mikrotwardości oraz analizy makro i mikrostruktury w strefie złącza i materiale rodzimym” (str. 88).

Tezę pracy można by ocenić jako mało oryginalną gdyby nie fakt, że dotyczy połączenia tzw. „cienkich” blach, czyli obejmujących grubość 0,5mm. Co warte podkreślenia, Doktorant nie poprzestał na ocenie przebiegu procesu FSW oraz jakości uzyskanych zgrzein tylko w blachach o grubości 0,5mm ze stopu aluminium i magnezu, ale swoimi działaniami - w celach porównawczych - objął także grubsze (1 i 3mm) blachy, nawiązując do stwierdzenia zawartego na stronie 81, że „...zjawiska fizyczne (mechaniczne i strukturalne) zachodzące podczas procesu FSW są znane i stosunkowo dobrze wyjaśnione przy łączeniu grubych blach”.

Jak wynika to z zawartości i struktury pracy doktorskiej, wszystkie podjęte w jej ramach działania praktyczne i przeprowadzone analizy służyły dwóm najistotniejszym celom:

- „Dokonaniu analizy zjawiska uplastycznienia i (prze)mieszania łączonych materiałów...” cienkich blach ze stopu aluminium i magnezu, „... podczas procesu FSW...” (cel pracy: 3, str.85), oraz

- zdobyciu praktycznej wiedzy umożliwiającej wyznaczenie optymalnych parametrów i skutecznego przeprowadzenia procesu FSW w warunkach przemysłowych, obejmującego łączenia elementów konstrukcji lotniczych, między innymi: belki podwozia przedniego samolotu M28 ze stopu aluminium (AA 2024-T3).

Niewątpliwym osiągnięciem Doktoranta bezpośrednio prowadzącym do osiągnięcia powyższych celów, było skonstruowanie na bazie wyników doświadczalnych, jakościowych matryc parametrów FSW dla blachy o grubości 0,5mm ze stopu magnezu AZ 31B dla połączenia doczołowego (str. 117) oraz blachy o grubości 1/3mm ze stopu aluminium AA 2020-T3 dla połączenia zakładkowego (str.162), pozwalających na optymalizację procesu zgrzewania pod kątem uzyskania najkorzystniejszej struktury i własności użytkowych zgrzein, a który zostały pomyślnie zweryfikowany w warunkach przemysłowych firmy ULTRATECH.

Niestety, brakuje w pracy zwartego (czyli nie rozproszonego w wielu jej fragmentach) nowego (?) opisu zjawiska uplastycznienia i przemieszania łączonych materiałów. W szczególności, w części teoretycznej, na stronie 41 znajduje się sformułowanie: „...wszystkie deformacje są konsekwencją ruchu dyslokacji i powstania defektów punktowych (wakancje). Wyjątek stanowią odkształcenia przy bardzo dużych prędkościach odkształcenia  $\geq 10^7 \text{s}^{-1}$ , gdy powstają adiabatyczne pasma ścinania [69].” Jak powyższy tekst odnieść do realizowanego w pracy procesu FSW, w którym prędkość odkształcenia wynosi  $10\text{-}20 \text{s}^{-1}$  (odkształcenie rzeczywiste rzędu 8)? Czy metal w strefie przemieszania odkształca się na skutek ruchu dyslokacji? Na stronie 134 można znaleźć i taką informację, że „Mikrostruktura blachy w obszarze zgrzeiny ulega silnemu odkształceniu, polegającemu na znacznym rozdrobnieniu ziarn osnowy” (co zresztą nie jest przekonywujące w świetle rysunków 8.24 i 8.25, które wykonano z różnymi powiększeniami). Proszę o konkretne wyjaśnienie w jaki sposób następuje uplastycznienie „grubych”, a w jaki „cienkich” materiałów poddanych procesowi FSW.

Interesującym będzie również wyjaśnienie przez Doktoranta, dlaczego pomimo złego efektu wizualnego zgrzeiny (str.147) posiada ona dobre własności mechaniczne, a proces jej wytwarzania charakteryzuje się „spokojnym” przebiegiem sił? Oczywiście, można przywołać opinię, że (str. 143): „...brak gwałtownych zmian wartości mierzonych sił dostarcza informacji, że złącze jest jednorodne na całej długości – wolne od wad”. Jednak z porównania wykresów sił zgrzewania blach ze stopu magnezu AZ 31B zamieszczonych w tabeli 8.7 dla zgrzeiny „10” oraz innej ale wykonanej w identycznych warunkach (rys. 8.4) w konfrontacji z wyglądem zgrzein pokazanych w tabeli 8.3 (zgrzeina „10”) oraz na rysunku 8.4, trudno doszukać się takiej prawidłowości.

Na stronie 103 zapisano, że zerwanie wszystkich próbek (AZ 31B) złączonych doczołowo metodą FSW, nastąpiło po stronie natarcia w strefie oddziaływania termomechanicznego, podczas gdy dalszy fragment pracy wskazuje (str. 119) iż: „...wszystkie próbki zrywały się w obszarze termomechanicznie odkształconego materiału po stronie spływu zgrzeiny”, co również potwierdza zapis na stronie 120 wnosząc, że „...inicjacja pęknięcia podczas jednoosiowej statycznej próby rozciągania następowała właśnie po stronie spływu” i co zostało ujęte we wniosku 3 na stronie 122.

Z kolei, za nieuzasadniony wynikami badań własnych należy uznać wniosek 3 na stronie 139 wskazujący, że „...poziom uplastycznienia cienkich blach stopu AA 2024-T3 głównie zależy od parametru zagłębienia narzędzia”, ponieważ w pracy nie podano informacji aby w tej serii badań Doktorant stosował inne trzpienie niż ten o długości 0,44mm.

Praca oprócz streszczenia w j. polskim i angielskim obejmuje 219 stron tekstu, wykresów oraz tabel, a zaprezentowany w niej zbiór wyników i przeprowadzona ich analiza mogłyby z



powodzeniem spełnić wymogi nie jednego ale dwóch doktoratów, co jednak nie oznacza, że ustrzegło to Doktoranta od popełnienia szeregu błędów redakcyjnych. Kilka z nich wyszczególniono poniżej:

- Przy omawianiu metodyki pomiaru twardości (mikrotwardości?), Doktorant najpierw (na str. 94) podaje jedynie numery obowiązujących w tym względzie norm, potem (str. 108, tab. 8.6) dopowiada, że chodzi o metodę Vickers'a, a dopiero na stronie 177 zamieszcza szczegóły próby czyli wielkość nacisku i czas jej trwania. Z kolei, zupełnie zbędne jest zamieszczenie zdjęcia typowego twardościomierza (rys. 7.8, str. 95) jak również wykorzystywanej do prób rozciągania, maszyny wytrzymałościowej (rys. 7.10, str. 96).

- Problem występuje również w przypadku górnego rysunku 8.2 (str. 109), ponieważ zgodnie z nim, grubość blachy wynosiłaby nie 0.5mm ale zaledwie kilka mikrometrów.

- Nie wnosi nowych treści okrągłe zdanie zamieszczone na stronie 137: „Zatem czynnikiem mającym największy wpływ na poziom uplastycznienia cienkich blach stopu aluminium są: czas uplastycznienia i parametry technologiczne”.

- W rozdziale 8.4 „Demonstrator technologii FSW” podano (str. 171), że „Proces realizowano narzędziami pokazanymi w tabeli 7.5”, jednak trudno zidentyfikować którymi z nich i jakie były ich wymiary. W tym przypadku nie mierzono sił zgrzewania lecz ocenę zgrzein dokonywano wizualnie (stan powierzchni), a wybiórczo na przekrojach poprzecznych z użyciem mikroskopu optycznego. Szkoda, te same próbki nie posłużyły Doktorantowi do wykonania pomiarów mikrotwardości (twardości?) co wobec braku innych prób wytrzymałościowych, pozwoliłoby na pełniejszą weryfikację oceny jakości zgrzein.

-Przykłady innych niedociągnięć redakcyjnych, przedstawiono poniżej:

*Strona 15;* Dziwna treść zdania : „Topienie łączonych materiałów dyskwalifikuje złącze i nie występuje dodatkowy materiał łączący”.

*Strona 15;* Powtórzona zdanie.

*Strony 17 i 19;* Powtórzenie informacji w oparciu o różne pozycje literaturowe ([8] i [28]).

*Strona 19;* Nieprecyzyjne nazewnictwo: „zgrzewanie tarciove z mieszaniem”.

*Strona 20, rys. 2.3;* Nietypowe sformułowanie: „proces wolny od wykwalifikowanych operatorów”.

*Strony 99 i 124;* Różne nazewnictwo: „czas uplastycznienia”, „prześój czasowy”.

*Strona 104;* Czy rzeczywiście chodzi o cząstki  $Mg_2Sn$ ?

*Strona 103;* Niepoprawne określenie: „granica wytrzymałości  $R_m$ ”.

*Strona 124;* Zapisana średnica opory nie zgadza się z rysunkiem (tab. 8.10).

- Literówki, np.: w wyrazie „godnie” (str. 115), czy „AlCu4Mg1/AlCu4Mg2” (str. 123).

W tym miejscu, należy dodać, że występujące w pracy drobne pomyłki i niedociągnięcia edytorskie nie obniżają jej merytorycznej zawartości i bardzo wysokiej oceny.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgr inż. Piotra Myśliwca zatytułowana: „Analiza efektu uplastycznienia cienkich blach ze stopów aluminium i magnezu w procesie zgrzewania tarciovego z przemieszaniem do zastosowania w konstrukcjach lotniczych i samochodowych”, spełnia wymagania zawarte w przepisach i wytycznych Centralnej Komisji ds. Tytułu Naukowego i Stopni Naukowych i może zostać dopuszczona do publicznej obrony.

W. Bochniak

