

Jacek ZAWADZKI*, Cezary JĘDRYCZKA**

ANALIZA I OPTIMALIZACJA ZGRZEWÓW ULTRADŹWIĘKOWYCH PRZEWODÓW MIEDZIANYCH Z WYKORZYSTANIEM LOGIKI ROZMYTEJ

W artykule skoncentrowano się na badaniu wpływu podstawowych parametrów procesu zgrzewania ultradźwiękowego takich jak: amplituda wibracji, siła nacisku oraz czas zgrzewania na wybrane parametry jakościowe uzyskanego połączenia przewodów miedzianych. Badania przeprowadzono metodą czynnika (ang. *fractional desing*) z czterema poziomami. Jako parametry jakościowe mierzono siłę zrywania (F_{pull}), siłę odrywania (F_{peel}) oraz obszar zgrzewu. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykorzystano do opracowania nieliniowego modelu regresji drugiego stopnia. Ze względu na wariację wyników badań oraz parametrów wejściowych przy tworzeniu reguł modelu wykorzystano logikę rozmytą. Zastosowanie logiki rozmytej pozwoliło na uniezależnienie się od konieczności prowadzenia badań niszczących w procesie produkcyjnym i osiągnięcie najwyższego poziomu jakości zgrzewów.

SŁOWA KLUCZOWE: zgrzewanie ultradźwiękowe, logika rozmyta.

1. WPROWADZENIE

Technologia łączenia materiałów wykorzystywana jest powszechnie w wielu gałęziach przemysłu, takich jak branża samochodowa, lotnictwo, kolejnictwo, medycyna, mikroelektronika i wiele innych. W wielu ośrodkach badawczych poszukuje się technologii pozwalających na redukcję masy zgrzewu, energii i kosztu procesu łączenia. Przy czym, coraz częściej sięga się po nowe, lżejsze i bardziej podane na rozciąganie materiały, takie jak aluminium, tytan, magnez czy miedź. Główną barierą w użyciu nowych materiałów jest wymagana wysoka temperatura podczas zgrzewania oraz cena oprzyrządowania potrzebnego do procesu ich łączenia. Poza tradycyjnymi metodami zgrzewania rezystancyjnego czy spawania, obiecującą i coraz częściej wykorzystywaną technologią łączenia metali jest zgrzewanie ultradźwiękowe (ang. *ultrasonic metal welding* – USMW). Metoda ta została wynaleziona w roku 1950 [1], a pierwszy patent przyznano w połowie XX wieku w USA [2].

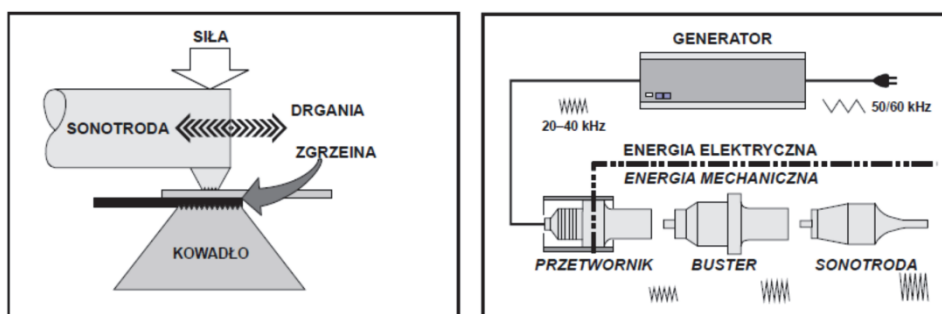
* TKH Kabeltechnik Polska Sp. z o.o.

** Politechnika Poznańska

2. ZGRZEWANIE ULTRADŹWIĘKOWE

Zgrzewy ultradźwiękowe używane są od ponad 30 lat m.in. w przemyśle lotniczym, medycznym, samochodowym, elektrotechnicznym i elektronicznym. Technologia zgrzewania ultradźwiękowego w stosunku do tradycyjnych metod łączenia materiałów posiada wiele zalet. Metoda ta jest bardzo szybka (czas operacji poniżej 1 sekundy) i eliminuje konieczność stosowania zazwyczaj toksycznych spoiw i kwasów. Zalety te w połączeniu z niskim zużyciem energii powodują, że jest ona coraz chętniej stosowana przy produkcji masowej. Pomimo omówionych zalet głównym problemem przy stosowaniu zgrzewów ultradźwiękowych jest zapewnienie wymaganej jakości połączenia. Z uwagi na złożoność i sprzężony charakter zjawisk fizycznych występujących w procesie zgrzewania ultradźwiękowego liczba parametrów technologicznych wpływających na jakość zgrzewu jest duża.

W procesie zgrzewania ultradźwiękowego przemieszczające się cyklicznie względem siebie dwie powierzchnie metalu łączą się ze sobą w wyniku działania energii drgań mechanicznych wysokiej częstotliwości. Przy czym, pierwotnym źródłem energii w omawianym procesie jest energia elektryczna przetwarzana na mechaniczną. Drgania mechaniczne są przenoszone do końcówki zgrzewającej przez dostrojoną akustycznie sonotrodę. Części „ocierają się” o siebie pod kontrolowanym naciskiem, z częstotliwością 20000 cykli na sekundę. Na skutek drgań oraz przyłożonej siły nacisku następuje lokalny wzrost temperatury powierzchni łączonych materiałów, rozpraszane są warstwy wierzchnie i tlenki, tworząc czysty, kontrolowany zgrzew dyfuzyjny. Proces zgrzewania ultradźwiękowego zilustrowano na rys. 1.



Rys. 1. Proces zgrzewu ultradźwiękowego [3]

Główne zalety zgrzewania ultradźwiękowego to [3, 5]:

- wysokiej jakości połączenie elektryczne, mechaniczne i termiczne między podobnymi i różnymi metalami,
- niska koncentracja ciepła (brak wyżarzania materiałów),
- kompensacja nierówności występujących na powierzchni materiału,

- samoczynne usuwanie z powierzchni materiału tlenków i zanieczyszczeń przed zgrzewaniem,
- zdolność zgrzewania dużych obszarów przy użyciu minimalnej energii,
- możliwość łączenia materiałów o różnych grubościach,
- niski koszt jednostkowy zgrzewania,
- powtarzalność parametrów zgrzewu.

3. PROCEDURA EKSPERYMENTU

Do badania procesu zgrzewania ultradźwiękowego użyto przewodów FLRYW-B 1.0mm² firmy Leoni. Parametry miedzi użytej do produkcji badanych przewodów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry miedzi Cu-ETP1 [8].

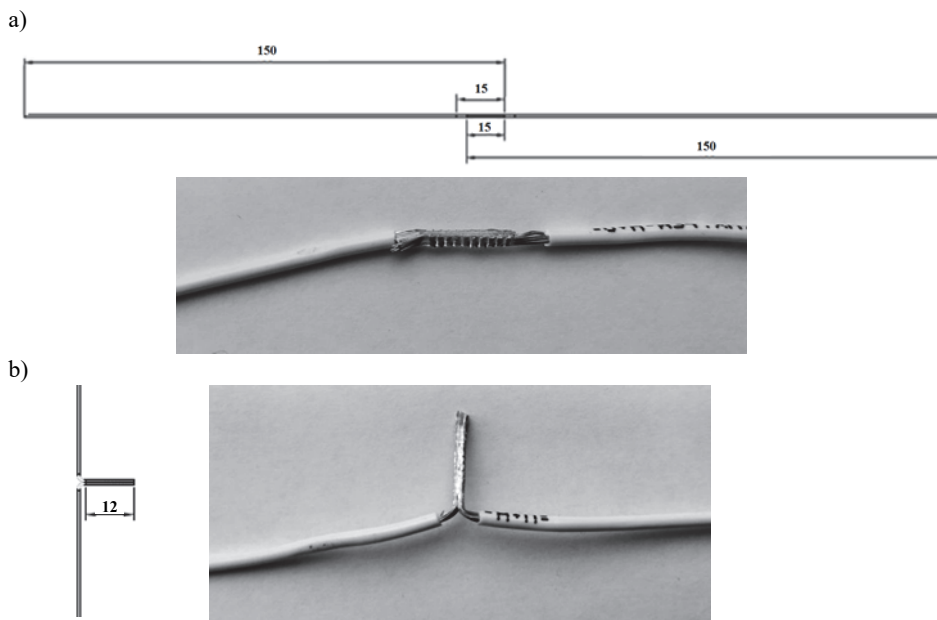
| Materiał | Symbol | Skład | Gęstość | Punkt topienia | Konduktywność |
|----------|----------------|------------|----------------------|----------------|---------------------------|
| Miedź | Cu-ETP1 (E-Cu) | Cu ≥99,90% | 8,9 g/m ³ | 1083°C | ≥58,58 m/Ωmm ² |

W celu zbadania siły zrywania (F_{pull}) oraz siły odrywania (F_{peel}) dla każdego zestawu parametrów wejściowych procesu wykonano dwa zgrzewy testowe o parametrach pokazanych na rys. 2. Przy czym na rys. 2a) zilustrowano „szeregowe” połączenie przewodów wykorzystane do przeprowadzenia testu zrywania (ang. *Pull test*). Natomiast na rys. 2b) pokazano połączenie wykorzystane do testu rozwarstwiania (ang. *Peel test*). Do przeprowadzenia obu testów użyto urządzenia firmy Macmesin model MultiTest 2,5-d wraz z uchwytem pokazanym na rys. 3. Badania przeprowadzono przy prędkości trawersy na poziomie 350mm/min. Urządzenie posiada dokładność rzędu 0,1% zakresu pomiarowego wynoszącego 2N-500N.

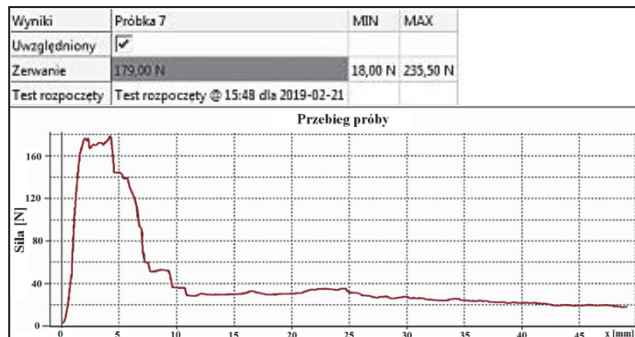
W badaniach eksperymentalnych posłużono się metodą czynnikową DOEFE (ang. *Design Of Experiment Factorial Design*). Do wygenerowania danych wejściowych do eksperymentu (zestawu parametrów wejściowych) posłużono się oprogramowaniem Minitab. W badaniach wykorzystano zgrzewarkę ultradźwiękową firmy Branson model 2032S [4]. Przy czym jako referencyjne parametry procesu zgrzewania przyjęto wartości predefiniowane przez producenta dla rozważanej kombinacji przewodów 2 x 1 mm².

Na podstawie badań testowych określono następującą parametry eksperymentu:

- czynniki – 3,
- próby – 12,
- bloki – 3.



Rys. 2. Ułożenie przewodów podczas procesu zgrzewania, (wymiary w milimetrach)



Rys. 3. Uchwyt urządzenia do pomiaru sił zrywania i rozwarstwiania połączonych przewodów oraz przykładowy pomiar siły zrywania w funkcji położenia

Na proces zgrzewania ultradźwiękowego ma wpływ wiele parametrów. Studia literaturowe [2, 5], doświadczenie z aktualnie realizowanych w firmie KABELTECHNIKIENK Polska Sp. z o.o. procesów technologicznych oraz przeprowadzone badania testowe wskazują na trzy główne czynniki:

- amplituda drgań sonotrody, A – wartość referencyjna – 26 μm ;
- ciśnienie podczas zgrzewania, P_z – wartość referencyjna – 18,6 Psi;
- czas zgrzewania, t_z – wartość referencyjna – 0,62 s.

Na podstawie doświadczeń i badań testowych przyjęto następujące zakresy zmienności parametrów wejściowych:

- amplituda drgań sonotrody – zakres do badań: 21 ÷ 31 μm ;
- ciśnienie podczas zgrzewania – zakres do badań: 15,6 ÷ 21,6 Psi;
- czas zgrzewania – zakres do badań: 0,52 ÷ 0,72s.

W celu analizy wpływu powyższych czynników na parametry wyjściowe (siłę zrywania i rozwarstwiania, odpowiednio F_{pull} oraz F_{peel}) posłużono się eksperymentem czynnikiemowym. Podczas przeprowadzenia eksperymentu jako funkcję celu obrano maksymalną wartość siły zrywania oraz rozwarstwiania.

Tabela 2. Wybrane wyniki badań eksperymentalnych.

| Próba | Blok | A | P_z | t_z | F_{pull} | F_{peel} |
|-------|------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|
| [-] | [-] | [μm] | [Psi] | [s] | [N] | [N] |
| 1 | 1 | 31 | 15,6 | 0,52 | 159 | 73 |
| 2 | 1 | 21 | 21,6 | 0,52 | 144 | 14 |
| 3 | 1 | 21 | 15,6 | 0,72 | 169 | 14,5 |
| 4 | 1 | 31 | 21,6 | 0,72 | 121 | 68 |
| 5 | 2 | 31 | 21,6 | 0,72 | 125 | 62 |
| 6 | 2 | 31 | 15,6 | 0,52 | 157 | 73 |
| 7 | 2 | 21 | 15,6 | 0,72 | 164 | 11 |
| 8 | 2 | 21 | 21,6 | 0,52 | 147 | 13 |
| 9 | 3 | 31 | 15,6 | 0,52 | 156 | 85 |
| 10 | 3 | 31 | 21,6 | 0,72 | 135 | 73,5 |
| 11 | 3 | 21 | 21,6 | 0,52 | 138 | 14,5 |
| 12 | 3 | 21 | 15,6 | 0,72 | 139 | 10,5 |

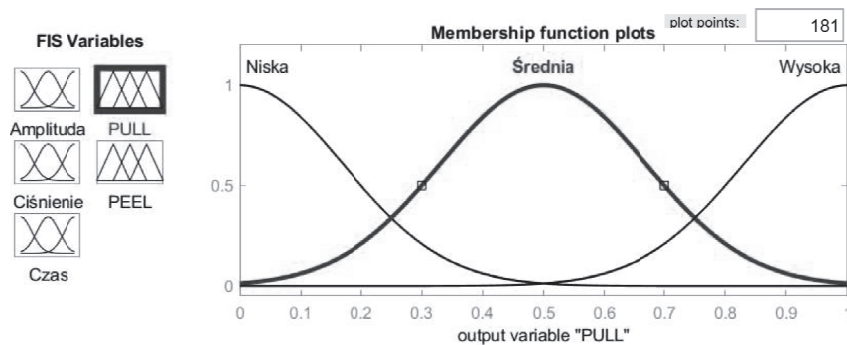
4. LOGIKA ROZMYTA

Logika rozmyta (ang. *Fuzzy logic*) należy do grupy tzw. logik wielowartościowych i stanowi uogólnienie klasycznej logiki binarnej. Dzięki wykorzystaniu klasyfikatorów lingwistycznych umożliwia ona modelowanie procesów w sposób bardziej naturalny dla człowieka [6, 7]. System logiki rozmytej (system Mamdani) składa się z trzech głównych etapów. W pierwszym etapie przeprowadzana jest tzw. fuzyfikacja mająca na celu „rozmycie” danych wejściowych modelu. Przy czym w procesie fuzyfikacji stosuje się różne funkcje przynależności (ang. *Membership functions*) [6] do klasyfikatorów lingwistycznych. W kolejnym etapie przeprowadzana jest inferencja, czyli wnioskowanie. Definiowane są reguły wnioskowania przyporządkowujące odpowiedź modelu. W ostatnim kroku przeprowadzana jest tzw. defuzyfikacja, czyli określenie ilo-

ściowe parametrów wyjściowych, wykorzystuje się w tym celu funkcje odwrotne. Funkcje przynależności można traktować jak rozkłady prawdopodobieństwa. W celu implementacji opisanych powyżej operacji w pierwszym kroku należy dokonać normalizacji danych wejściowych:

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)}, \quad (1)$$

gdzie: $x_i(k)$ są danymi znormalizowanymi, a $y_i(k)$ są danymi obserwowanymi.



Rys. 4. Funkcja przynależności dla odpowiedzi - zrywanie (PULL)

Wartości rozmyte jakościowe są następnie definiowane za pomocą funkcji przynależności. W tym przypadku analiza danych wejściowych oraz wyjściowych jest wyrażana za pomocą zmiennych lingwistycznych. Na rysunku 4 pokazano graficzną reprezentację trzech wartości logicznych: „niska”, „średnia” oraz „wysoka” siła zrywania przewodów. Wartość funkcji przynależności zmiennych obserwowanych jest obliczana na podstawie reguł logicznych. W opracowanym modelu wykorzystano 8 reguł logicznych zdefiniowanych w postaci wyrażen warunkowych „if – then” – patrz rysunek 5.

```

1. If (Amplituda is Mala) and (Ciśnienie is Małe) and (Czas is Niski) then (PULL is Średnia)(PEEL is Niska) (1)
2. If (Amplituda is Mala) and (Ciśnienie is Małe) and (Czas is Niski) then (PULL is Średnia)(PEEL is Niska) (1)
3. If (Amplituda is Mala) and (Ciśnienie is Średnie) and (Czas is Niski) then (PULL is Średnia)(PEEL is Niska)
4. If (Amplituda is Mala) and (Ciśnienie is Średnie) and (Czas is Niski) then (PULL is Wysoka)(PEEL is Niska)
5. If (Amplituda is Duża) and (Ciśnienie is Małe) and (Czas is Wysoki) then (PULL is Niska)(PEEL is Wysoka)
6. If (Amplituda is Duża) and (Ciśnienie is Wysokie) and (Czas is Niski) then (PULL is Średnia)(PEEL is Wyc
7. If (Amplituda is Duża) and (Ciśnienie is Wysokie) and (Czas is Wysoki) then (PULL is Niska)(PEEL is Wyc
8. If (Amplituda is Średnia) and (Ciśnienie is Średnie) and (Czas is Średni) then (PULL is Wysoka)(PEEL is S

```

Rys. 5. Reguły wnioskowania w opracowanym modelu

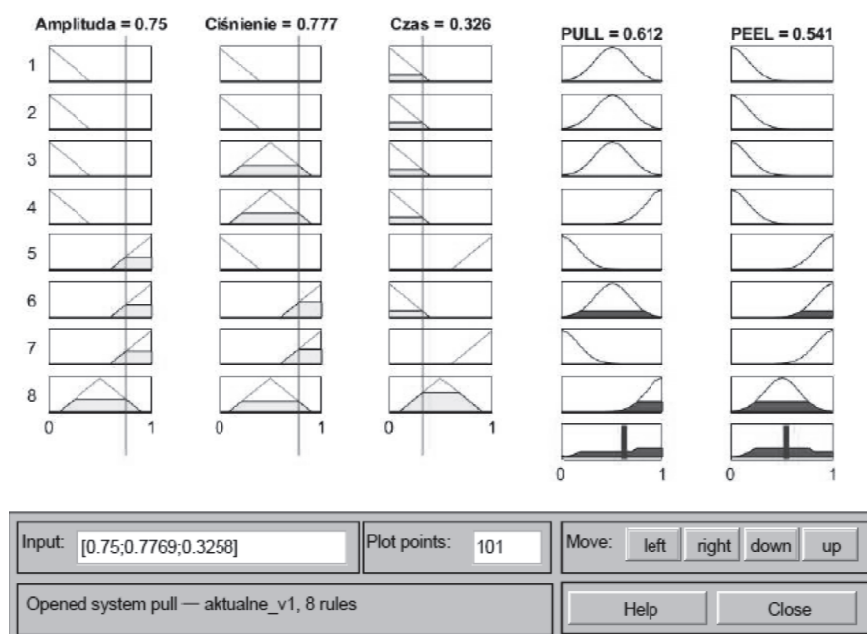
Kolejny etap to zastosowanie dla każdej reguły metod implikacji rozmytej celem określenia jej wniosku (konkluzji). Następnie wykonuje się łączenie

wniosków (konkluzji) wszystkich reguł, celem uzyskania tzw. wynikowej (wyjściowej) funkcji przynależności dla modelu $\mu_y(y)$. Operacja ta jest określana jako agregacja wszystkich wyjść, tzn. agregacja konkluzji wszystkich reguł.

Najczęściej stosowana metoda określenia wynikowej funkcji przynależności $\mu_y(y)$ polega na tym, że najpierw określa się oddzielnie zmodyfikowane funkcje przynależności zbiorów rozmytych dla konkluzji poszczególnych reguł. Następnie sumuje się wynikowe zbiory rozmyte dla poszczególnych reguł:

$$\mu_y(y) = \mu_{A(x_1)} + \mu_{A(x_2)} + \mu_{A(x_3)} + \dots + \mu_{A(x_n)}. \quad (2)$$

Proces agregacji konkluzji dla przykładowych danych wejściowych zilustrowano na rysunku 6.

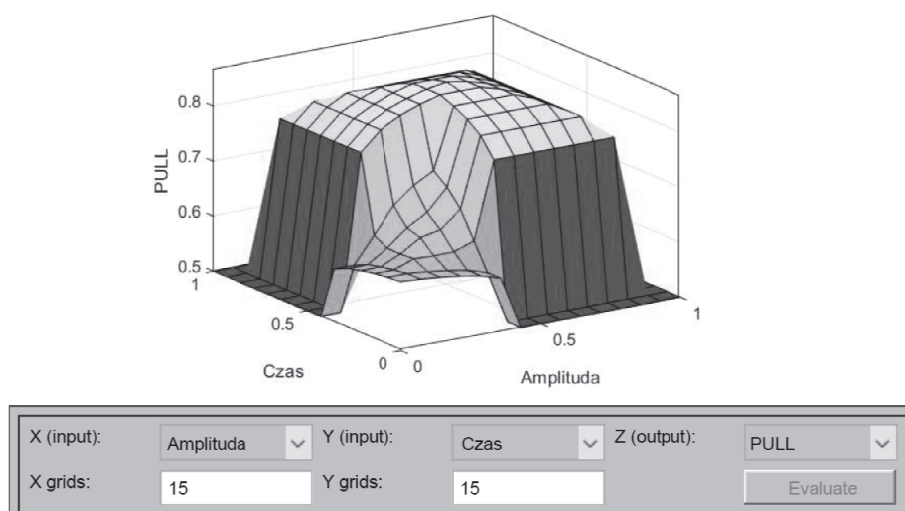


Rys. 6. Graficzna ilustracja procesu wnioskowania (agregacji konkluzji reguł)

Odpowiedź układu z wartościami rozmytymi można uzyskać również w kategoriach lingwistycznych, jeśli implikacja i agregacja również posługuje się tymi kategoriami. Wnioskowanie rozmyte na podstawie założonych reguł pokazane jest na rys. 6. W wyniku agregacji konkluzji wszystkich reguł uzyskuje się wynikową wartość (wyjściową) przynależności $\mu_y(y)$ dla modelu, którą określa zbiór wynikowy rozmyty. Defuzyfikacja zbioru rozmytego uzyskanego jako wynik wnioskowania, to określenie ostrej wartości y^* reprezentującej ten zbiór. Istnieje wiele metod defuzyfikacji. Metodą najczęściej wybieraną jest metoda

środka maksimum, środka ciężkości i środka sum. W niniejszym modelu zastosowano metodę środka maksimum.

W celu zilustrowania zależności pomiędzy wejściami, a wyjściami opracowanego modelu procesu zgrzewania ultradźwiękowego można posłużyć się funkcją Matlab'a *gensurf* umożliwiającą tworzenie wykresów powierzchniowych. Przykładowy wykres tego typu ilustrujący zależność rozrywania (F_{pull}) od amplitudy i czasu zgrzewu pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Wykres płaszczyznowy ilustrujący zależność siły rozrywania (PULL) w funkcji amplitudy drgań oraz czasu zgrzewu

Na podstawie przeprowadzonych badań metodą przeglądu statystycznego określono optymalne parametry procesu zgrzewania:

- amplituda drgań $A_{\text{opt}} = 28,5 \mu\text{m}$;
- ciśnienie podczas zgrzewania $P_{\text{zopt}} = 20,26 \text{ Psi}$;
- czas zgrzewania $t_{\text{zopt}} = 0,58 \text{ sek}$.

Powyższe wartości parametrów wejściowych pozwalają uzyskać maksymalnie wysokie wartości sił zrywania ($F_{\text{pull}} = 150,37\text{N}$) oraz siły rozciągania ($F_{\text{pill}} = 56,09\text{N}$) przy jednoczesnym skróceniu czasu zgrzewania. Uzyskanie takich wysokich parametrów zgrzewu ultradźwiękowego gwarantuje trwałe i poprawne połączenie powierzchni przewodów co jest gwarancją wysokiej jakości wyboru.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że pomimo dużej złożoności procesu zgrzewania ultradźwiękowego (tj. nieliniowego charakteru

wpływu poszczególnych parametrów procesu) możliwe jest opracowanie efektywnego modelu pozwalającego na wiarygodne określenie parametrów wyjściowych. W bieżącym etapie badań do zbudowania modelu wykorzystano elementy logiki rozmytej oraz komputerowo wspomagane metody statystyczne. Przeprowadzone badania eksperymentalne pokazują, że wpływając na główne parametry procesu zgrzewania ultradźwiękowego możemy w znaczący sposób wpływać na jakość wyboru końcowego.

LITERATURA

- [1] Jones J.B., Elmore W.C., De Frisco C.F., Method and apparatus employing vibratory energy for bonding metals, Aeroprojects Inc., Assignee, U.S. Patent, 2,946,119, (1960).
- [2] Satpathy M.P., Moharana B.R., Dewangan S., Sahoo S.K., Modeling and optimization of ultrasonic metal welding on dissimilar sheets using fuzzy based genetic algorithm approach., Engineering Science and Technology, an International Journal 18 (2015), pp. 634–647.
- [3] VersaGraphiX WSX Ergo Instrukcja obsługi DCM00059 Rev. Pierwsze wydanie Wersja oprogramowania 24.0. American Technology.
- [4] <https://www.emerson.com/documents/automation/learn-more-2032s-ultrasonic-welding-system-branson-en-us-164748.pdf>, dostęp z dnia 2019.02.01.
- [5] Elangovan S., Prakasan K., Jaiganesh V., Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 51 (1e4) (2010), pp. 163–171.
- [6] Kao C.C., Shih A.J., Miller S.F., Fuzzy logic control of microhole electrical discharge machining, J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME 130 (6) (2008), 0645021-0645026.
- [7] Tzeng Y., Chen F., Multi-objective optimisation of high-speed electrical discharge machining process using a taguchi fuzzy-based approach, Mater. Des. 28 (4) (2007), pp. 1159–1168.
- [8] <http://www.conductivity-app.org/download-alloy-pdf/33>, dostęp z dnia 2019.02.01.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF ULTRASONIC COPPER WIRES USING FUZZY LOGIC APPROACH

Ultrasonic welding has been used in the market over the past thirty years. Very short time, low energy consumption, repeatability and lack of additional materials and operations during the connection process are key reasons for which this technology has been found advantageous in the mass production. Nevertheless the problems faced by industry regarding to ultrasonic welding are the poor weld quality and low strength of the joints surface when the welding parameters are incorrect. In this paper, the control parameters like vibration amplitude, weld pressure and weld time are considered for the welding and copper wires (Cu-ETP1). Experiment is conducted according to the fractional design

with replications to get the responses like tensile shear stress and T-peel stress and weld area. Measured data are utilized to develop fuzzy logic model between responses and predictors. As a quality is an very important issue in these manufacturing industries, the optimal combinations of these parameters are found using fuzzy logic approach.

(Received: 21.02.2019, revised: 07.03.2019)