

Stanisław Dobrociński
Leszek Flis

OKREŚLANIE NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W PŁYCCIE SPAWANEJ

STRESZCZENIE

W artykule opisano badania eksperymentalne z wykorzystaniem efektu Barkhausena i numeryczne, których celem było określenie naprężeń pozostających w płytach stalowych i ze stopu aluminium po ich zespawaniu.

WSTĘP

W badaniach eksperymentalnych płyt stalowych przeprowadzono pomiary efektu Barkhausena [1, 3], na podstawie którego określono naprężenia pozostające w złączu spawanym. W badaniach numerycznych obliczono wartości poszczególnych składowych naprężeń własnych. Wyniki badań eksperymentalnych wykorzystano do weryfikacji wyników obliczeń numerycznych. Dla płyt ze stopu aluminium w badaniach eksperymentalnych wykonano pomiary temperatury w trakcie ich spawania. Natomiast obliczone pole temperatury w złączu spawanym ze stopu aluminium porównano z wynikami uzyskanymi w eksperymencie. Wykonano symulację komputerową spawania płyt i obliczono wartości poszczególnych składowych naprężeń własnych.

Przeprowadzenie weryfikacji wyników symulacji komputerowej było jednym z celów opisanych w artykule badań. Uzyskanie zgodności jakościowej i ilościowej wyników obliczeń z wynikami eksperymentu potwierdziło by tezę o przydatności symulacji komputerowej w praktyce inżynierskiej do oceny naprężeń własnych.

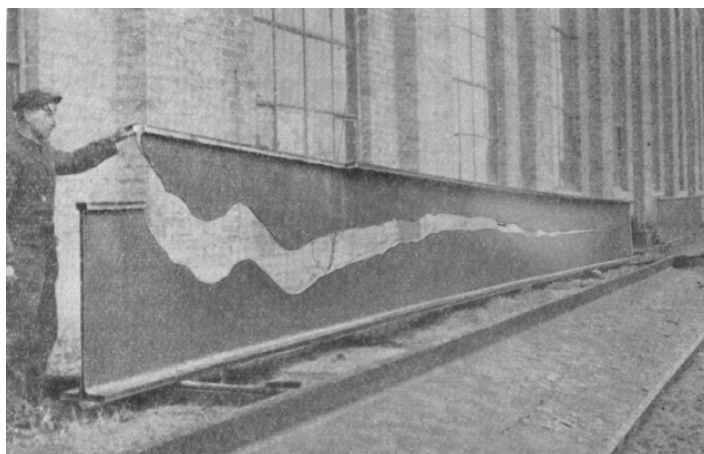
ROZPATRYWANE ZAGADNIENIE I PRZEDMIOT BADAŃ

Naprężenia pozostające (własne) istnieją w elementach konstrukcyjnych przy braku obciążeń zewnętrznych [2]. Powstają one po zastosowaniu głównie takich procesów technologicznych, jak obróbka plastyczna (walcowanie, gięcie, kucie), obróbka mechaniczna (skrawanie, szlifowanie, cięcie), nanoszenie powłok (platerowanie, powłoki CVD¹), obróbka cieplna (połączenia skurczowe, spawane).

Obecnie dostępne sposoby określania naprężeń pozostających są wciąż rozwijane i udoskonalane. Najwięcej uwagi poświęca się metodom eksperymentalnym, które bazują na pomiarze odkształceń, dzięki którym oblicza się wartości poszczególnych składowych naprężeń pozostających. Jednakże eksperyment nie zawsze możliwy jest do przeprowadzenia. Metody analityczne sprawdzają się w niewielkim zakresie, natomiast metody numeryczne, pomimo że są wciąż rozwijane, są w praktyce elastyczniejsze i stają się dla powyższych alternatywą, szczególnie przy określaniu naprężeń pozostających w elementach konstrukcyjnych o skomplikowanych kształtach z uwzględnieniem nieliniowości parametrów materiałowych oraz złożonych warunkach początkowo-brzegowych.

Rozwijanie metod numerycznych i ich stosowanie do określania naprężeń pozostających w formie eksperymentu numerycznego daje szansę na przewidywanie i kontrolę zachowania się konstrukcji podczas jej eksploatacji.

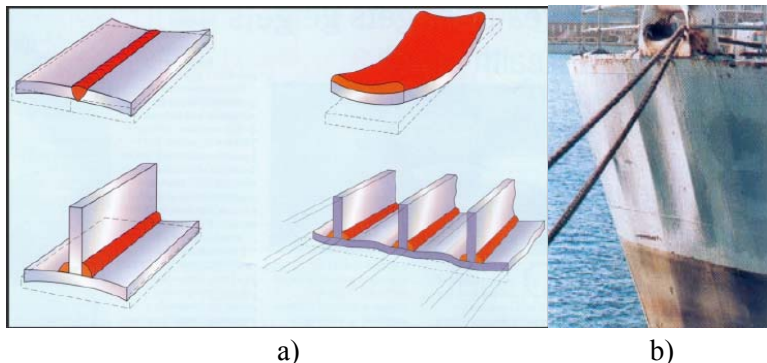
Zagadnienie naprężeń pozostających w odniesieniu do eksploatacji konstrukcji zobrazowano na rysunku 1.



Rys. 1. Krucho pęknięcie belki z dwuteownika szerokostopowego pod wpływem działania naprężeń własnych [3]

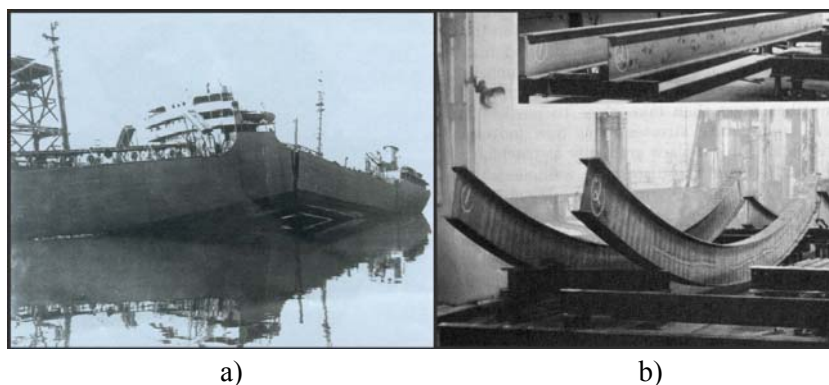
¹ Chemical vapour deposition (osadzanie oparów związków chemicznych) [5].

W artykule rozpatrywano tylko naprężenia pozostające, które powstają w wyniku nierównomiernej zmiany pola temperatury w czasie. Naprężenia cieplne są jednym z ważniejszych zagadnień w spawalnictwie będących przedmiotem badań. Spawane konstrukcje odkształcają się (rys. 2.), co w połączeniu z naprężeniami własnymi konstrukcji powoduje ich pękanie.



Rys. 2. Odkształcanie się elementów spawanych:
a) odkształcona sekcja dziobowa, b) [3]

Na rysunku 3a) udokumentowana została katastrofa statku. Naprężenia w kadłubie od obciążeń zewnętrznych sumując się z naprężeniami pospawalniczymi, przy jednoczesnym udziale korozji naprężeniowej, spowodowały przełamanie się statku. Jednakże naprężenia pozostające można również wykorzystać. Na rysunku 3b) widać ukształtowane dwuteowniki poprzez miejscowe nagrzewanie i redystrybucję naprężeń własnych.



Rys. 3a) przełamanie się statku jako efekt sumowania się naprężeń własnych, naprężeń od obciążeń zewnętrznych przy jednoczesnym udziale korozji naprężeniowej [1];
3b) kształtowanie dwuteowników przy wykorzystaniu miejscowego nagrzewania i redystrybucji naprężeń pozostających [1]

Wyżarzanie odprężające i odprężanie mechaniczne zmniejsza, a nawet eliminuje naprężenia własne konstrukcji. Natomiast na etapie projektowania stosuje się badania eksperymentalne i modelowe, które pozwalają na poznawanie przyczyn powstawania naprężeń pozostających. W dalszej części przedstawiono badania własne, w których przedstawiono sposób, w jaki określono naprężenia własne dla cienkich płyt spawanych.

BADANIA WŁASNE

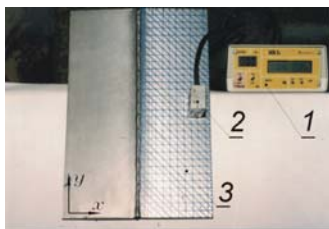
Naprężenia pozostające w płycie spawanej ze stali St45S

Dwie płyty ze stali St4S o wymiarach 100x300 [mm] i grubości 3 [mm] połączono spoiną czołową, wzdłuż dłuższej krawędzi. Spoinę wykonano jednym przejściem, uzyskując przetop materiału na całej grubości płyty.

Badanie naprężeń pozostających poprzez pomiar sygnału Barkhausena możliwe jest przy lokalnym magnesowaniu podłoża za pomocą elektromagnesu w kształcie litery U oraz detekcji sygnału przez cewkę indukcyjną zbliżoną do magnesowanej powierzchni. Dokładny opis zastosowanej metody i samego efektu Barkhausena można znaleźć w literaturze [1, 3].

Ilościową charakterystykę wpływu naprężeń na natężenie efektu Barkhausena określa tak zwany parametr N_c [1, 3], który jest związany z prędkością zliczania impulsów tworzących napięciowy sygnał Barkhausena. Parametr ten opisuje natężenie efektu Barkhausena poprzez liczbę impulsów zliczanych w zadanym czasie. Większe natężenie efektu Barkhausena wyraża się w większej wartości parametru N_c .

Obok doboru parametru N_c kolejnym ważnym elementem w zastosowanej metodzie jest skalowanie natężenia efektu Barkhausena. Skalowanie polega na pomiarze zależności parametru N_c od poziomu odkształceń w próbkach wyciętych z płyt stalowych przed ich zespawaniem, do których odnoszone są pomiary wykonane na płytach po spawaniu. Na podstawie danych o odkształceniach wyznacza się składowe naprężenia występujących w badanym elemencie [1, 3].

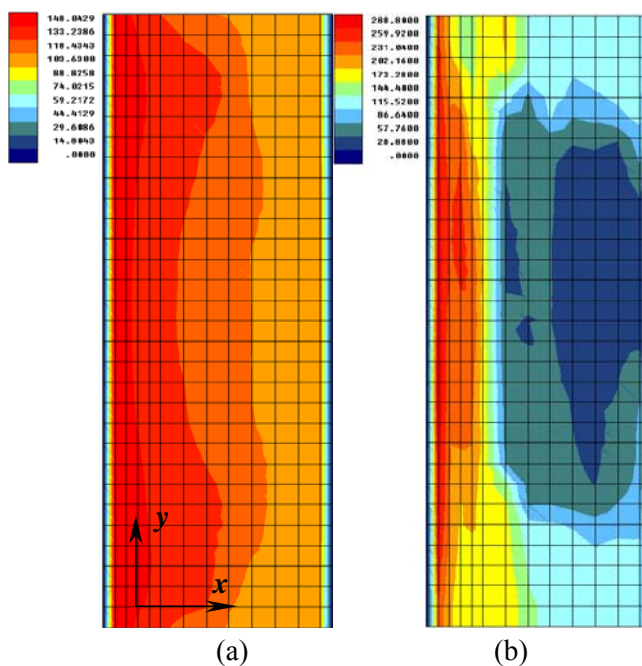


Rys. 4. Pomiar efektu Barkhausena w spawanej płycie stalowej:
1 – analizator efektu Barkhausena MEB2c;
2 – głowica indukcyjna;
3 – zespawana płyta stalowa

Rozkład naprężeń pozostających w złączy spawanym

Dla zespawanych płyt przedstawionych na rysunku 4. wykonano pomiar parametru N_c odpowiednio w kierunku prostopadłym x , równoległym y do osi spoiny oraz pod kątem 45° .

Pomiary parametru N_c wykonywano w węzłach siatki o wymiarach 5×10 [mm] w strefie do 25 [mm] od spoiny oraz 10×10 [mm] w pozostałej części płyty. Najmniejsza odległość rdzenia detektora od krawędzi spoiny wynosiła około 3 [mm]. Punkty pomiarowe ułożone były tak, aby odpowiadały współrzędnym węzłów w siatce elementów skończonych. Wyniki pomiarów parametru N_c wykorzystano do wyznaczenia składowych normalnych naprężeń własnych w kierunku x i y . Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wyznaczone składowe naprężeń własnych:
(a) składowa normalna σ_x ; (b) składowa normalna σ_y w [MPa]

Obliczenia numeryczneRównania termosprężystości i warunki graniczne

Obliczenie naprężeń wywołanych obciążeniem cieplnym podczas spawania w ogólnym wypadku wymaga rozwiązania zagadnienia termoplastycznego przy odpowiednich warunkach granicznych. Równania opisujące rozkład temperatury i naprężeń w spawanych płytach w ujęciu analitycznym są możliwe do rozwiązania przy przyjęciu znacznych uproszczeń przy rozpatrywaniu modelu fizycznego i matematycznego, który opisuje badany element rzeczywisty i zachodzące w nim procesy. W niektórych przypadkach przyjęte do obliczeń uproszczenia powodują, że uzyskane wyniki w takim stopniu odbiegają od wyników badań eksperymentalnych, często zgodnych z obliczeniami numerycznym, że nie mogą być brane pod uwagę. Przy dowolnych kształtach rozpatrywanej konstrukcji rozwiązanie równań termosprężystości bardzo się komplikuje, a przy uwzględnieniu zmiany stałych materiałowych z temperaturą ich rozwiązanie staje się niemożliwe.

Rozwiązania analityczne istnieją tylko dla przypadków szczególnych, konieczne jest więc, dla pozostałych wariantów, stosowanie MES do wyznaczania rozkładów temperatur, a następnie naprężeń w rozpatrywanych elementach. Metoda numeryczna znacznie skraca czas uzyskania wyników i stwarza możliwości do obliczania teoretycznie każdej konstrukcji. Oczywiście mogą pojawić się także ograniczenia podczas obliczeń [7].

Określanie naprężeń wywołanych obciążeniem cieplnym realizowano w dwóch etapach. W pierwszym etapie obliczono rozkład temperatury w elemencie spawanym w funkcji czasu. W drugim etapie obliczono rozkład naprężeń i odkształceń wywołanych zmianą temperatury, w każdym kroku czasowym.

Rozpatrywane równania termosprężyste i warunki graniczne, przyjęte do zrealizowania obliczeń numerycznych, przedstawiono poniżej [1, 3].

Równanie różniczkowe przewodzenia ciepła w rozpatrywanym ciele naprężeń objętości ograniczonej powierzchnią Γ (oznaczenia symboli podano w [6, 7]):

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} \Theta) = q_v = \rho c_p \frac{\partial \Theta}{\partial t}. \quad (1)$$

Warunki początkowo-brzegowe:

$$\Theta(x, y, z, t_0) = \Theta_0(x, y, z, t_0) - \text{warunek początkowy} \quad (2)$$

$$\Theta(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, t) = f(\Gamma, t) \text{ – warunek brzegowy I rodzaju} \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial n} = q(\Gamma, t) \text{ – warunek brzegowy II rodzaju} \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial n} = \alpha[T_0 - \Theta(\Gamma, t)] \text{ – warunek brzegowy III rodzaju} \quad (5)$$

Dyskretyzacja przestrzeni:

$$\Theta(x, y, z, t_0) = \sum_i \varphi_i(x, y, z) T(t); \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \sum_i \varphi_i(x, y, z) \dot{T}(t). \quad (7)$$

Równania macierzowe przewodzenia ciepła:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{A}^\alpha) \mathbf{T} + \mathbf{B} \dot{\mathbf{T}} = \mathbf{Q} \quad (8)$$

$\mathbf{A}[\lambda(\Theta)]$ – macierz przewodzenia ciepła

$\mathbf{A}^\alpha[\alpha(\Theta)]$ – macierz wymiany ciepła

$\mathbf{B}[\rho c_p(\Theta)]$ – macierz pojemności cieplnej

\mathbf{Q} – macierz źródeł ciepła

Dyskretyzacja czasu:

$$\dot{\mathbf{T}} = \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{T}^{t+\Delta t} - \mathbf{T}^t), \quad (9)$$

wówczas

$$(\mathbf{A} + \mathbf{A}^\alpha + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{B}) \mathbf{T}^{t+\Delta t} + \mathbf{B} \dot{\mathbf{T}} = \mathbf{Q}^{t+\Delta t}. \quad (10)$$

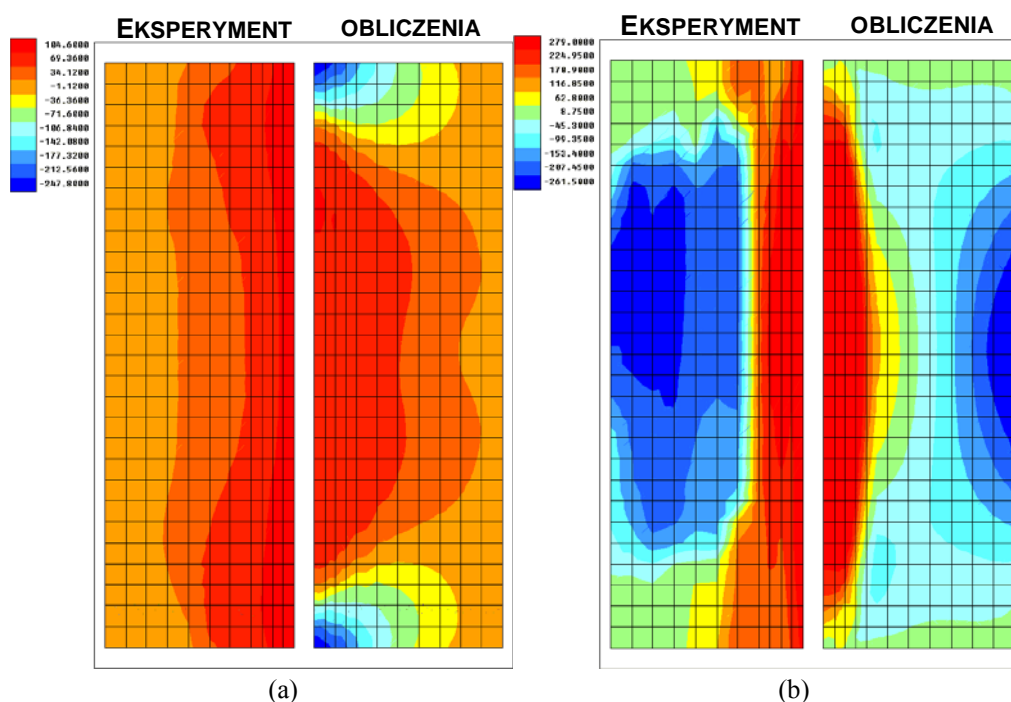
Naprężenia na kroku przyrostowym określano jako:

$$d\sigma_{ij} = 2G \left(d\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} d\varepsilon_{kk} \right) - \frac{3G s_{kl} d\varepsilon_{kl} s_{ij}}{\sigma_e^2 (1+H'/3G)} + \left(\frac{1}{1+H'/3G} - 1 \right) G d(1/G) s_{ij} + \frac{(\partial \sigma_y / \partial T) dT}{\sigma_e (1+H'/3G)} s_{ij} - \delta_{ij} K [d(1/3K) \sigma_{kk} + 3d\varepsilon^T] \quad (11)$$

Porównanie naprężeń określonych w eksperymencie z naprężeniami obliczonymi numerycznie

Wykonano obliczenia rozkładu naprężeń pozostających w złączu spawanym metodą elementów skończonych. Do obliczeń przyjęto model dyskretny złożony z 990 elementów 9-węzłowych. Dyskretyzację płyty przeprowadzono tak, aby współrzędne węzłów w siatce elementów skończonych odpowiadały punktom, w których wykonywano pomiar parametru N_c .

Założono, że oś spoiny stanowi oś symetrii i w obliczeniach rozważano tylko połowę płyty. Obliczenia wykonano, zakładając, że w spawanych płytach występuje płaski stan naprężenia (PSN), co stanowi rozsądny kompromis pomiędzy koniecznością uchwycenia najistotniejszych zjawisk występujących w analizowanym zadaniu a stopniem komplikacji modelu, czyli wynikającymi stąd czasami obliczeń i wymaganiami sprzętowymi. Do obliczeń wykorzystano charakterystyki parametrów materiałowych płyt na podstawie danych literaturowych [1]. Na rysunku 6. zestawiono wyniki obliczeń naprężeń własnych występujących po spawaniu płyt z wynikami uzyskanymi w eksperymencie.



Rys. 6. Zestawienie naprężeń obliczonych za pomocą eksperymentu:
(a) składowa normalna σ_x ; (b) składowa normalna σ_y

Naprężenia pozostające w spawanej płycie ze stopu AlMg5

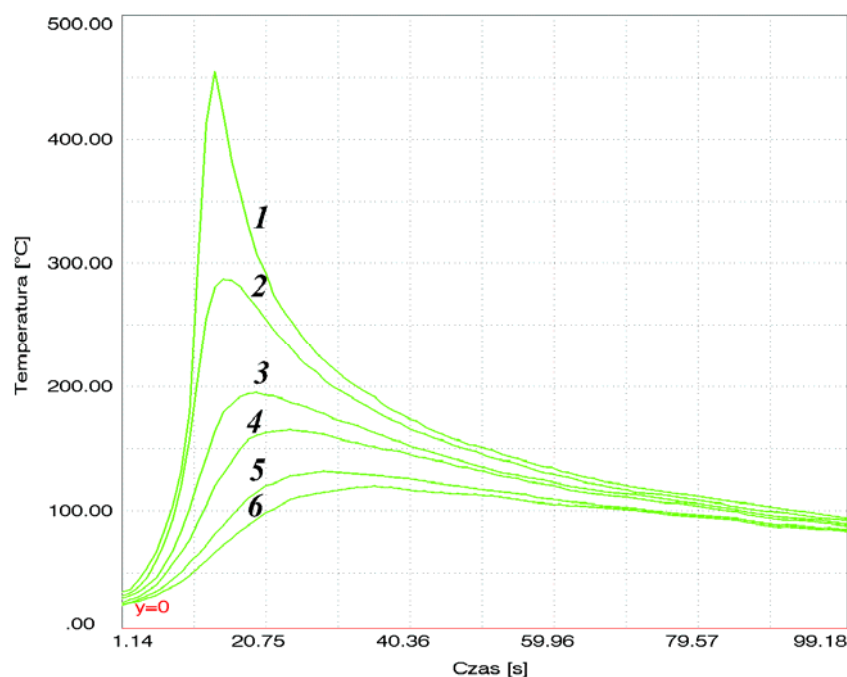
Jednym z możliwych sposobów określania naprężeń własnych, jak przedstawiono wcześniej, jest ich obliczenie metodą elementów skończonych. Jednakże w elementach niemagnetycznych wyniki obliczeń nie mogą być weryfikowane metodą wykorzystującą efekt Barkhausena, ponieważ występuje on tylko w ferromagnetykach. Metody, w których wykorzystuje się tensometry oporowe mają poważne ograniczenia, dotyczące głównie odporności cieplnej folii tensometrycznej i kleju do jej mocowania na powierzchni badanego obiektu. Produkowane obecnie tensometry i kleje mogą być wykorzystywane w temperaturze do 200 [°C]; metody rentgenowskie lub ultradźwiękowe, wykorzystywane do weryfikowania obliczeń, cechują się specyficznymi zaletami, lecz także niedogodnościami. Te ostatnie powodują, że w praktyce inżynierskiej, szczególnie na etapie projektowania, nie są one stosowane. Weryfikacje obliczeń numerycznych sprowadza się wówczas do weryfikacji pola temperatury. Określenie pola temperatury w obliczeniach numerycznych zgodnego z polem temperatury określonym w eksperymencie jest najważniejszą częścią badań numerycznych, ponieważ na jego podstawie obliczane są naprężenia własne.

W dalszej części przedstawiono wyniki badań numerycznych określania naprężeń własnych w spawanej płycie ze stopu AlMg5. Określono pole temperatury w złączu spawanym i porównano je z wynikami uzyskanymi w eksperymencie. Następnie obliczono naprężenia pospawalnicze.

Badania eksperymentalne

Wyniki badań eksperymentalnych opublikowane w pozycji [4] dotyczyły rozkładu temperatury w spawanych płytach wykonanych ze stopu aluminium AlMg5. Wymiary płyt 300x600 [mm]. Spoinie wykonano wzdłuż osi y jednym przejściem elektrody, uzyskując przetop materiału na całej grubości materiału. Podczas spawania płyt o grubości 3 [mm] wykonano pomiar temperatury w 6 punktach leżących na prostej $x=300$ [mm] (oś spoiny) i współrzędnych y , prostopadle do kierunku spawania, podanych w tabeli 2. [4]. Temperaturę mierzono za pomocą termopar chromel-alumel o średnicy $\varnothing 0,5$ [mm]. Termopary zamocowano ze stykiem metalicznym w dnie otworków o średnicy $\varnothing 1,8$ [mm] i głębokości równej połowie grubości płyty. Wyniki pomiarów temperatury w czasie, w postaci cykli cieplnych, przedstawiono na rysunku 7.

Punkty pomiaru temperatury	1	2	3	4	5	6
Współrzędna x [mm]	5,5	15,5	25,5	35,5	45,5	55,6



Rys. 7. Cykle cieplne spawania dla 6 punktów pomiarowych (tab. 2) dla płyty o grubości 3 [mm] [4]

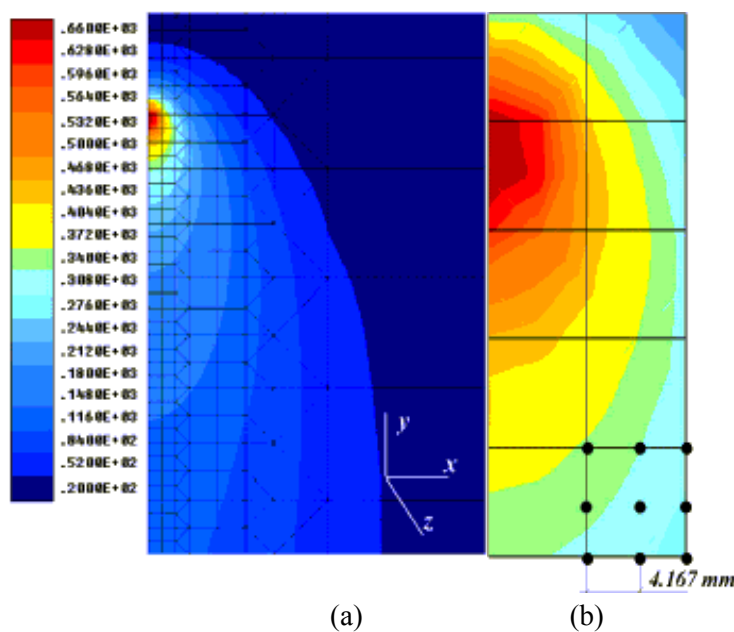
Obliczenia numeryczne

Model obliczeniowy określający zależność temperatury od czasu w złączu spawanym zawiera następujące elementy: geometrię obszaru, własności fizyczne, warunki początkowe, warunki brzegowe, obciążenie cieplne. W większości przypadków tylko geometria obszaru i warunki początkowe są zdeterminowane. Pozostałe elementy modelu obliczeniowego należy określić na podstawie badań numerycznych, aby uzyskać rzeczywisty obraz zmiany temperatury w czasie. Nieliniowy charakter zmiany parametrów materiałowych w funkcji temperatury, określany na podstawie danych literaturowych, dotyczy najczęściej materiałów o własnościach zbliżonych do własności materiału rozpatrywanego. Wykorzystywany w modelu obliczeniowym warunek brzegowy III rodzaju wpływa na rozkład temperatury proporcjonalnie do współczynnika przejmowania ciepła, który jest zwykle określany na podstawie doświadczenia inżynierskiego [6]. W obciążeniu

cieplnym niewiadomą jest wielkość i kształt pola, na którym rozłożone jest źródło ciepła pochodzące od łuku. Aby uzyskać zgodność rozkładu temperatury w przestrzeni i czasie, pomierzonej eksperymentalnie i obliczonej numerycznie, wymienione parametry uściślono w sposób iteracyjny. Następnie rozwiązano zagadnienie odwrotne, czyli określono parametry materiałowe modelu obliczeniowego dającego wyniki zgodne z eksperymentem. Rozkładu temperatury poszukiwano w płytach, przyjmując, że wzdłuż osi spoiny istnieje płaszczyzna symetrii. Przyjęto także symetrię względem płaszczyzny środkowej płyty, co oznacza, że na górnej i dolnej powierzchni płyty istnieją jednakowe warunki wymiany ciepła. Na powierzchniach płyt założono warunek brzegowy III rodzaju wymiany ciepła z otoczeniem (5).

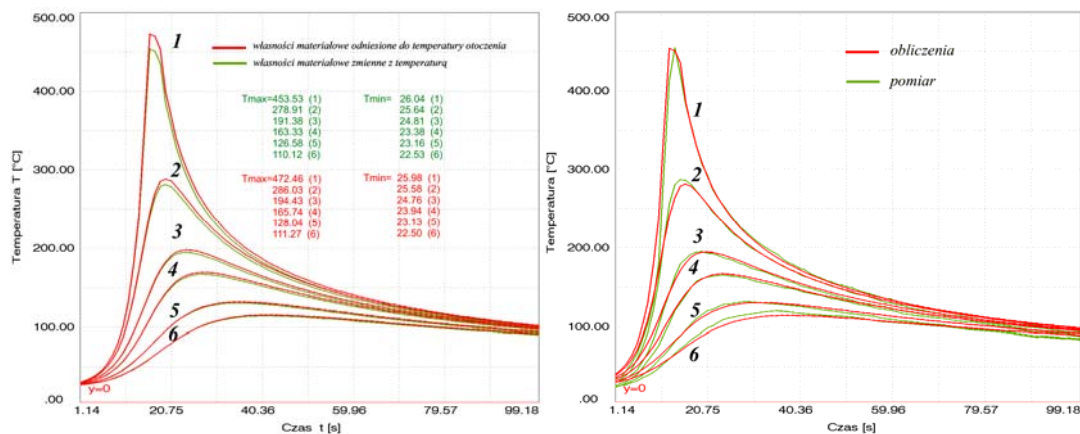
Wyniki obliczeń rozkładu temperatury

Przesuwający się wraz z elektrodą obraz rozkładu temperatury w postaci planu warstwicowego przedstawiono na rysunku 8. Maksymalna temperatura przy przyjętych parametrach spawania wynosiła 1200 [°C]. Jeżeli przyjąć, że temperatura topnienia materiału spawanego wynosi 660 [°C], to na podstawie tejże izotermii można określić kształt i wielkość jeziorka spawalniczego (rys. 8b).



Rys. 8. Rozkłady temperatury w środkowej części płyty po czasie $t=84,36$ [s]:
(a) plan warstwicowy; (b) powiększony 4-krotnie obraz plamki cieplnej

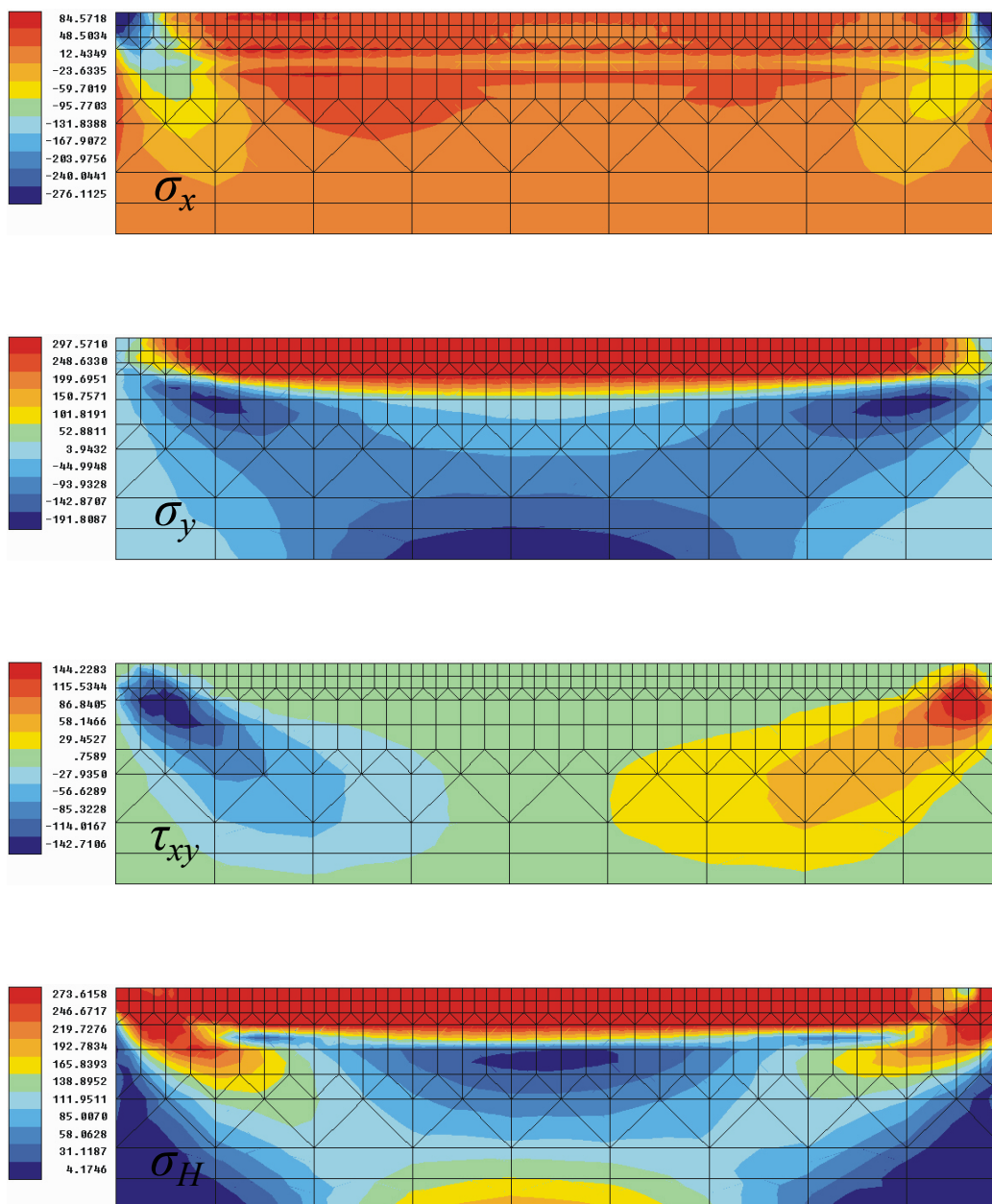
Zmianę temperatury w czasie obliczoną w punktach o współrzędnych odpowiadających współrzędnym punktów, w których wykonano pomiar temperatury, przedstawiono na rysunku 9a). Dla oceny dokładności obliczeń na rysunku 9b) zestawiono wyniki otrzymane na drodze numerycznej i eksperymentalnej.



Rys. 9a) temperatura obliczona w punktach odpowiadających punktom pomiaru temperatury przy parametrach materiałowych odniesionych do temperatury otoczenia i zmiennych z temperaturą;
b) zestawienie temperatury zmierzonej podczas spawania i obliczonej przy parametrach materiałowych zmiennych z temperaturą

Wyniki obliczeń naprężeń pozostających

Przeprowadzono obliczenia stanu naprężenia w spawanych płytach. Obydwie płyty miały punktowe spoiny szczepne na początku i końcu osi spawania. Uzyskane z obliczeń rozkłady naprężeń pozostających w płytach przedstawiono na rysunku 10. Naprężenia przedstawiono za pomocą izolinii wartości składowej normalnej σ_x w kierunku x i składowej normalnej σ_y w kierunku y , składowej stycznej τ_{xy} w płaszczyźnie xy oraz naprężenia zredukowanego σ_H według hipotezy Hubera. Obliczenia naprężeń prowadzone były przy parametrach materiałowych zmiennych z temperaturą.



Rys. 10. Naprężenia pozostające w płycie spawanej przy parametrach materiałowych zmiennych z temperaturą:
 składowa normalna σ_x ; składowa normalna σ_y ; składowa styczna τ_{xy}
 oraz naprężenia zredukowane σ_H

WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Z przeprowadzonych badań dla płyt stalowych wynika, że dla poprawnie określonych parametrów materiałowych badanych ciał uzyskuje się zgodność wyników obliczeń z wynikami eksperymentu na poziomie charakteru zmian naprężeń własnych, co jest zadowalające z punktu widzenia wiarygodności obliczeń. Co do zgodności uzyskiwanych wartości obliczeń należy zaznaczyć, że sama metoda Barkhausena, która jest w ciągłej fazie rozwoju, nie jest jeszcze doskonała i w pierwszej kolejności należy uwiarygodnić uzyskiwane wartości wyznaczanych naprężeń. Wciąż istnieją problemy z precyzyjnym skalowaniem w metodzie Barkhausena, co ma bezpośredni wpływ na uzyskiwane wartości wyników. W eksperymencie zastosowano najnowocześniejszą z metod, czyli metodę magnetostrykcyjną Barkhausena, a jednocześnie jedyną dostępną. Zgodność wyników z eksperymentu i obliczeń, na poziomie charakteru zmian poszukiwanych naprężeń, w określonych punktach analizowanego elementu konstrukcyjnego potwierdza zasadność modelu obliczeniowego i przydatność symulacji komputerowej do oceny naprężeń pozostających. Jednakże symulacja komputerowa złożonych zagadnień nieliniowych, np. wielokrotna spoina pachwinowa, wymaga komputerów o dużej mocy, dostępnych w nielicznych ośrodkach obliczeniowych, przy jednoczesnej możliwości weryfikowania wyników przynajmniej kilkoma metodami.

Dalsze badania należałoby rozszerzyć o obliczenia naprężeń dla pozostałych modeli obliczeniowych, od płyty począwszy, a na modelach przestrzennych skończywszy. Uzyskane obliczenia należałoby porównywać z wynikami otrzymanymi przy wykorzystaniu oprogramowania komercyjnego, np. MSC Marc, a eksperymenty uzupełnić, określając naprężenia pozostające innymi metodami, np. ultradźwiękowymi, zwłaszcza dla materiałów niemagnetycznych.

Oprogramowanie, które stworzono na potrzeby przedstawionych badań, można wykorzystać w innych zagadnieniach, np. do określania pól temperatury i naprężeń w złączach skurczowych.

Słowa kluczowe:

naprężenia pozostające, naprężenia własne, efekt Barkhausena, pole temperatury, zagadnienie sprzężone, metoda elementów skończonych

BIBLIOGRAFIA

- [1] Augustyn M., Śledziwski E., *Technologiczność stalowych konstrukcji spawanych*, Arkady, Warszawa 1974.
- [2] Augustyniak B., *Nowe osiągnięcia w badaniach nad zastosowaniem efektu Barkhausena do oceny naprężeń własnych. Badania nieniszczące*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1996.
- [3] Augustyniak B., *Wyniki prac własnych nad rozwojem nowych nieniszczących metod badań ferromagnetycznych materiałów konstrukcyjnych*, prace IPPT, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1996.
- [4] Burczyk J., *O możliwości obliczeniowego wyznaczania cykli cieplnych przy spawaniu metodą TIG stopu AlMg5*, IV Krajowa Naukowo-Techniczna Konferencja Spawalnicza, 20 – 22 kwietnia, Międzyzdroje – Szczecin 1999.
- [5] Czernin S., Skrzyńska M., *Słownik naukowo-techniczny, angielsko-polski*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.
- [6] Dobrociński S., *Modelowanie zagadnień obliczania naprężeń cieplnych*, AMW, Gdynia 2001.
- [7] Flis L., *Określanie naprężeń pozostających w elementach maszyn poddanych procesom cieplnym*, rozprawa doktorska, AMW, Gdynia 2002.

ABSTRACT

The paper presents experimental investigations: numerical and with use of Barkhausen effect whose aim was to determine stresses remaining in steel and aluminum plates after they were welded.

Recenzent prof. dr hab. inż. Janusz Kolenda