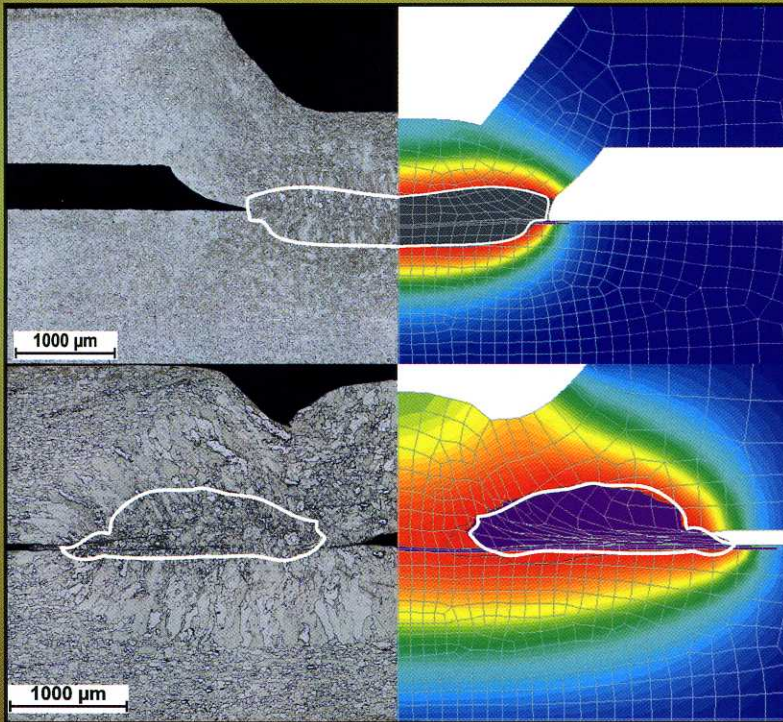




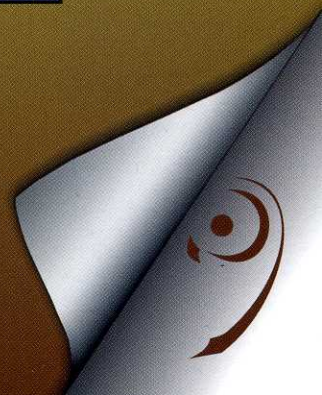
Zygmunt MIKNO

ANALIZA PROCESU ZGRZEWANIA REZYSTANCYJNEGO Z ELEKTROMECHANICZNYM DOCISKIEM ELEKTROD



GLIWICE 2018

MONOGRAFIA



SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	9
OKREŚLENIA I TERMINY	11
1. WSTĘP	13
Wprowadzenie	14
Motywacja	14
Cel badań	16
Zakres badań i założenia	18
Zawartość monografii	19
2. ZGRZEWANIE REZYSTANCYJNE W ASPEKCIE SIŁY DOCISKU ELEKTROD	22
3. CHARAKTERYSTYKA PNEUMATYCZNEGO SYSTEMU DOCISKU (SPD)	27
3.1. Pneumatyczny system sterowania siłą docisku w zgrzewarce rezystancyjnej	27
3.2. Model komputerowy pneumatyki pozycjonowania	27
3.3. Badania eksperymentalne pneumatyki narastania siły	31
3.4. Podsumowanie	33
4. CHARAKTERYSTYKA ELEKTROMECHANICZNEGO SYSTEMU DOCISKU (SED)	34
4.1. Elektromechaniczne sterowanie siłą docisku	34
4.2. Model komputerowy elektromechanicznego sterowania siłą docisku	35
4.3. Dynamika układu elektromechanicznego docisku	37
4.4. Porównanie dwóch systemów docisku – SED i SPD	39
4.5. Podsumowanie	39
5. STAN AKTUALNY ZAGADNIENIA	41
5.1. Etapy rozwoju zgrzewania rezystancyjnego	41
5.2. Przegląd stosowanych rozwiązań zgrzewarek	44
5.3. Wady i zalety istniejących rozwiązań zgrzewarek	46
5.4. Oczekiwania odbiorcy końcowego	48
5.5. Aktualne kierunki rozwoju	49
5.6. Niedogodności pneumatycznego docisku elektrod	50
5.7. Aplikacje praktyczne i badania w zakresie elektromechanicznego docisku elektrod	54
5.8. Podsumowanie	59
6. MODELOWANIE PROCESU ZGRZEWANIA	61
6.1. Wprowadzenie	61
6.2. Oprogramowanie do obliczeń numerycznych – SORPAS	64
6.3. Funkcje i możliwości oprogramowania SORPAS	65
6.4. Podsumowanie	68
7. IDEA OPTYMALIZACJI PROCESU ZGRZEWANIA Z ZASTOSOWANIEM SED	69
7.1. Wprowadzenie	69
7.2. Istota sterowania SED	70

7.3. Optymalizacja procesu zgrzewania rezystancyjnego z SED.....	73
7.4. Podsumowanie	75
8. BADANIA WŁASNE.....	76
8.1. Zgrzewanie garbowe blach na zakładkę z wytłoczonym garbem	76
8.1.1. Metodyka badań numerycznych i eksperymentalnych.....	77
8.1.1.1. Obliczenia MES	77
8.1.1.2. Model numeryczny	77
8.1.1.3. Parametry procesu.....	78
8.1.1.4. Badania eksperymentalne	80
8.1.2. Optymalizacja procesu	82
8.1.3. Wyniki.....	83
8.1.3.1. Wyniki obliczeń MES	83
8.1.3.2. Wyniki badań eksperymentalnych	87
8.1.3.3. Badania ultradźwiękowe zgrzein garbowych.....	89
8.1.3.4. Badania zgrzein garbowych metodą tomografii komputerowej.....	89
8.1.4. Dyskusja	90
8.1.4.1. Obliczenia MES	90
8.1.4.2. Weryfikacja eksperymentalna	92
8.1.4.3. Porównanie wyników	95
8.1.5. Podsumowanie.....	97
8.2. Zgrzewanie garbowe prętów na krzyż.....	98
8.2.1. Metodyka badań numerycznych i eksperymentalnych.....	98
8.2.1.1. Obliczenia MES	98
8.2.1.2. Model numeryczny (MES).....	98
8.2.1.3. Parametry procesu	99
8.2.1.4. Badania eksperymentalne.....	101
8.2.2. Optymalizacja procesu	102
8.2.3. Wyniki.....	103
8.2.3.1. Wyniki obliczeń MES	103
8.2.3.2. Wyniki badań eksperymentalnych	107
8.2.4. Dyskusja.....	108
8.2.4.1. Obliczenia MES	108
8.2.4.2. Badania eksperymentalne.....	110
8.2.4.3. Porównanie wyników	110
8.2.5 Optymalizacja procesu zgrzewania garbowego na przykładzie zgrzewania prętów na krzyż	110
8.2.6. Podsumowanie.....	113
8.3. Zgrzewanie garbowe śrub i nakrętek.....	114
8.3.1. Metodyka badań numerycznych i eksperymentalnych.....	114
8.3.1.1. Obliczenia MES	115
8.3.1.2. Model numeryczny	115
8.3.1.3. Parametry procesu	116
8.3.1.4. Badania eksperymentalne.....	117
8.3.2. Optymalizacja procesu	119
8.3.3. Wyniki.....	120
8.3.3.1. Wyniki obliczeń MES	120
8.3.3.2. Wyniki badań eksperymentalnych	124

8.3.3.3. Filmowanie procesu	128
8.3.4. Dyskusja	129
8.3.4.1. Obliczenia MES	129
8.3.4.2. Badania eksperymentalne	131
8.3.4.3. Porównanie wyników	137
8.3.5. Podsumowanie	142
8.4. Zgrzewanie punktowe dwustronne blach na zakładkę	144
8.4.1. Metodyka badań numerycznych i eksperymentalnych	144
8.4.1.1. Obliczenia MES	144
8.4.1.2. Model numeryczny	144
8.4.1.3. Parametry procesu	145
8.4.1.4. Badania eksperymentalne	147
8.4.2. Optymalizacja procesu	147
8.4.3. Wyniki	148
8.4.3.1. Wyniki obliczeń numerycznych	148
8.4.3.2. Wyniki badań eksperymentalnych	149
8.4.4. Dyskusja	149
8.4.4.1. Obliczenia MES	149
8.4.4.2. Weryfikacja eksperymentalna	150
8.4.4.3. Porównanie wyników	150
8.4.5. Podsumowanie	150
9. STANOWISKA BADAWCZE ZGRZEWAREK Z ELEKTROMECHANICZNYM DOCISKIEM	152
9.1. Zgrzewarka inwertorowa z SED typu ELMO (DC 1 kHz, 10 kA, 30 kN)	153
9.2. Zgrzewarka z SED typu FESTO (AC 50 Hz, 20 kA, 15 kN)	154
9.3. Zgrzewarka inwertorowa z SED typu FESTO (DC 10 kHz, 7 kA, 2 kN)	155
10. PODSUMOWANIE WYNIKÓW I WNIOSKI KOŃCOWE	156
10.1. Innowacyjność rozwiązania, osiągnięcia naukowe i użyteczne	157
10.2. Wykorzystanie wyników badań w praktyce	160
10.3. Zalecenia dla praktyki inżynierskiej	161
10.4. Planowane dalsze kierunki badań	162
10.5. Wyniki i uwagi końcowe	163
BIBLIOGRAFIA	166
DODATEK	175
D1. Dane do modelu numerycznego zgrzewania garbowego blach z wytłoczonym garbem	175
D2. Dane do modelu numerycznego zgrzewania prętów na krzyż	177
D3. Dane do modelu numerycznego zgrzewania śrub i nakrętek	179
D4. Dane do modelu numerycznego zgrzewania punktowego dwustronnego blach na zakładkę	180
D5. Symulacje systemu pneumatycznego docisku (SPD)	181
D6. Przyrząd do pomiaru parametrów procesu zgrzewania LogWeld	183
D7. Aparatura do badań ultradźwiękowych	184
D8. Aparatura do badań tomografii komputerowej	184
Spis rysunków w języku angielskim	185
Streszczenie	189

1. WSTĘP

Zgrzewanie rezystancyjne jest procesem złożonym, w którym można wyróżnić dwa zbiory wielkości, oddziałujące jednocześnie na jego przebieg. Są to: przebieg prądu zgrzewania i przebieg siły docisku elektrod, które są wielkościami sterowanymi.

W monografii przeanalizowano kolejno wpływ wymienionych wielkości na proces zgrzewania. Badania prowadzono za pomocą analizy: teoretycznej i numerycznej (SORPAS) oraz eksperymentu. Ponadto znaczną uwagę poświęcono parametrowi siły docisku elektrod zgrzewarki, wytwarzanej na dwa sposoby: pneumatyczny i elektromechaniczny. Są to wybrane, reprezentatywne sposoby generacji siły docisku.

Analiza drugiego sposobu, tj. elektromechanicznego, jest dość rozbudowana i jak do tej pory nie napotkano informacji na temat takiego sposobu sterowania dociskiem elektrod zgrzewarki, jaki przedstawiono w monografii.

Naturalne ukierunkowanie analizy to optymalizacja procesu zgrzewania. Przeprowadzono badania optymalizacyjne dla różnych odmian zgrzewania rezystancyjnego, takich jak zgrzewanie: blach z wytłoczonym garbem, prętów na krzyż, śrub i nakrętek, punktowe dwustronne blach na zakładkę.

Optymalizacja w monografii rozumiana jest jako poprawa przestrzennego rozkładu gęstości mocy zgrzewania, szczególnie w obszarze styku pomiędzy materiałami zgrzewanymi, która prowadzona jest w odniesieniu do **systemu pneumatycznego (konwencjonalnego) docisku (SPD)**. W zaproponowanym i badanym, nowym rozwiązaniu sterowania dociskiem elektrod z wykorzystaniem **systemu elektromechanicznego docisku (SED)** wywierana jest mniejsza siła docisku elektrod. Przy mniejszej wartości siły rezystancja w styku pomiędzy materiałami zgrzewanymi jest wyższa, co przy takim samym prądzie zgrzewania powoduje intensywniejsze nagrzewanie i w efekcie intensywniejsze topienie materiałów zgrzewanych w porównaniu z SPD. Energia zgrzewania jest wyższa, co powoduje wydzielanie większej ilości ciepła i tym samym szybsze i intensywniejsze topienie materiału. W wyniku intensywniejszego nagrzewania optymalizacja może przybrać dwa kierunki – skrócenie/wydłużenie czasu zgrzewania lub zgrzewanie mniejszym prądem. W obydwu przypadkach zachowane jest kryterium jakości, tj. uzyskana jest ta sama średnica jądra, uzyskane jest pełne jądro zgrzeiny (pełne przetopienie), gdzie dotychczas dla SPD było to niemożliwe, gdyż obserwowano zgrzeinę pierścieniową lub przyklejenie. W procesie optymalizacji naturalnym ograniczeniem związanym z mniejszą wartością siły docisku

elektrod jest ekspulsja. Jednak przebieg siły jest odpowiednio modulowany, co zabezpiecza proces zgrzewania przed tym niekorzystnym zjawiskiem.

W monografii zawarto wyniki analizy aktualnego stanu zagadnienia. Ustalono zakres prezentowanej tematyki. Przedmiotem publikacji jest sterowanie dociskiem elektrod z wykorzystaniem systemu elektromechanicznego, w szczególności problematyka związana ze sterowaniem siłą lub/i przemieszczeniem elektrod.

Wprowadzenie

Systemem docisku powszechnie stosowanym w procesie zgrzewania rezystancyjnego jest system pneumatycznego docisku (SPD). W monografii jest on nazywany systemem konwencjonalnym, z uwagi na jego powszechne stosowanie w przemyśle oraz na prowadzone modyfikacje sterowania dociskiem elektrod w odniesieniu do takiego rozwiązania. SPD charakteryzuje się stosunkowo prostym sterowaniem za pomocą elektrozaworów (dwustanowych) lub zaworu proporcjonalnego. W uproszczeniu przebieg siły docisku powinien być taki, by: osiągnęła ona zadaną wartość przed przepływem prądu zgrzewania, utrzymywała ustabilizowaną wartość w czasie przepływu prądu, była wywierana przez określony czas po zaniku przepływu prądu aż do zakrzepnięcia materiału ciekłego jądra i uzyskania odpowiedniej wytrzymałości zgrzeiny. W zdecydowanej większości przypadków wartość siły jest stała w całym cyklu zgrzewania.

W odróżnieniu od SPD w monografii przeanalizowano możliwości, jakie daje alternatywny system elektromechanicznego docisku (SED), którego główną zaletą jest możliwość modulacji siły docisku w czasie cyklu zgrzewania, szczególnie w czasie przepływu prądu zgrzewania. To pozwala na: i) uzyskanie odpowiednio korzystniejszego przestrzennego rozkładu mocy zgrzewania, ii) wytwarzanie ciepła w najkorzystniejszym miejscu obszaru zgrzewania, tj. w styku pomiędzy materiałami zgrzewanymi, iii) intensywniejsze nagrzewanie i topienie materiału, iv) poprawę kształtu jądra i tym samym poprawę jakości zgrzeiny.

Motywacja

Podjęte badania znajdują umotywowanie w możliwościach, jakie dają dwie zasadnicze odmiany sterowania dociskiem elektrod i jakie są obecnie stosowane w zgrzewarkach rezystancyjnych.

Jednym ze sposobów docisku elektrod jest docisk pneumatyczny. Jest to najbardziej rozpowszechniony sposób sterowania siłą docisku elektrod, ale nie daje on możliwości wykonywania zgrzein o najlepszych możliwych parametrach (wytrzymałość, wgniot, wielkość jądra). W monografii system ten nazwano systemem konwencjonalnym (SPD), względem którego prowadzono optymalizację. Drugim sposobem wywierania docisku, który analizowano w podjętych badaniach, jest sterowanie dociskiem elektrod za pomocą systemu elektromechanicznego (serwomechanicznego) – SED. Co istotne, docisk w tym przypadku jest realizowany na dwa sposoby, tj. ze sterowaniem siłą lub/i przemieszczeniem elektrod.

Zasadnicza różnica, zdefiniowana przez Autora monografii, a będąca przedmiotem badań, pomiędzy dociskami pneumatycznym i elektromechanicznym polega na tym, że:

- SPD pozwala na zadawanie ciśnienia w cylindrze siłownika zgrzewarki. Ciśnienie to przekłada się na stałą siłę docisku w czasie zgrzewania. Parametrem zadany jest siła docisku, a parametrem wynikowym jest przemieszczenie elektrod. Wynikiem oddziaływania stałej (zadanej) siły docisku elektrod w procesie zgrzewania jest przemieszczenie elektrod, które nie jest w żaden sposób sterowane. Jest ono wynikiem wzajemnego oddziaływania siły docisku elektrod, wartości prądu i czasu jego przepływu oraz dodatkowo właściwości materiału zgrzewanego, w tym jego grubości, rezystancji właściwej, przewodności cieplnej, ciepła właściwego oraz kształtu elektrod (powierzchni roboczej). W czasie zadawania ciśnienia ruch elektrod charakteryzuje się dużą inercją, a w czasie przepływu prądu i po jego zaniku brakiem możliwości sterowania przemieszczeniem elektrod. Efektem tego jest np. niekontrolowany, nadmierny wgniot elektrod w materiał zgrzewany. Z uwagi na dużą inercję ruchu elektrod, w zdecydowanej większości aplikacji praktycznych siła docisku ma stałą zadaną wartość w czasie przepływu prądu, ale również w całym zakresie cyklu zgrzewania.
- SED umożliwia pracę w dwóch trybach, tj. z zadaną siłą docisku lub zadanym przemieszczeniem elektrod.
 - W trybie pracy z *zadaną siłą* (elektrod) możliwe jest nastawienie różnych wartości siły docisku w poszczególnych przedziałach cyklu zgrzewania, ale najistotniejsza jest modulacja parametru siły w przedziale głównym zgrzewania, tj. w czasie przepływu prądu. Rzeczywiście, możliwe zmiany wartości siły docisku w czasie procesu zgrzewania charakteryzują się zdecydowanie mniejszym opóźnieniem (kilkukrotnym) w stosunku do systemu pneumatycznego (200 ÷ 300 ms – SPD, 50 ms – SED). Sam jednak charakter pracy podobny jest do systemu pneumatycznego, tj. zadaną jest wartość siły.
 - W trybie pracy z *przemieszczeniem* (elektrod) zadaną jest prędkość przesuwu elektrod w czasie, co oznacza konkretną wartość przemieszczenia elektrod(y) w czasie realizowanego przedziału czasu cyklu zgrzewania. W tym trybie pracy nie obserwuje się opóźnień w wykonywaniu poszczególnych, następujących po sobie przedziałów cyklu zgrzewania, co pozwala na realizację bardzo szybkich ruchów elektrod bez

opóźnień pomiędzy przedziałami cyklu. To okazuje się bardzo przydatne w technologii zgrzewania rezystancyjnego, szczególnie garbowego.

W trybie pracy z przemieszczeniem następuje zasadnicza zmiana, dotycząca wzajemnej relacji pomiędzy przemieszczeniem a siłą (docisku) elektrod w procesie zgrzewania. Zadawane jest przemieszczenie, a wynikiem jest siła docisku. Zmienia to całkowicie możliwości wykorzystania SED w procesie zgrzewania, szczególnie zgrzewania garbowego.

Z uwagi na zdecydowane zalety elektromechanicznego docisku istnieje potrzeba kompleksowego przebadania zgrzewania rezystancyjnego, szczególnie garbowego, ze względu na nowy sposób sterowania siłą lub/i przemieszczenia elektrod, które stanowią motywację do podjęcia badań przedstawionych w niniejszej pracy. Przeprowadzenie proponowanych badań podyktowane jest potrzebami naukowymi i użytkowymi, a ich wyniki rozszerzają wiedzę w zakresie technologii zgrzewania dotyczącej odmiennego systemu sterowania siłą lub/i przemieszczenia elektrod.

Możliwe jest takie nowatorskie sterowanie przemieszczeniem elektrod, które może zrewolucjonizować i zmienić utarte, dotychczasowe poglądy na temat przebiegu procesu zgrzewania rezystancyjnego oraz znacząco wpłynąć na rozwój dyscypliny naukowej (zgrzewanie) zarówno w kraju, jak i na świecie [54]. Nowatorskie sterowanie wpływa również w zdecydowany sposób na poprawę jakości procesu [49, 58].

Wszystkie powyższe argumenty stanowią motywację do podjęcia badań w ww. zakresie.

Cel badań

Celem badań była optymalizacja konwencjonalnego procesu zgrzewania rezystancyjnego z SPD w wyniku zastosowania SED i odpowiednich algorytmów sterowania dociskiem elektrod. Optymalizacja pozwoliła na poszerzenie okna dotychczasowych parametrów zgrzewania i poprawę jakości wykonywanych połączeń. Wyeliminowane zostały dotychczasowe niedogodności zgrzewania, szczególnie charakterystyczne dla zgrzewania garbowego, którymi są niepełne jądro zgrzeiny czy połączenie w stanie stałym z minimalną strefą przetopienia w styku materiałów zgrzewanych.

Zastosowanie SED pozwoliło na korzystniejszy rozkład mocy zgrzewania. Dzięki temu możliwe było zgrzewanie z mniejszym prądem (w zależności od potrzeby) zarówno w krótszym, jak i dłuższym czasie. W tym przypadku długość czasu zgrzewania uzależniona jest od rodzaju zgrzewania (punktowe, garbowe) oraz kierunku przyjętej optymalizacji.

SED wymaga dodatkowo odpowiedniego sterowania, które polega na odmiennym sterowaniu ruchem elektrod, dosłownie sterowaniu przemieszczeniem elektrod zamiast typowego sterowania siłą docisku elektrod jak w przypadku SPD. Założono sprawdzenie

przydatności nowatorskiego sterowania przemieszczeniem elektrod, które może zmienić dotychczasowe podejście do zagadnienia sterowania siłą lub/i przemieszczeniem elektrod, szczególnie w czasie przepływu prądu zgrzewania. W wyniku zastosowania nowego rozwiązania spodziewana jest znacząca poprawa jakości połączeń zgrzewanych.

Na podstawie analizy literaturowej oraz badań własnych określono cele naukowe i użytkowe.

Za cele naukowe monografii przyjęto opracowanie modeli numerycznych procesu zgrzewania rezystancyjnego i dogłębne poznanie oraz wyjaśnienie zjawisk w nim zachodzących, zarówno dla konwencjonalnego systemu docisku elektrod (SPD), jak i nowo opracowanego SED. W ramach pracy zbadano wpływ nowego sposobu sterowania dociskiem elektrod, szczególnie w czasie przepływu prądu zgrzewania. Badania obejmowały poznanie zjawiska generacji mocy zgrzewania i wydzielania ciepła w zależności od parametrów cyklu zgrzewania, w tym siły docisku i przemieszczenia elektrod. Aby osiągnąć założony cel, przeprowadzono analizę teoretyczną, analizę numeryczną (SORPAS) i badania eksperymentalne (technologiczne próby zgrzewania) dla kilku reprezentatywnych typów zgrzewania garbowego (blach z wytłoczonym garbem, prętów na krzyż, śrub i nakrętek) oraz zgrzewania punktowego.

Jako cele użytkowe monografii przyjęto opracowanie i wykonanie stanowisk badawczych zgrzewarek z SED oraz nowych algorytmów sterowania dociskiem elektrod według wytycznych uzyskanych na podstawie analizy wyników obliczeń numerycznych.

Dla osiągnięcia ww. celów pracy zrealizowano poniższe zadania cząstkowe:

- 1) opracowanie modeli numerycznych zgrzewania: garbowego (blach z wytłoczonym garbem, prętów na krzyż, śrub i nakrętek) i punktowego blach na zakładkę dla konwencjonalnego SPD i nowo opracowanego SED,
- 2) przeprowadzenie obliczeń numerycznych dla konwencjonalnego SPD i sterowania siłą docisku elektrod,
- 3) przeprowadzenie technologicznych prób zgrzewania i badań wytrzymałościowych, metalograficznych oraz innych dla SPD celem późniejszej analizy porównawczej z SED,
- 4) przeprowadzenie obliczeń numerycznych i optymalizacja procesu zgrzewania z zastosowaniem SED i nowych algorytmów sterowania dociskiem elektrod opartych na nowym sposobie sterowania z przemieszczeniem elektrod, szczególnie w czasie przepływu prądu zgrzewania,
- 5) analiza porównawcza wyników obliczeń numerycznych SPD i SED oraz sformułowanie wytycznych technologii zgrzewania z SED,
- 6) opracowanie i wykonanie stanowisk badawczych zgrzewarek z SED,
- 7) opracowanie technologii zgrzewania wraz z różnymi algorytmami sterowania dociskiem elektrod zgrzewarki z SED i ww. rodzajów zgrzewania,
- 8) wykonanie technologicznych prób zgrzewania dla czterech wybranych rodzajów zgrzewania,

- 9) ocena jakości wykonanych złączy za pomocą badań: i) wytrzymałościowych (ścinanie, wyłuskanie, skręcanie), ii) twardości, iii) metalograficznych, iv) ultradźwiękowych, v) tomografii komputerowej,
- 10) analiza wyników technologicznych prób zgrzewania oraz sformułowanie wytycznych zgrzewania z nowym SED,
- 11) analiza porównawcza wyników obliczeń numerycznych i technologicznych prób zgrzewania z SPD i SED oraz przedstawienie zalet nowego sposobu sterowania z SED.

Zakres badań i założenia

Badania dotyczą problematyki związanej z dociskiem elektrod w procesie zgrzewania rezystancyjnego. Analizowano dwa systemy docisku – pneumatyczny oraz elektromechaniczny, nazywany również serwomechanicznym. Proces zgrzewania z konwencjonalnym pneumatycznym systemem docisku (SPD) optymalizowano z wykorzystaniem nowego systemu elektromechanicznego (SED).

Zasadniczym założeniem przyjętym w monografii była poprawa przestrzennego rozkładu mocy zgrzewania polegająca na zwiększeniu gęstości mocy i tym samym gęstości energii, w najistotniejszym – z punktu widzenia tworzenia zgrzeiny – miejscu, tj. w styku elementów zgrzewanych i obszarach do niego bezpośrednio przyległych. Założono, że efekt ten, z uwagi na różne tryby pracy systemu elektromechanicznego, zostanie osiągnięty przez zmniejszenie siły docisku i spowolnienie prędkości przesuwu elektrody ruchomej, tj. zmniejszenie wartości przemieszczenia. Zarówno mniejsza wartość siły docisku, jak i mniejsze przemieszczenie elektrod powodują zwiększenie rezystancji kontaktu materiałów zgrzewanych będących w styku, które – przy założeniu stałej (takiej samej jak dla SPD) wartości przepływającego prądu – powodują generowanie pożądanego wyższej mocy zgrzewania. Wyższa moc w tym obszarze oznacza uzyskanie wyższej wytrzymałości złączy zgrzewanych, co było jednym z elementów optymalizacji.

Proces zgrzewania został przebadany z wykorzystaniem analizy: teoretycznej, numerycznej i badań eksperymentalnych. Z uwagi na to, że cały proces zgrzewania jest silnie nieliniowy, teoretyczny model musi być uproszczony. Posłużono się modelem komputerowym, który na ogół jest polowy typu ANSYS, SORPAS, SYSWELD. W publikacji wykorzystano modelowanie SORPAS [130-131] firmy SWANTEC [146].

Zawartość monografii

Monografia pt. *Analiza procesu zgrzewania rezystancyjnego z elektromechanicznym dociskiem elektrod* ma następującą strukturę. W rozdziale 2 przedstawiono istotę zagadnienia, tj. charakterystykę zgrzewania rezystancyjnego. Jest to proces, w którym ciepło jest wytwarzane (generowane) w wyniku przepływającego prądu zgrzewania przez poszczególne elementy obszaru zgrzewania. Ilość wytworzonego ciepła zależy od wartości i czasu przepływu prądu, ale również od siły docisku elektrod, tj. jej wartości i zmienności w czasie. W wyniku oddziaływania ww. czynników następuje silne nagrzanie obszaru styku łączonych elementów metalowych, przy czym ma miejsce silne ich uplastycznienie lub/i stan ciekły [6]. Aspekt badawczy ukierunkowany (skupiony) był na sterowanie dociskiem elektrod realizowanym w nowatorski sposób z wykorzystaniem SED i sterowania przemieszczeniem elektrod.

W rozdziałach 3 i 4 przedstawiono kolejno charakterystykę analizowanych systemów docisku, tj. pneumatycznego (SPD) i elektromechanicznego (SED). Przeanalizowano i przedstawiono właściwości dynamiczne systemów docisku, szczególnie opóźnienia występujące w czasie zmiany zadanej wartości siły pomiędzy poszczególnymi przedziałami cyklu zgrzewania. Czasy te decydują o możliwości zastosowania i wykorzystania systemu docisku do wybranego typu zgrzewania i prowadzenia procesu zgrzewania z modulacją siły docisku elektrod. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych oraz badań eksperymentalnych dynamiki układów SPD i SED. Rozdziały te stanowią w całości badania własne Autora, których metodyka badań i analiza wyników stanowią oryginalny wkład w rozwój systemów sterowania dociskiem elektrod w procesie zgrzewania rezystancyjnego. W dostępnej literaturze nie napotkano takich informacji i przedstawionych w taki sposób, w jaki zostały opisane i przeanalizowane przez Autora monografii.

W rozdziale 5 dokonano przeglądu stanu aktualnego zagadnienia zarówno w zakresie SPD, jak i SED. Przedstawiono niedogodności wynikające z zastosowania SPD w zgrzewaniu rezystancyjnym. W zakresie SED skoncentrowano się na zastosowanych aplikacjach systemu docisku do różnych odmian zgrzewania i materiałów zgrzewanych oraz przedstawiono dorobek własny Autora w tym zakresie. Przedstawiono również nowatorskie rozwiązanie Autora, tj. sterowanie przemieszczeniem elektrod w czasie przepływu prądu zgrzewania, a także nowego, tzw. *hybrydowego* algorytmu sterowania siłą lub/i przemieszczeniem elektrod. Sterowanie przemieszczeniem elektrod jest nowatorskim rozwiązaniem zastosowanym przez Autora. W dostępnej literaturze nie napotkano informacji o takim sposobie sterowania jaki został zaprezentowany w monografii.

W rozdziale 6 przedstawiono podstawowe informacje dotyczące oprogramowania SORPAS [10, 130-131], które zostało wykorzystane przez Autora do przeprowadzenia obliczeń numerycznych. Zaprezentowano również wybrane możliwości oprogramowania

w zakresie: i) budowy modelu obliczeniowego, ii) interfejsu użytkownika do wprowadzania parametrów zadanych cyklu zgrzewania, iii) analizy wyników w postaci przebiegów parametrów charakterystycznych oraz rozkładu przestrzennego, w tym temperatury, gęstości prądu, mocy objętościowej, iv) badań wytrzymałościowych złączy uzyskanych na drodze obliczeń (rozciąganie, wyłuskanie, odrywanie, skręcanie) [60]. Przedstawiono rys historyczny i rozwój oprogramowania SORPAS wraz z szeroką listą użytkowników na całym świecie, co ma na celu zaprezentowanie oprogramowania jako w pełni profesjonalnego, powszechnie stosowanego narzędzia do obliczeń numerycznych, przeznaczonego w szczególności do zgrzewania rezystancyjnego.

W rozdziale 7 przedstawiono istotę optymalizacji procesu zgrzewania rezystancyjnego, która polega na zastosowaniu SED i odpowiedniego algorytmu sterowania siłą lub/i przemieszczeniem elektrod. Idea optymalizacji polega na wywieraniu mniejszej siły docisku zarówno przed, jak i w czasie przepływu prądu zgrzewania w porównaniu z SPD. Dla SPD zadawana jest siła docisku elektrod, a przemieszczenie jest wynikiem działania tej siły. Natomiast dla SED sterowane jest przemieszczenie elektrod, a wynikiem jest siła docisku. Jest to całkowicie nowe podejście do sterowania dociskiem elektrod, które zmienia dotychczasowe poglądy na temat procesu zgrzewania rezystancyjnego.

W kolejnej części pracy (rozdz. 8) przedstawiono zasadnicze wyniki badań, tj. wyniki obliczeń numerycznych dla porównywanych dwóch systemów docisku SPD i SED. Przedstawiono wyniki dla kilku wybranych typów zgrzewania: i) garbowego blach z wytłoczonym garbem, ii) garbowego prętów na krzyż, iii) garbowego śrub i nakrętek, iv) punktowego dwustronnego blach na zakładkę. Dla wybranych odmian zgrzewania przedstawiono również weryfikację eksperymentalną (technologiczne próby zgrzewania), która obejmowała badania metalograficzne, wytrzymałościowe, twardości, wyłuskanie, ultradźwiękowe i tomografii komputerowej. Rejestrowano również parametry charakterystyczne procesu zgrzewania, tj. prąd i napięcie zgrzewania, ale najistotniejsze z punktu widzenia optymalizacji procesu były przebiegi siły docisku i przemieszczenia elektrod. Oprócz różnych wariantów sterowania dociskiem elektrod zaprezentowano także odmienne podejścia do optymalizacji procesu z zastosowaniem SED, dla mniejszego prądu zgrzewania, skrócenia/wydłużenia czasu przepływu prądu, wydłużenia czasu up-slope.

W rozdziale 9 przedstawiono stanowiska badawcze zaprojektowane, opracowane i wykonane w ramach projektów badawczych i badań własnych Instytutu Spawalnictwa [134, 136-137]. Realizacja prac były nadzorowana i kierowana przez Autora monografii. Stanowiska zgrzewarek z SED wraz ze specjalnymi algorytmami sterowania siłą lub/i przemieszczeniem elektrod są jedynymi takimi rozwiązaniami w kraju. Na tych stanowiskach badawczych zgrzewarek przeprowadzono wszystkie zaprezentowane w pracy technologiczne próby zgrzewania.

Rozdziały 3, 4, 7 ÷ 9 stanowią oryginalne badania własne Autora pracy.

W rozdziale 10 podsumowano uzyskane wyniki badań. Przedstawiono innowacyjność technologiczną rozwiązania, osiągnięcia naukowe i użyteczne wynikające z wykonanych prac, tj. obliczeń numerycznych, technologicznych prób zgrzewania oraz przeprowadzonych badań porównawczych dwóch systemów docisku SPD i SED. Sformułowano zalecenia dla praktyki inżynierskiej związanej z zastosowaniem SED w technologii zgrzewania rezystancyjnego, wskazano najkorzystniejsze algorytmy sterowania dociskiem elektrod za pomocą sterowania siłą lub/i przemieszczeniem elektrod SED. Przedstawiono również kierunki dalszych badań dotyczące rozwoju elektromechanicznego docisku w zakresie technologii zgrzewania rezystancyjnego.

Ponadto na początku monografii zamieszczono zestawienie użytych ważniejszych oznaczeń, określeń i terminów. Na końcu, w dodatku, zamieszczono między innymi: i) dane materiałów zgrzewanych i elektrod oraz parametry niezbędne do obliczeń numerycznych zgrzewania rezystancyjnego w oprogramowaniu SORPAS, ii) przykładowe wyniki obliczeń oprogramowania FESTO i wyniki badań eksperymentalnych w zakresie analizy SPD, iii) opis funkcji i charakterystykę przyrządu LogWeld wykorzystywanego do pomiaru wielkości charakterystycznych procesu zgrzewania, iv) aparaturę do badań ultradźwiękowych i tomografii komputerowej.

Zamieszczono również spis rysunków w języku angielskim oraz streszczenia w językach polskim i angielskim.

ANALIZA PROCESU ZGRZEWANIA REZYSTANCYJNEGO Z ELEKTROMECHANICZNYM DOCISKIEM ELEKTROD

Streszczenie

Monografia dotyczy problematyki docisku elektrod w procesie zgrzewania rezystancyjnego. Przeanalizowano dwa reprezentatywne systemy: pneumatyczny (SPD) i elektromechaniczny (SED). Przeprowadzono analizę numeryczną i weryfikację eksperymentalną.

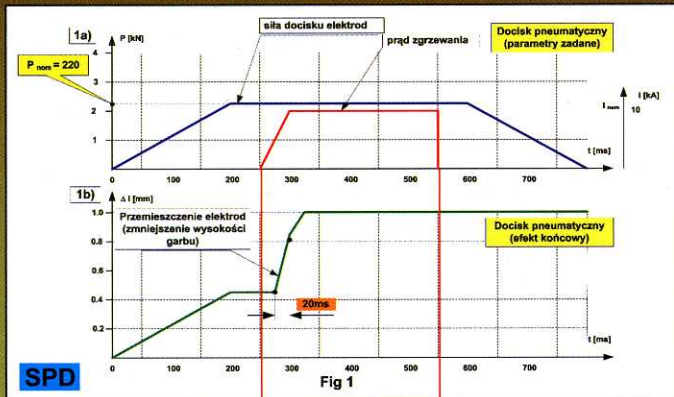
Cechą charakterystyczną konwencjonalnego SPD jest to, że siła docisku elektrod jest parametrem zadaniem, a wynikiem jest przemieszczenie elektrod. Z uwagi na dużą inercję mechaniczną układu pneumatycznego w czasie przepływu prądu nie ma możliwości sterowania ani przebiegiem siły, ani przemieszczeniem elektrod. Siła docisku dla SPD ma zazwyczaj stałą i niekorzystnie zbyt dużą wartość. Jest to powodem wielu niedogodności, takich jak: udarowe uderzenie elektrod, zgrzeina pierścieniowa, połączenie w stanie stałym (zgrzewanie garbowe), ekspulsja, wąskie okno parametrów zgrzewania. SPD poddano optymalizacji przez zastosowanie alternatywnego SED i specjalnego hybrydowego algorytmu sterowania siłą lub/i przemieszczeniem elektrod. Idea nowego sposobu sterowania z SED polega na wywarceniu mniejszej siły docisku przed przepływem prądu zgrzewania i sterowaniu przemieszczeniem elektrod w czasie jego przepływu. Takie nowatorskie podejście, w którym przemieszczenie elektrod jest parametrem zadaniem, a wynikiem jest modulowany przebieg siły docisku, może zrewolucjonizować i zmienić dotychczasowe poglądy na temat przebiegu procesu zgrzewania rezystancyjnego oraz znacząco wpłynąć na rozwój tej technologii zarówno w kraju, jak i na świecie. Efektem takiego sterowania jest poprawa przestrzennego rozkładu mocy zgrzewania polegająca na zwiększeniu gęstości prądu, tym samym zwiększeniu gęstości energii, w najistotniejszym (z punktu widzenia tworzenia zgrzeiny) miejscu, tj. w styku elementów zgrzewanych. Występują wówczas zdecydowanie korzystniejsze warunki, które pozwalają na intensyfikację nagrzewania i topienia materiałów zgrzewanych. W ten sposób wyeliminowano niedogodności charakterystyczne dla SPD, co w istotny sposób wpłynęło na wzrost jakości wykonywanych połączeń.

Metodyka badawcza polegała na opracowaniu modeli numerycznych dla kilku różnych odmian zgrzewania rezystancyjnego: blach z wytłoczonym garbem, prętów na krzyż, śrub i nakrętek, punktowego dwustronnego blach na zakładkę. Przeprowadzono obliczenia numeryczne celem dogłębnej analizy procesu zgrzewania z SPD. Następnie proces poddano optymalizacji przez zastosowaniem SED i specjalnego hybrydowego algorytmu sterowania. Opracowano i wykonano stanowiska badawcze zgrzewarek z SED. Dla ww. wariantów przeprowadzono weryfikację eksperymentalną. Przeprowadzone badania numeryczne i eksperymentalne wykazały możliwość poprawy procesu zgrzewania w aspekcie: uzyskania pełnego jądra zgrzeiny, eliminacji ekspulsji, zwiększenia wysokości i szerokości jądra zgrzeiny, większego wtopienia, wzrostu wytrzymałości zgrzeiny, poprawy jakości.

Optymalizacja procesu wykazała kilka istotnych zalet wynikających z zastosowania SED i algorytmów sterowania, w porównaniu z SPD. Do zalet należy zaliczyć: możliwość zgrzewania mniejszym prądem (mniejsza moc zgrzewarki), możliwość wydłużenia lub skrócenia czasu zgrzewania, w zależności od przyjętego kierunku optymalizacji, wymagana jest mniejsza siła docisku.

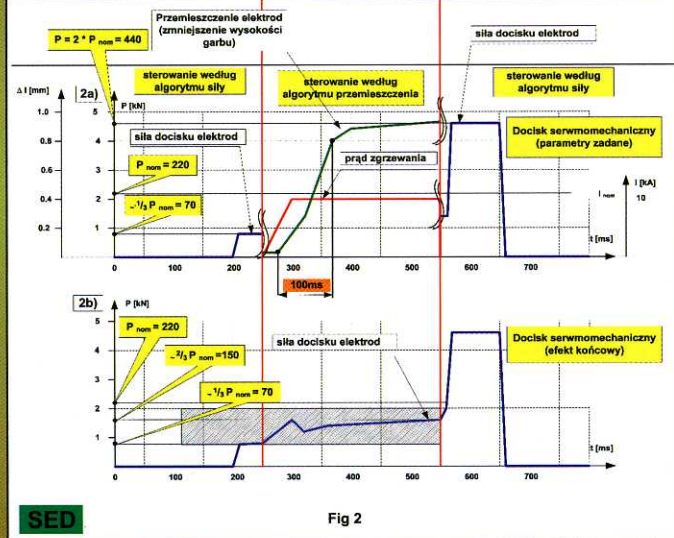
Nowa idea sterowania przemieszczeniem elektrod zmienia dotychczasowe podejście do technologii zgrzewania rezystancyjnego i znacząco wpłynie na rozwój tej dziedziny łączenia materiałów.

P.220870



P.228089

P.425968



P.412614

P.424725

ISBN 978-83-7880-587-8

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 5
 tel. (32) 237-13-81, faks (32) 237-15-02
www.wydawnictwopolitechniki.pl
 Dział Sprzedaży i Reklamy
 tel. (32) 237-18-48
 e-mail: wydawnictwo_mark@polsl.pl
<http://www.polsl.pl/jednostki/RJO2-WPS>