

Mateusz MOTYKA¹

Opiekun naukowy: Ireneusz WRÓBEL²

DOI: <https://doi.org/10.53052/9788366249837.17>

ANALIZA MES PROCESU ZGRZEWANIA ELEKTRYCZNEGO OPOROWEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono modelowanie procesu zgrzewania punktowego i porównanie wyników symulacji z wynikami rzeczywistych prób. Symulacje procesów zgrzewania związane są z koniecznością uzyskania odpowiednich parametrów modelu otrzymywanych na drodze badań zgrzein. Artykuł porusza problematykę wykonywania próbek i symulacji zbliżonych do kalibracyjnych, wykonywanych na potrzeby rzeczywistych procesów przemysłowych.

Słowa kluczowe: symulacje procesów spajania, MES, zgrzewanie rezystancyjne

SIMULATION OF THE SPOT WELDING PROCESS USING THE FEA

Summary: The article presents a method of modeling the spot welding process comparison of simulation results with the research results. The welding processes simulations are associated with obtain correct simulation parameters from research of testing welds. Article bring up a subject of performing calibration simulations which are performing for industrial processes.

Keywords: welding processes simulations, FEM, spot welding process

1. Wstęp

W procesach zgrzewania zachodzą procesy cieplne nagrzewania i chłodzenia złączy. Towarzyszą im zjawiska fizyczne i chemiczne takie jak topnienie, krystalizacja, przemiany metalurgiczne, zmiany struktury oraz obecność naprężeń i odkształceń. Zjawiska te decydują o własnościach połączenia, dlatego ich znajomość

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: CAD/CAM, email: mateuszmotyka96@gmail.com

² dr hab. inż., prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email: iwrobel@ath.bielsko.pl

oraz możliwość przewidywania są ważne w zastosowaniach praktycznych. W przemyśle zauważalny jest ciągły wzrost udziału procesów spajania, w tym coraz częściej materiałów takich jak stale o wysokiej wytrzymałości, stopy tytanu i stopy aluminium. Trudności występujące przy łączeniu tych materiałów na drodze procesów spajania wynikają często z niekorzystnych zmian mikrostruktury w strefie wpływu ciepła, co obniża własności użytkowe złączy. Zjawiska te są spowodowane procesami cieplnymi charakteryzowanymi przez pola temperatur i cykle cieplne punktów zgrzeiny i strefy wpływu ciepła. Wyznaczenie rozkładu temperatur i charakterystycznych wielkości cyklu cieplnego połączeń zgrzewanych pozwala na określenie przemian struktury oraz wielkości naprężeń i odkształceń.

Rozwój i coraz powszechniejsze stosowanie metod numerycznych w praktyce inżynierskie jest ściśle powiązane ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów. Umożliwia to modelowanie i symulowanie skomplikowanych zjawisk fizycznych, w tym typowych dla procesów spajania zjawisk przewodzenia ciepła. Do obliczania cykli cieplnych i pola temperatur najczęściej wykorzystuje się metodę elementów skończonych. W metodzie tej obszar zmian temperatur dzielony jest na skończoną liczbę elementów połączonych ze sobą w węzłach. [1, 2]

Symulacje rzeczywistych procesów przemysłowych zgrzewania związane są z koniecznością uzyskania odpowiednich parametrów modelu, otrzymywanych na drodze kolejnych badań próbnych zgrzein oraz symulacji ich wykonywania ze zmianą parametrów kalibracyjnych. Jest to zbiór ustawień parametrów kontaktów między częściami i geometriami elektrod. Zmiana tych wartości powoduje zmianę ilości energii doprowadzanej do miejsca połączenia, a co za tym idzie m.in. zmianę kształtu i wielkość jądra zgrzeiny uzyskanej na drodze symulacji. Podstawą do zmiany wartości parametrów są pomiary wartości geometrycznych zgładów metalograficznych rzeczywistych próbek aż do uzyskania podobnych wartości geometrycznych w wynikach symulacji. Tak określone wartości parametrów kontaktu (charakterystycznych dla danego procesu przemysłowego) stanowią ostateczny zestaw danych do przeprowadzenia symulacji procesu zgrzewania rzeczywistego procesu technologicznego danej części. Niniejszy artykuł porusza problematykę wykonywania próbek i symulacji połączeń, zbliżonych do próbek i symulacji kalibracyjnych wykonywanych na potrzeby rzeczywistych procesów przemysłowych.

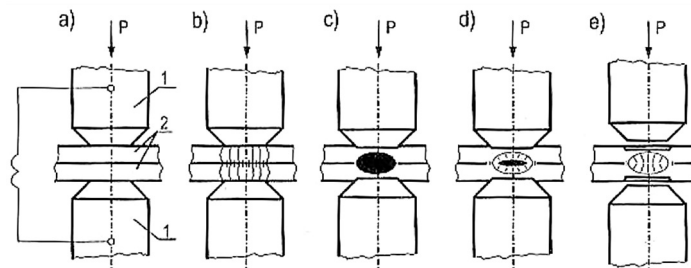
2. Zgrzewanie oporowe punktowe

Zgrzewanie rezystancyjne (oporowe) jest procesem polegającym na uzyskaniu trwałego połączenia w wyniku nagrzania obszaru styku łączonych elementów przepływającym przez nie prądem elektrycznym oraz odkształcenia plastycznego tego obszaru poprzez wywarcie siły docisku. Podczas zgrzewania rezystancyjnego występuje wiele złożonych zjawisk fizycznych takich jak: wydzielanie ciepła, transport masy i ciepła, przemiany fazowe struktur łączonych metali, odkształcenia metalu na zimno i na gorąco, topnienie i krystalizacja w obszarze zgrzewania, generacja i relaksacja naprężeń. Połączenie metali może być dokonywane w stanie stałym (w wyniku dyfuzji lub wzajemnego przekrystalizowania) bądź w stanie ciekłym (w wyniku utworzenia wspólnego jądra zgrzeiny). Zgrzewanie rezystancyjne punktowe jest podstawowym i najbardziej rozpowszechnionym sposobem zgrzewania stosowanym do większości metali konstrukcyjnych. Jest to proces

spajania płaskich elementów najczęściej w postaci blach tworzących złącze przylgowe (zakładkowe lub nakładkowe) zgrzeinami w formie oddalonych od siebie punktów. [2]

Cykl zgrzewania punktowego, niezależnie od rodzaju zgrzewanych metali i użytego do tego celu sprzętu zawsze składa się z trzech następujących po sobie etapów:

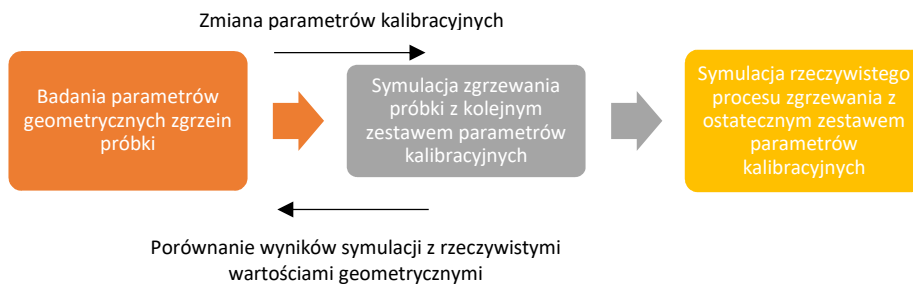
1. Dociśnięcie części łączonych elektrodami.
2. Nagrzewanie części łączonych wskutek przepływu prądu przez obszar zgrzewania.
3. Stygnięcie zgrzeiny i powstanie złącza po wyłączeniu prądu.



Rysunek 1. Etapy zgrzewania punktowego [1]: a) docisk łączonych blach, b) nagrzewanie łączonych części c) tworzenie się ciekłego jądra zgrzeiny, d) krzepnięcie jądra i stygnięcie zgrzeiny po wyłączeniu prądu, lecz pod dociskiem elektrod, e) usunięcie docisku – zakończenie cyklu zgrzewania

3. Próbkę połączeń

Do prawidłowego przeprowadzenia symulacji procesu zgrzewania rzeczywistej części, konieczne jest uzyskanie prawidłowych parametrów symulacji na drodze kolejnych badań próbnych zgrzein oraz symulacji ich wykonywania ze zmianą parametrów kalibracyjnych (aż do uzyskania podobnych wartości geometrycznych zgrzeiny i wyników symulacji).



Rysunek 2. Etapy przeprowadzania symulacji procesu zgrzewania

Próbki połączeń zgrzewanych łączących blachy stalowe wykonane zostały na przemysłowych urządzeniach zgrzewalniczych ze znanymi parametrami dobranymi

przez technologów pod kątem łączenia rzeczywistych części samochodowych produkowanych seryjnie. W poniższych tabelach zestawiono numer próbki, gatunek materiału i grubość blachy.

Tabela 1. Grubości i gatunki blach próbek

Numer próbki	Gatunek i grubość blachy 1	Gatunek i grubość blachy 2
1	S355 2,5 mm	TL4225 (22MnB5) 2 mm
2	TL4225 (22MnB5) 2 mm	TL4225 (22MnB5) 2 mm

Stal S355 jest niestopową stalą konstrukcyjną ogólnego zastosowania o zawartości węgla mniejszej lub równej 0,2%. Stosowana jest ona powszechnie na konstrukcje spawane, nitowane i łączone śrubami. Ze względu na sposób wytwarzania (całkowicie uspokojona) oraz niską zawartość węgla jest stalą o bardzo dobrej spawalności.

Stal TL4225 (22MnB5) jest natomiast gatunkiem stali przeznaczonym do formowania na gorąco. Jest to gatunek stali powszechnie stosowany w przemyśle samochodowym na elementy nośne i elementy bezpieczeństwa pojazdów. Ze stali TL4225 wykonywane są m.in. Belki przednie i belki tylnego zderzaka, wzmocnienia drzwi, słupki drzwiowe, wzmocnienia podłóg i dachów oraz belki poprzeczne dachu i deski rozdzielczej. [3]

Próbki przygotowano do pomiarów geometrycznych zglądów. Pierwszym krokiem było przecięcie próbek przez środek zgrzeiny. By nie wywołać zmian mikrostruktury (np. na skutek wysokiej temperatury lub zgniotu) cięcie zostało wykonane strumieniem wodno-ściernym.

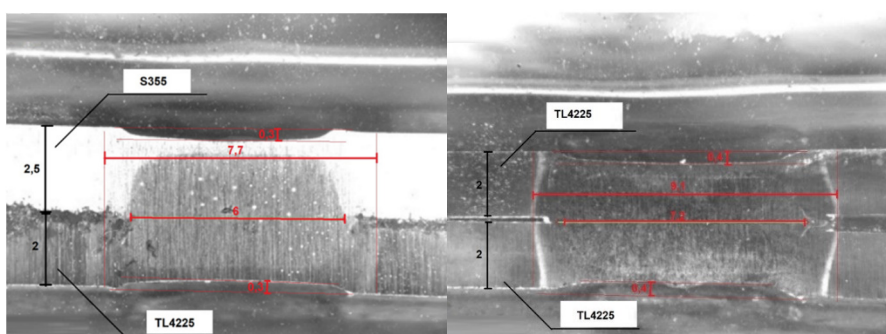


Rysunek 3. Próbki połączeń zgrzewanych po przecięciu

Kolejnymi krokami było wyrównanie powierzchni cięcia stacjonarną szlifierką taśmową, szlifowanie oraz polerowanie powierzchni próbek na polerko-szlifierce papierem o gradacji 320. Następnie zglądy wytrawione zostały w 5% roztworze kwasu azotowego. Pozwala on na ujawnienie struktury spoin i zgrzein poprzez oddziaływanie głównie na granice ziaren. Po wytrawieniu, zglądy zostały umyte w wodzie.

Urządzeniem, które posłużyło do realizacji makrofotografii zglądów próbek mikroskop cyfrowy Clara Vision Welding Expert do zastosowań w spawalnictwie. Próbki zostały umieszczone na obiektywie urządzenia, a dedykowane oprogramowanie umożliwiło wygenerowanie raportów zawierających cyfrowe makrofotografie zglądów.

Pozwalają one na określenie wielkości geometrycznych przekroju poprzecznego zgrzeiny oraz rozmiaru i kształtu strefy wpływu ciepła. Na podstawie skali umieszczonej na fotografiach cyfrowych wykonano pomiary wartości geometrycznych zgrzein.



Rysunek 4. Pomiary geometryczne zgrzeiny próbki nr 1 oraz 2

Średnica jądra zgrzeiny pierwszej próbki wynosi 6 mm. Wielkość strefy wpływu ciepła można określić na średnicę około 7,7 mm. Elektrody zagłębiły się po obu stronach na głębokość około 0,3 mm. Dla drugiej próbki średnicę jądra zgrzeiny określono na 7,2 mm, wielkość strefy wpływu ciepła można określić na średnicę około 9,1 mm. Elektrody zagłębiły się po obu stronach na głębokość około 0,4 mm.

4. Symulacja procesu zgrzewania

Na potrzeby symulacji zbudowano modele geometryczne będące reprezentacją próbek rzeczywistych. Ze względu na niewielki rozmiar strefy wpływu ciepła występujący przy rzeczywistych procesach zgrzewania punktowego oporowego (występującej w niewielkim oddaleniu od miejsca połączenia) zdecydowano się na uniwersalny, uproszczony model geometryczny o wymiarach 50 mm x 50 mm. Model taki niewiele różnił się gabarytami od rzeczywistych próbek połączeń.

Dyskretyzacja modeli przeprowadzona została za pomocą elementów typu QUAD, które na etapie importu do systemu Simufact Welding poddane zostały wyciągnięciu (zgodnie z wymiarami rzeczywistych blach i położeniem powierzchni środkowych) w celu utworzenia modelu przestrzennego zbudowanego z elementów typu HEXA. Elementy te znajdują zastosowanie m.in. w analizach przepływu ciepła. Obszar zgrzeiny i spodziewanej strefy wpływu ciepła podzielony został elementami o rozmiarze zapewniającym prawidłowy przebieg obliczeń analizy termomechanicznej z uwzględnieniem przemian fazowych. Obszar występujący w oddaleniu od miejsca połączenia podzielony został elementami o większym rozmiarze w celu przyspieszenia czasu wykonywania obliczeń i najlepszego wykorzystania mocy obliczeniowej. Do symulacji procesów spajania wykorzystywane są modele materiałowe uwzględniające przemiany fazowe na podstawie zaimplementowanego zestawu wykresów czas-temperatura-przemiana. [4]

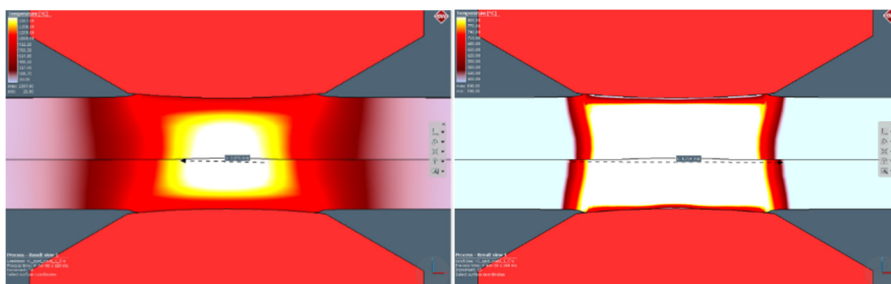
Symulacja uwzględniała początkowy stan struktury materiału zgodny ze stanem rzeczywistych próbek. Parametry procesu zgrzewania w symulacji, zostały

ustawione na podstawie informacji o rzeczywistych parametrach wytwórczego procesu technologicznego, z którymi zgrzane zostały obie próbki. Dla obu łączonych próbek były one takie same. Siła docisku elektrod wynosiła 9 kN, a łączny czas przepływu prądu o natężeniu 8,5 kA wynosił 0,3 s. Model elektrod wybrany został na podstawie porównania średnicy roboczej elektrody użytej w rzeczywistym procesie. Ważnym aspektem ustawienia symulacji było zadeklarowanie tabeli kontaktów. Jest to zbiór ustawień zależności kontaktu między częściami. Wartość parametru „Film thickness” (domyślnie ustawiony na 0,1 mm) pełni w symulacjach rzeczywistych procesów zgrzewania rolę parametru kalibracyjnego. Jego zwiększenie powoduje zwiększenie ilości energii doprowadzanej do miejsca połączenia, a co za tym idzie m.in. zmianę kształtu i wielkość ciekłego jądra zgrzeiny. Podstawą zmiany wartości parametrów kontaktów w symulacji są pomiary wartości geometrycznych zgładów metalograficznych rzeczywistych próbek aż do uzyskania zbliżonych wartości geometrycznych w wynikach symulacji. Tak określone wartości parametrów kontaktu (charakterystyczne dla danego procesu) stanowią ostateczny zestaw danych parametrów kontaktu do przeprowadzenia symulacji procesu zgrzewania rzeczywistego procesu technologicznego. W przypadku symulacji będących przedmiotem artykułu, krok czasowy analizy ciągłej (transient) wynosił 0,04 s.

5. Wyniki

Symulacja procesu zgrzewania pozwala na uzyskanie wyników dotyczących rozkładu temperatury w każdym punkcie modelu w czasie, rozmiaru trwałego połączenia, wielkości deformacji, rozkładu naprężeń i rozkładu faz i ich mieszanin występujących w połączeniu. Poniżej przedstawiono tylko te wyniki analizy, które można było porównać z badaniami rzeczywistych próbek.

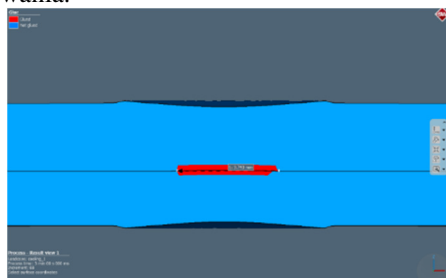
Na drodze analizy pierwszej próbki otrzymano następujące wyniki: rozkład temperatury w trakcie wykonywania zgrzeiny pozwalał na odczytanie wartości temperatury osiągniętej w każdym punkcie modelu w czasie. Średnica ciekłego jądra zgrzeiny ($>1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) osiągnęła 3,6 mm. Sprawdzono również obszar, w którym temperatura w trakcie wykonywania połączenia osiągnęła $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Średnica tego obszaru wynosiła 8,7 mm.



Rysunek 5. Wielkość jądra zgrzeiny oraz obszaru działania temperatury większej niż $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ dla próbki numer 1

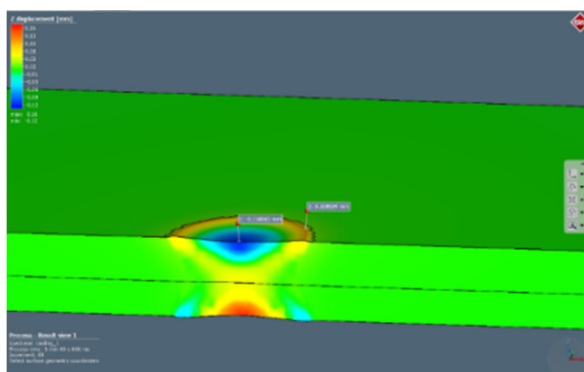
Na kolejnym rysunku przedstawiono wymiary uzyskanej zgrzeiny po wychłodzeniu analizowanej próbki. Trwałe połączenie uzyskane w wyniku procesu (Glued)

osiągnęło średnicę 3,7 mm. Jest to wynik równy średnicy ciekłego jądra zgrzeiny w trakcie jej wykonywania.



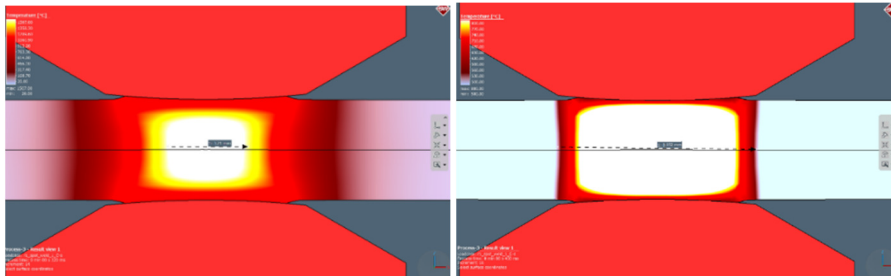
Rysunek 6. Obszar trwałego połączenia

Kolejne ilustracje przedstawiają deformacje w osi zgrzeiny. Analiza tego wyniku pozwala na określenie wgniotów elektrod po obu stronach połączenia. Od strony blachy S355 wgniot elektrody osiągnął 0,12 mm. Od drugiej strony wgniot elektrody osiągnął 0,16 mm.



Rysunek 7. Wielkość wgniotu elektrody

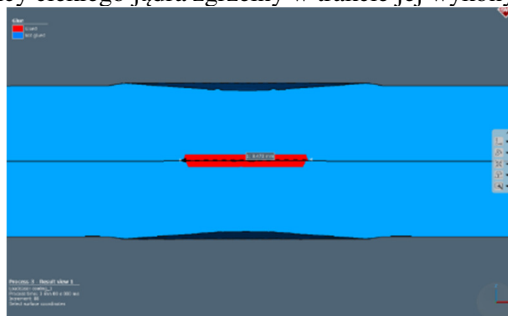
Na drodze analizy drugiej próbki otrzymano następujące wyniki: rozkład temperatury w trakcie wykonywania zgrzeiny pozwalał na odczytanie wartości temperatury osiągniętej w każdym punkcie modelu w czasie. Średnica ciekłego jądra zgrzeiny ($>1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) osiągnęła 3,2 mm.



Rysunek 8. Wielkość jądra zgrzeiny obszaru działania temperatury większej niż 500°C dla próbki numer 2

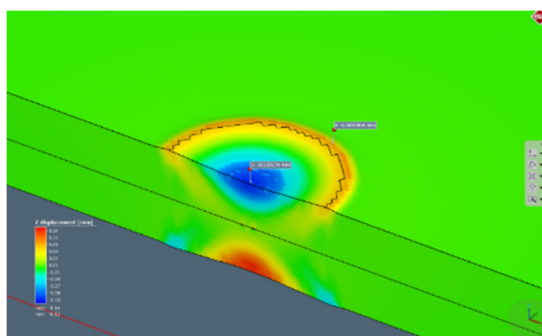
Dla drugiej próbki sprawdzono również obszar, w którym temperatura w trakcie wykonywania połączenia osiągnęła $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Średnica tego obszaru wynosiła 8,1 mm.

Na kolejnym rysunku przedstawiono wymiary uzyskanej zgrzeiny po wychłodzeniu analizowanej próbki. Trwałe połączenie (Glued) osiągnęło średnicę 3,5 mm co jest zbliżone do średnicy ciekłego jądra zgrzeiny w trakcie jej wykonywania.



Rysunek 9. Obszar trwałego połączenia

Kolejnymi przedstawionymi wynikami są deformacje w osi zgrzeiny. Analiza tego wyniku pozwala na określenie wgniotów elektrod po obu stronach połączenia. Od strony górnej blachy, wgniot elektrody osiągnął 0,12 mm, a od strony dolnej blachy 0,13 mm



Rysunek 10. Wgnioty elektrod

6. Wnioski

Parametry procesu zgrzewania w symulacji, zostały ustawione na podstawie informacji o rzeczywistych parametrach wytwórczego procesu technologicznego, z którymi zgrzane zostały obie próbki. Ważnym aspektem ustawienia symulacji było zadeklarowanie tabeli kontaktów. Jest to zbiór ustawień zależności kontaktu między częściami. Wartość parametru „Film thickness” (domyślnie ustawiony na 0,1 mm) pełni w symulacjach rzeczywistych procesów zgrzewania rolę parametru kalibracyjnego. Jego zwiększenie powoduje zwiększenie ilości energii doprowadzanej do miejsca połączenia, a co za tym idzie m.in. zmianę kształtu i wielkość ciekłego jądra zgrzeiny.

Podstawą zmiany wartości parametrów kontaktów w symulacji są pomiary wartości geometrycznych zglądów metalograficznych rzeczywistych próbek aż do uzyskania zbliżonych wartości geometrycznych w wynikach symulacji. Tak określone wartości parametrów kontaktu (charakterystyczne dla danego procesu) stanowią ostateczny zestaw danych parametrów kontaktu do przeprowadzenia symulacji procesu zgrzewania rzeczywistego procesu technologicznego. Symulacja zgrzewania w systemie Simufact Welding wykonywana jest przy użyciu analizy ciągłej (transient). Pozwala to na analizę zjawisk w każdej z chwil czasowych odległych od siebie o krok czasowy pozwalający na uzyskanie prawidłowych wyników. W przypadku symulacji będących przedmiotem niniejszej pracy krok czasowy wynosił 0,04 s.

Dla pierwszej próbki średnica ciekłego jądra zgrzeiny w trakcie jej wykonywania osiągnęła 3,6 mm, a trwałe połączenie (Glued) po wychłodzeniu osiągnęło średnicę 3,7 mm. Wartości te są do siebie zbliżone i ich związek jest zgodny z teorią powstawania połączenia na drodze zgrzewania punktowego. Jądro zgrzeiny zmierzone podczas badań makroskopowych pierwszej próbki miało średnicę 6 mm.

Obliczony obszar strefy wpływu ciepła (określony jako miejsce w którym temperatura osiągnęła podczas procesu więcej niż 500 °C) miał średnicę 8,7 mm. Obszar ten można było zaobserwować podczas badań makroskopowych pierwszej próbki – jego średnica wynosiła około 7,7 mm. Wgniot elektrod po symulacji procesu zgrzewania (zmierzony jako deformacja w osi zgrzeiny) wynosił kolejno 0,12 mm i 0,16 mm. Wgniot elektrod zmierzony na drodze badań makroskopowych pierwszej próbki osiągnął wartość 0,3 mm po obu stronach blach. Rozbieżności w porównywanych wynikach symulacji i badań makroskopowych próbki rzeczywistej mogą wynikać z niespójności parametrów nastawianych na przemysłowych urządzeniach zgrzewalniczych z wartościami rzeczywistymi deklarowanymi jako parametry procesu w symulacji. Szczególne znaczenie dla rozmiaru strefy wpływu ciepła oraz wielkości jądra zgrzeiny ma wielkość prądu oraz czas jego przepływu przez obszar tworzenia połączenia. Na różnicę w wartościach wgniotów elektrod mają wpływ takie parametry technologiczne jak siła docisku i typ oraz zużycie elektrod użytych podczas procesu. Do symulacji procesu użyte zostały modele elektrod dobrane na podstawie średnicy roboczej – ich geometria może różnić się od geometrii rzeczywistych elektrod ze względu na zużycie lub zmianę wymiarów po regeneracji co może mieć wpływ na różnicę w wymiarach zmierzonych wielkości geometrycznych.

Dla drugiej próbki średnica ciekłego jądra zgrzeiny osiągnęła 3,2 mm. Trwałe połączenie (Glued) osiągnęło średnicę 3,5 mm co również jest zbliżone do średnicy ciekłego jądra zgrzeiny w trakcie jej wykonywania. W przypadku drugiej

próbki sprawdzono również obszar w którym temperatura w trakcie wykonywania połączenia osiągnęła powyżej 500 °C. Średnica tego obszaru wynosiła 8,1 mm. Badania makroskopowe próbki nr 2 pozwoliły na określenie średnicy ciekłego jądra zgrzeiny na 7,2 mm, a wielkości strefy wpływu ciepła na 9,1 mm. Różnica między obliczoną wielkością wgniotu elektrod, a zmierzoną podczas pomiarów wielkości geometrycznych próbki rzeczywistej wynosi niecałe 0,3 mm na stronę. Różnice te, podobnie jak w przypadku pierwszej próbki mogą mieć źródło w rozbieżności zadanych parametrów z ich rzeczywistą wartością i geometrią elektrod użytych w rzeczywistym procesie. Dla obu analiz wartość parametru kalibracyjnego „Film thickness” zwiększona została do 0,3mm (z wartości domyślnej 0,1mm). Dalsze zwiększanie tego parametru nie poprawiało zbieżności wyników z wartościami geometrycznymi określonymi na podstawie badań próbek. Prawidłowe przeprowadzenie symulacji procesów zgrzewania pozwala na uzyskanie informacji o prawidłowości dobranych parametrów procesu i ich wpływie na właściwości połączenia. Pozwala to na dobór parametrów, zredukowanie ilości wykonanych prototypów, zachowanie odkształceń zgodnych z założonymi tolerancjami oraz minimalizację liczby złączy i ich wpływu na konstrukcję. Do prawidłowego ustalenia parametrów kalibracyjnych, a następnie prawidłowego przeprowadzenia symulacji rzeczywistego procesu zgrzewania, niezbędna jest znajomość, spójność i stabilność wszystkich parametrów charakteryzujących analizowany proces. Wykorzystanie możliwości symulacji procesów spajania zwiększa bezpieczeństwo produktu jeszcze w początkowym stadium wytwarzania oraz pozwala na zmniejszenie kosztów wdrożenia produktu.

LITERATURA

1. FERENC K.: Spawalnictwo, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
2. PILARCZYK J.: Poradnik inżyniera Tom 2 – Spawalnictwo, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
3. ArcelorMittal, Steels for hot stamping - Usibor and Ductibor www.automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor_ductibor, 2021.
4. Hexagon AB, Simufact Welding Resistance spot welding - Introduction and basics, 2020.