

Bolesław Augustyniak\*<sup>1</sup>, Marek Chmielewski<sup>1,2</sup>, Piotr Sędek<sup>3</sup>, Krzysztof Krasnowski<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NNT sp. z o.o., Gdańsk

<sup>2</sup>Wydział FT i MS Politechnika Gdańska, Gdańsk

<sup>3</sup>Instytut Spawalnictwa, Gliwice

# Badania porównawcze z wykorzystaniem efektu Barkhausena i metody trepanacyjnej stanu naprężenia w złączach spawanych odprężonych cieplnie i mechanicznie

## Comparative studies of residual stress evaluated with Barkhausen effect and trepanation methods in welded joints after thermal and mechanical stress release

### ABSTRACT

The aim of the study was to compare the residual stress in welded joints determined by the non-destructive method, which was based on the Barkhausen effect intensity measurement (EB method), and the destructive method, defined as the trepanation method. Three model butt welds made of S235 steel, marked as P1, P2 and P3, were subjected to the test, P2 was heat annealed and P3 was mechanically annealed by static stress up to yield strength. The stress was determined by EB at a number of points on both faces of the specimens. The trepanation tests by Gunnert allowed to determine the relative deformations for a series of narrow strips cut in the central part of the joint parallel to the weld axis. These deformations have been converted to residual stress levels in the direction of the weld axis. These values were compared with the values of the tangential stress component determined by the EB method for this part of the weld. It has been shown that thermal annealing practically removes welding stress and mechanical annealing significantly reduces this stress. The results of both methods proved to be consistent both qualitatively and quantitatively - after taking into account the bending effect of the panels revealed by the EB method. This demonstrates the effectiveness and usefulness of the EB method in assessing stress in steel elements.

**Keywords:** Residual stress; welded joint; Barkhausen effect; trepanation method

### STRESZCZENIE

Celem pracy było porównanie stanu naprężenia resztkowego w złączach spawanych wyznaczonego metodą nieniszczącą, która bazowała na pomiarze natężenia efektu Barkhausena (metoda EB) oraz metodą niszczącą, określaną jako metoda trepanacyjna.

Objektem badania były trzy modelowe doczołowe złącza spawane wykonane ze stali S235, oznaczone jako P1, P2 i P3. Próbkę P2 została odprężona cieplnie, a próbka P3 była odprężona mechanicznie poprzez naprężenie statyczne do granicy plastyczności. Stan naprężenia wyznaczono metodą EB w szeregu punktów na obu powierzchniach próbek. Badania trepanacyjne metodą Gunnerta pozwoliły wyznaczyć odkształcenia względne dla szeregu wąskich pasków wyciętych w części centralnej złącza równoległe do osi spoiny. Te odkształcenia przeliczono na poziomy naprężenia resztkowego w kierunku osi spoiny. Wartości te zostały zestawione z wartościami składowej stycznej naprężenia wyznaczonego metodą EB dla tej części spoiny. Wykazano, iż odprężanie cieplne praktycznie usuwa naprężenie spawalnicze, a odprężanie mechaniczne zmniejsza to naprężenie znacząco. Wyniki badania oboma metodami okazały się być zgodne jakościowo i także ilościowo – po uwzględnieniu ujawnionego metodą EB efektu wygięcia płyt. To świadczy o skuteczności i użyteczności metody EB dla oceny stanu naprężenia w elementach stalowych.

**Słowa kluczowe:** naprężenie resztkowe; złącze spawane; efekt Barkhausena; metoda trepanacyjna

### 1. Wstęp

Powszechnie wiadomo, że poziom dodatniego naprężenia resztkowego wzdłuż osi spoiny doczołowego złącza spawanego typowych stali konstrukcyjnych osiągać może granicę plastyczności. Jest to czynnik ograniczający zakres bezpiecznej eksploatacji obciążanych mechanicznie złącz spawanych. Można i należy wskazać tu na dwa komplementarne i ciągle aktualne zagadnienia techniczne o dużym znaczeniu praktycznym dla bezpiecznej eksploatacji złącz spawanych: 1 - skuteczna i efektywna ekonomicznie technologia redukcji naprężenia pospawalniczego oraz 2 – praktycznie użyteczna metoda pomiaru stanu tego typu naprężenia w celu

oceny skuteczności zastosowanego procesu odprężania. Opracowana przez NNT sp. z o.o. procedura badania tą metodą o nazwie PB01 [1] uzyskała uznanie Polskiego Rejestru Statków [2]. Dotychczasowe pozytywne weryfikacje metody bazującej na EB polegały na konfrontacji jej wyników z wynikami metod nieniszczących, takich jak metoda Mathara czy też metoda wykorzystująca dyfrakcję promieni X, [3]. Niniejsza praca jest poświęcona przedstawieniu wyników porównania wskazań metody EB z wynikami metody niszczącej, określanej jako metoda trepanacyjna, [4]. Badania te wykonano we współpracy z Instytutem Spawalnictwa. Instytut Spawalnictwa przygotował trzy modelowe złącza doczołowe. Dwa złącza odprężono odpowiednio cieplnie i mechanicznie. Po wykonaniu badań metodą EB stan

\*Autor korespondencyjny. E-mail: boleslaw.augustyniak@nntlab.com

naprężenia zbadano metodą trepanacyjną. Ten eksperyment dostarczał materiału badawczego skojarzonego z wymiennymi wyżej dwoma zagadnieniami technicznymi. Niniejsza publikacja prezentuje podstawowe informacje o badanych próbkach, zastosowanych metodach wyznaczania naprężenia, a także główny rezultat pracy – porównanie wskazań obu metod w przedmiocie rozkładu poziomego naprężenia w kierunku równoległym do osi spoiny wzdłuż linii prostopadłej do osi spoiny.

## 2. Opis próbek

Przygotowano 3 próbki spawane doczołowo z ukosowanych płyt ze stali w gatunku S235 o grubości  $t = 10$  mm. Próbki te oznaczone są jako P1, P2 i P3. Wymiary próbek po spawaniu: długość pakietu  $L = 400$  mm, szerokość pakietu  $S = 110$  mm. Przed spawaniem obie płyty ustabilizowano za pomocą dwóch standardowych szczipień. Spawanie metodą MAG przeprowadzono na robocie spawalniczym marki CLOOS przy pomocy drutu o średnicy 1,2 mm w gatunku G3Si1 (12.51 ESAB) w trzech warstwach: I warstwa – przetopowa, II i III warstwy – wypełniające. Spoiny ułożono na długości około 240 mm, pozostawiając za każdej strony próbki nieospawane odcinki o długości około 80 mm. Pierwszą z próbek, oznaczoną jako P1, pozostawiono bez żadnych zabiegów jako próbkę odniesienia. Drugą próbkę - oznaczoną jako P2 - po spawaniu poddano wyżarzaniu odprężającemu w temperaturze 650°C w czasie 1 godziny. Trzecia próbka - oznaczona numerem P3 - została poddana odprężaniu mechanicznemu. Operacja ta ma na celu redukcję naprężeń spawalniczych poprzez przeciążenie elementu ze spoiną. Sposób ten zwany odprężaniem mechanicznym polega na wywołaniu dodatkowego stanu naprężeń, który sumując się z naprężeniami własnymi, powoduje odkształcenia plastyczne. Musi być spełniony warunek, że suma naprężeń od obciążeń zewnętrznych i naprężeń własnych osiągnie wartość granicy plastyczności materiału, a wartość naprężeń własnych w osi spoiny osiąga wartość granicy plastyczności materiału podstawowego, [4]. Obciążenie próbki było tak dobrane, aby wywołać naprężenie o wartości bliskiej umownej granicy plastyczności materiału podstawowego (blach), która w tym konkretnym przypadku wyniosła  $R_{p0,2} = 280$  MPa. Próbka była poddana sile rozciągającej w czasie 1 min i następnie została odciążona.

## 3. Metody wyznaczania naprężenia

Poniżej są przedstawione podstawowe informacje o obu sposobach wyznaczania stanu naprężenia.

### 3.1 Metoda wykorzystująca efekt Barkhausena

Efekt Barkhausena kojarzony jest ze skokowym ruchem granic domen (GD) magnetycznych podczas przemagnesowywania ferromagnetyka. Generowane podczas tego skoku GD fale elektromagnetyczne indukują impulsy napięcia w cewce detekcyjnej zbliżonej do magnesowanego materiału, tworząc charakterystyczny 'szumowy' sygnał napięciowy efektu Barkhausena, [5]. Naprężenie wewnętrzne długo zasięgowe (w skali rzędu mm) modyfikuje strukturę domen magnetycznych, a tym samym ulegają zmianie warunki magnesowania. W szczególności materiał rozciągany magnesuje

się łatwiej niż materiał ściskany, a w konsekwencji tego natężenie EB jest największe, gdy kierunek magnesowania sondy EB jest równoległy do kierunku składowej głównej naprężenia oraz najmniejsze, gdy magnesuje się materiał w kierunku prostopadłym do poprzedniego. Przy wyznaczaniu stanu naprężenia za pomocą efektu Barkhausena korzysta się z tak zwanych kalibracyjnych funkcji odwrotnych  $\varepsilon = FO(X)$ . Są one tworzone poprzez 'odwrócenie' zmierzonej dla próbki wzorcowej zależności natężenia EB od zadanego poziomu odkształcenia  $\varepsilon$ . Parametr  $X$  jest ilorazem zmierzonego na obiekcie natężenia EB i natężenia EB przyjętego za natężenie odpowiadające stanowi nienaprężonemu. Należy podkreślić, iż w przypadku materiału anizotropowego kalibrację należy wykonać niezależnie dla kierunku 'łatwego magnesowania' i dla kierunku 'trudnego magnesowania', a następnie wykorzystywać odpowiednio te zależności, [6]. Znając rozkłady kątowe natężenia EB, można wyznaczyć wartości ekstremalne odkształcenia, a więc i wartości składowych głównych  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$ , a w kolejnym kroku składowe główne naprężenia  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  wraz z ich kierunkami, stosując znane dla przypadku płaskiego stanu naprężenia relacje między składowymi głównymi obu tych wielkości.

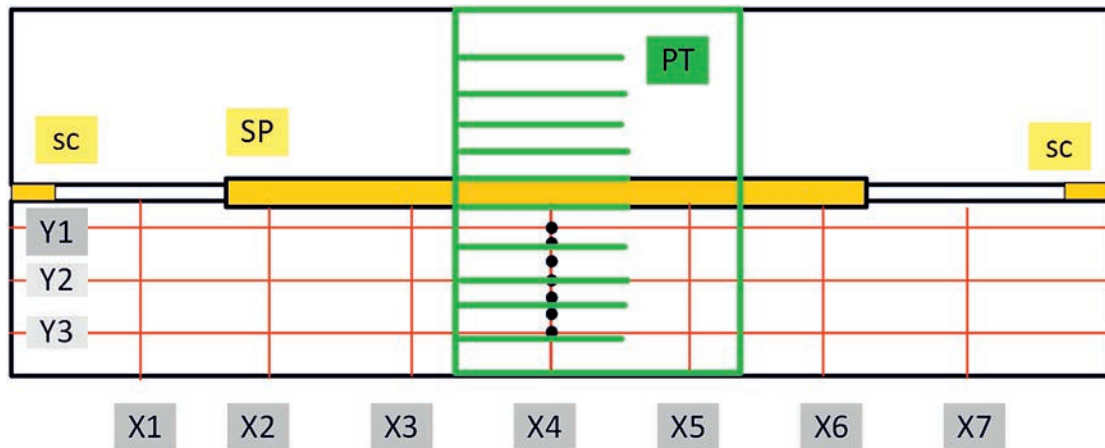
### 3.2 Metoda trepanacji

W metodzie trepanacji stosowanej przez Instytut Spawalnictwa [6] na badanym obiekcie nanosi się szereg par 'punktów bazowych' – otworów odległych od siebie o daną wartość  $L$ . W celu ujawnienia składowej naprężenia własnego wzdłuż osi spoiny punkty bazowe ustala się na liniach równoległych do osi spoiny. Po pomiarze wartości  $L$  dla poszczególnych par punktów bazowych wycina się obszar próbki z punktami bazowymi i wykonuje się rozcięcia między bazami pomiarowymi. Po wykonaniu rozcięć zostaje dokonany kolejny pomiar odległości między punktami bazowymi, uzyskując wartość  $L'$ . Względna zmiana odległości  $L'$  i  $L$  między parą punktów odniesienia traktowana jest jako miara odkształcenia materiału w badanym materiale przed wycięciem danego fragmentu. Jest to wartość, która jest estymacją wartości średniej po grubości odkształcenia  $\varepsilon_s$  z odcinka o długości  $L$ . Odkształcenie  $\varepsilon_s$  wyciętego fragmentu materiału można przeliczyć formalnie na równoważne mu naprężenie  $\sigma_s$  z elementarnej relacji Hooke'a. W przypadku badanych tu złączy doczołowych otwory bazowe nawierca się wzdłuż szeregu odcinków równoległych do osi spoiny. Tym samym metodą trepanacyjną wyznacza się składowe odkształcenia w kierunku równoległym do osi spoiny, a w konsekwencji wylicza przybliżone wartości składowych naprężenia w tym samym kierunku.

## 4. Wyniki badania

Na Rys. 1 przedstawiono schemat próbki z naniesionymi informacjami o miejscach pomiaru EB i położeniu punktów referencyjnych dla metody trepanacyjnej.

Na schemacie tym widoczne są dwie płyty zespolone spoiną (SP) i z dwoma punktami wstępnego montażu (sc). Natężenie EB było wyznaczane na dolnej płycie, po obu jej stronach, w punktach leżących na przecięciu trzech linii poziomych (Y1, Y2, Y3) i siedmiu linii pionowych (od X1

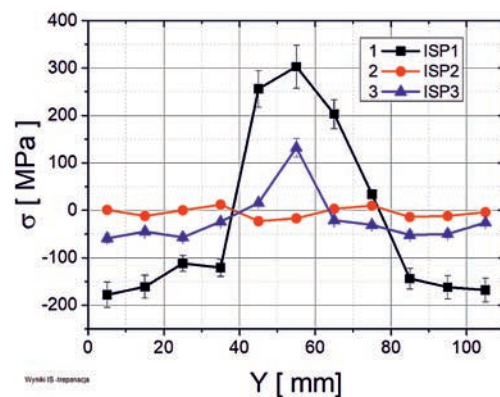


Rys. 1. Schemat próbki wraz oznaczeniami obszarów badania metodą EB i metodą penetracyjną  
Fig. 1. Diagram of the sample with indications areas of BE and trepanation methods investigation



Rys. 2. Obraz wycinka PT z próbki P2 dla badań trepanacyjnych  
Fig. 2. Picture of part PT used for trepanation method extracted from sample P2

do X7). W każdym punkcie badano natężenie EB w trzech kierunkach, określonych za pomocą kąta  $\alpha$  między osią pola i osią spoiny:  $k_1 - \alpha = 0^\circ$ ,  $k_2 - \alpha = 45^\circ$ ,  $k_3 - \alpha = 90^\circ$ . Ten zbiór wyników uzyskany dla 25 punktów tworzy serię A. Dodatkowo zbadano także natężenie EB w siedmiu punktach położonych wzdłuż linii X4. Są one zaznaczone na Rys. 1 pełnymi kołami. Pomiaru te wykonano po obu stronach płyty i także w trzech kierunkach ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ). Na Rys.1 narysowano zieloną linią fragment przeznaczony do wycięcia na użytek metody trepanacyjnej (PT). Zaznaczone też zostały na fragmencie PT linie następnego jego nacięcia, tworząc 11 pasmów dla pomiaru odkształcenia metodą trepanacyjną opisaną w [7]. Punkty 'referencyjne' metody trepanacyjnej są położone wzdłuż widocznych pasmów w odległości  $L = 40$  mm. Stan końcowy fragmentu PT (opisany na Rys. 1) dla próbki P2 jest pokazany na Rys. 2. Jest to obraz górnej powierzchni wycinka – od strony lica, z widocznymi punktami 'referencyjnymi' służącymi do wyznaczania odkształceń metodą trepanacyjną.



Rys. 3. Rozkład poziomu naprężenia wyznaczonego metodą trepanacyjną dla próbek: 1 - P1, 2 - P2 i 3 - P3.  
Fig. 3. Distribution of stress evaluated with trepanation method for the samples: 1 - P1, 2 - P2 i 3 - P3.

Do badań wykorzystano ekstensometr mechaniczny firmy Fritz-Staeger. Przyrząd ten umożliwia pomiar z dokładnością  $10^{-4}$  mm na bazach 20, 40, 60 i 100 mm. Punktami pomiarowymi dla tego ekstensometru są stalowe kulki o średnicy  $\varnothing 1,588$  mm (1/16"), które włączają się w otworki o średnicy  $\varnothing 1,3$  mm wywiercone w badanym elemencie, które zostały wyżej nazwane punktami bazowymi[7].

Niżej przedstawione porównanie wyników badania z wykorzystaniem pomiaru natężenia EB z wynikami badania metodą trepanacyjną bazuje na serii pomiarów natężenia EB w siedmiu punktach położonych wzdłuż linii X4. Te miejsca są zaznaczone czarnymi punktami na Rys. 1. Natężenie EB badano miernikiem MEB-2c [8], rejestrując wartość sygnału  $V_2$ , stanowiącego wartość średnią napięcia skutecznego  $U_s$  z wielu okresów magnesowania. Dla ilościowej oceny stanu naprężenia posłużono się wynikami kalibracji wykonanej na próbkach o kształcie płytek (prostokątów) o szerokości  $s = 20$  mm i długości  $L = 200$  mm. Próbkę tę wycięto w kierunku równoległym i w kierunku prostopadłym do kierunku głównego płyty referencyjnej w stanie dostawy dostarczonej przez Instytut Spawalnictwa. Kierunek główny tej płyty pokrywał się z osią główną płyt spawanych. Wstępne badania rozkładu kątownego natężenia EB na płycie referencyjnej w stanie dostawy ujawniły praktycznie izotropowy stan właściwości EB i analogiczny



po obu stronach płyty i tę izotropowość potwierdziły także wyniki badań kalibracyjnych.

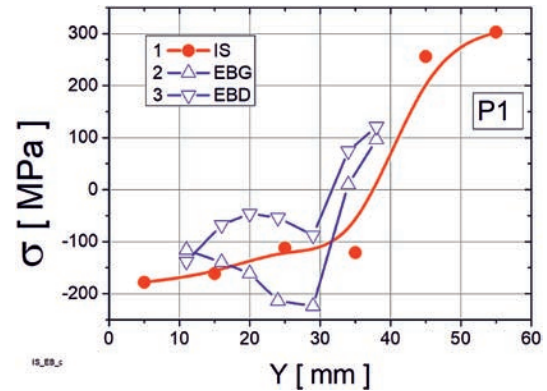
Prezentację wyników badania zaczynamy od wykresów poziomu naprężenia wyznaczonego metodą trepanacyjną na całym przekroju złącza spawanego. Na Rys. 3 pokazane są trzy wykresy wartości naprężenia  $\sigma$  w funkcji położenia linii bazowej. Współrzędne położenia linii bazowej odnoszą się do skali Y zaczynającej się na krawędzi płyty, na której wykonywano badania EB. Oś spoiny (linia bazowa nr 6) ma współrzędne  $Y = 55$  mm)

Wykresy te ujawniają charakterystyczne dla trzech próbek właściwości wyznaczonego wzdłuż linii prostopadłej do osi spoiny dla kierunku równoległego do osi spoiny. W stanie 'po spawaniu' (próbka P1) w strefie spoiny występują naprężenia silnie rozciągające (o wartości maksymalnej około 300 MPa). W strefie zewnętrznej krawędzi brzegowej spojonych płyt naprężenie ma znak ujemny (ściskanie) i poziom około -180 MPa. Obróbka cieplna (przypadek próbki P2, wykres 2) ewidentnie zmniejszyła poziom naprężeń resztkowych. Widać, że waha się on w przedziale wartości pomiędzy około +10 MPa i -25 MPa. Odprężanie mechaniczne (przypadek próbki P3, wykres 3) również ogólnie obniża poziom naprężenia pospawalniczego, ale nie tak skutecznie, jak obróbka cieplna. W strefie spoiny występuje naprężenie rozciągające na poziomie około 130 MPa i zmienia się ono na naprężenie ściskające przy krawędziach płyt o wartość około -60 MPa. Obraz powyższy jest jakościowo zgodny z oczekiwanym stanem naprężenia resztkowego dla złącza doczołowego bez obróbki odprężającej (Próbka P1) i także dla próbek odprężanych i cieplnie (P2) i mechanicznie (P3).

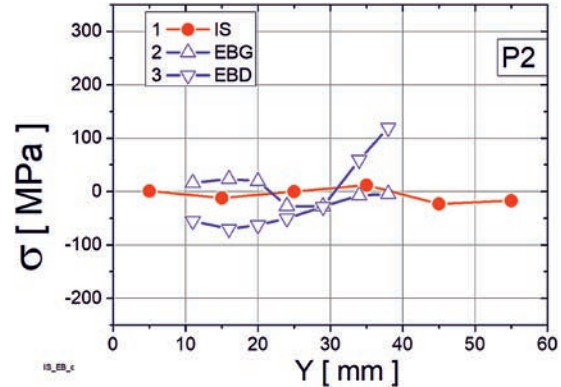
Jest to zatem stan, który można uznać za 'wzorcowy' i tym samym za odpowiedni dla skonfrontowania z wynikami obliczeń poziomu naprężenia za pomocą EB. Pomiary EB były wykonane dla dolnej płyty i one zostaną porównane z wartościami naprężenia wyznaczonym metodą trepanacyjną z tego fragmentu złącza. Na trzech kolejnych rysunkach odnoszących się do trzech próbek pokazane są (w funkcji położenia 'punktu' od dolnej krawędzi płyty) trzy wykresy wartości naprężenia: 1 - z metody trepanacyjnej (IS), 2 - z efektu Barkhausena dla górnej powierzchni płyty (EBG) i 3 - z efektu Barkhausena dla dolnej powierzchni płyty (EBD).

Jakościowa analiza porównawcza wykresów z wartości podanych przez IS i z wartości uzyskanych z wykorzystaniem EB pozwala na stwierdzenie, że wskazania obu metod są ogólnie 'zbieżne' co do charakteru zmian, aczkolwiek nie identyczne. Pierwsza cecha rozkładów uzyskanych metodą EB to 'lustrzany' charakter przebiegu wykresów z górnej i dolnej powierzchni płyty względem linii 'pośredniej', za jaką można by uznać linię wykreśloną z wartości średnich dla górnej i dolnej strony płyty. Taki efekt wytłumaczyć można tym, iż stan naprężenia płyty w tym obszarze nie był jednorodny 'po głębokości'. Przyjąć należy tezę, że badany fragment płyty był również makroskopowo naprężany momentem zginającym. Należy też zauważyć i podkreślić drugą ważną cechę rozkładów EB: przebiegają one prawie symetrycznie względem wartości naprężenia uzyskanych metodą trepanacyjną. Oznacza to, że wartości wskazane metodą BE - po uśrednieniu wskazań z obu stron - są zbieżne również ilościowo ze wskazaniami metody trepanacyjnej.

Ewidentne są widoczne na Rys. 4 i Rys. 5 oscylacje wartości naprężenia wyznaczonego metodą EB. Wynika to z lokalnych zmian poziomu sygnału EB na powierzchni próbki (a tym samym i poziomu naprężenia). Przyczyną zmian w natężeniu EB mogą być odkształcenia lokalne płyty, które nie są ujawniane metodą trepanacyjną. Metoda trepanacyjna cechuje się - z oczywistych względów - relatywnie niską rozdzielczością 'przestrzenną' swoich wskazań, w przeciwieństwie do metody EB. Pomiary natężenia EB przy użyciu sondy miernika MEB2c można bowiem wykonywać ze skokiem około 2 mm.



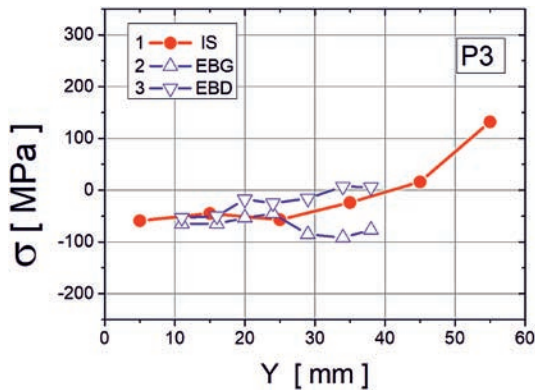
Rys. 4. Rozkład poziomu naprężenia wyznaczonego metodą trepanacyjną (1 - IS) oraz z wykorzystaniem efektu Barkhausena dla strony górnej (2 - EBG) i dla strony dolnej (3 - EBD) próbki P1.  
Fig. 4. Distribution of stress evaluated with trepanation method (1 - IS) and Barkhausen effect on upper side (2 - EBG) and bottom side (3 - EBD) of the sample P1.



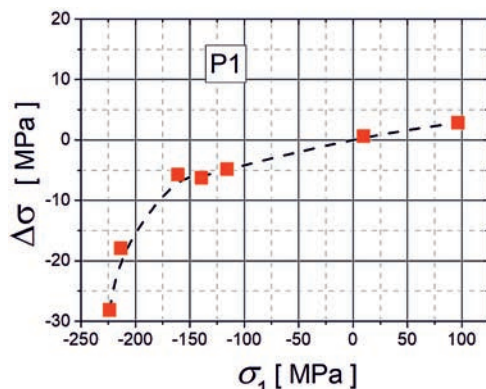
Rys. 5. Rozkład poziomu naprężenia wyznaczonego metodą trepanacyjną (1 - IS) oraz z wykorzystaniem efektu Barkhausena dla strony górnej (2 - EBG) i dla strony dolnej (3 - EBD) próbki P2.  
Fig. 5. Distribution of stress evaluated with trepanation method (1 - IS) and Barkhausen effect on upper side (2 - EBG) and bottom side (3 - EBD) of the sample P2.

Należy też odnieść się do poziomu i przyczyn ewentualnych różnic w wartościach wskazań obu metod co do poziomu składowej naprężenia w kierunku równoległym do osi spoiny. Dla metody trepanacyjnej wyznaczana jest wartość średniego odkształcenia materiału w tym właśnie kierunku. Dla strefy centralnej złącza doczołowego kierunek osi głównej naprężenia jest istotnie równoległy do osi spoiny i tym samym owo odkształcenie może być traktowane jako miara składowej głównej odkształcenia - oznaczonej tu jako  $\epsilon_1$ . Druga składowa odkształcenia w kierunku prostopadłym do osi spoiny (składowa  $\epsilon_2$ ) - z oczywistych przyczyn - nie jest

znana w przypadku stosowania metody trepanacyjnej. Tego ograniczenia nie ma w metodzie wykorzystującej pomiary EB. Pomiar natężenia EB w szczególności w trzech kierunkach ( $k1 - \alpha = 0^\circ$ ,  $k2 - \alpha = 45^\circ$ ,  $k3 - \alpha = 90^\circ$ ) dostarcza bowiem informacji o poziomie odkształcenia w tych kierunkach, a z tych wartości można wyliczyć wartości składowych głównych i odkształceń i naprężenia, a także kierunek osi głównej.



Rys. 6. Rozkład poziomu naprężenia wyznaczonego metodą trepanacyjną (1 – IS) oraz z wykorzystaniem efektu Barkhausena dla strony górnej (2 – EBG) i dla strony dolnej (3 – EBD) próbki P2.  
Fig. 6. Distribution of stress evaluated with trepanation method (1 – IS) and Barkhausen effect on upper side (2 – EBG) and bottom side (3 – EBD) of the sample P2.



Rys. 7. Różnica wartości składowych naprężenia  $\sigma_1$  i  $\sigma_x$  wyliczonych z EB dla próbki P1, górna powierzchnia płyty.  
Fig. 7. Difference of stress components  $\sigma_1$  and  $\sigma_x$  evaluated from EB for sample P1, upper side.

Interesujący nas przypadek – czyli stan naprężenia wzdłuż linii symetrii (oś X4) złącza spawanego, charakteryzuje się tym, że oś główna stanu naprężenia jest równoległa do osi spoiny. Tym samym składowa główna naprężenia  $\sigma_1$  może być wyznaczona z wartości odkształceń zmierzonych w kierunku  $k1 - \alpha = 0^\circ$  i  $k3 - \alpha = 90^\circ$ . Takie obliczenia wykonano dla wszystkich próbek i te wyniki były wyżej przedstawiane. Znając wartości odkształcenia dla kierunku  $k3 - \alpha = 90^\circ$ , wyznaczono również wartość naprężenia  $\sigma_x$  w tym samym kierunku w sposób analogiczny dla metody trepanacyjnej, a więc wykorzystując tylko wartość składowej  $\epsilon_1$ :  $\sigma_x = E \cdot \epsilon_1$ . Zbadano następnie różnicę między wartością  $\sigma_1$  oraz wartością  $\sigma_x$  dla górnej powierzchni próbki P1. Ta strona cechuje się największą dynamiką zmian natężenia EB. Wartości tej różnicy ( $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_x$ ) wykreślona została na Rys. 7 w funkcji składowej  $\sigma_1$ . Oczywiście – te same wartości  $\sigma_1$  zostały

podane na Rys. 4 na wykresie 2, czyli dla przypadku EBG.

Jak widać, różnice między wartościami  $\sigma_1$  oraz  $\sigma_x$  są relatywnie małe (rzędu kilku MPa) dla  $\sigma_1$  z przedziału  $\pm 100$  MPa. Tym samym nie ma podstaw do negowania zasadności porównywania wskazań obu metod dla stanu naprężenia w zakresie umiarkowanych poziomów i to niezależnie od znaku owego naprężenia.

Czytelnik zauważył zapewne, że nie są tutaj referowane wyniki obliczeń i analizy stanu naprężenia wyznaczonego metodą EB dla pozostałych fragmentów tych trzech próbek. Wyniki te będą przedstawione w innym artykule. Można tu jednak nadmienić, że obraz, a właściwie mapa rozkładu stanu naprężenia dla całej płyty, ujawnia efekt wygięcia płyt w kierunku prostym do płaszczyzny, w której leży oś spoiny. Takich efektów nie może wykryć – co jest także oczywiste – metoda trepanacji.

## 5. Podsumowanie

Porównano stan naprężenia resztkowego wyznaczonego metodą nieniszczącą (wykorzystując efekt Barkhausena EB) oraz metodą trepanacyjną. Obiektem badania były trzy modelowe doczołowe złącza spawane wykonane ze stali S235, oznaczone jako P1, P2 i P3. Próbkę P2 została odprężona cieplnie, a próbkę P3 była odprężona mechanicznie poprzez naprężanie statyczne do granicy plastyczności. Wykazano, iż odprężanie cieplne praktycznie usuwa naprężenie spawalnicze, a odprężanie mechaniczne zmniejsza to naprężenie znacząco. Wyniki badania oboma metodami okazały się być zgodne jakościowo i także ilościowo – po uwzględnieniu ujawnionej metodą EB efektu wygięcia płyt. To świadczy o dużej skuteczności i użyteczności metody EB dla oceny stanu naprężenia w elementach stalowych, a w szczególności złączy spawanych.

## 6. Literatura/References

- [1] B. Augustyniak; „Procedura badania PB01 stanu naprężenia w elementach stalowych z wykorzystaniem efektu Barkhausena,” Przegląd Spawalnictwa, Vol. 8, s. 67-9, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.26628/ps.v8i1.1836>
- [2] Świadectwo Uznania PRS nr TT/821/710405/17, Gdańsk, 2017
- [3] Raport końcowy z realizacji projektu NCBiR nr PBS1/A9/14/2012 pt. Opracowanie magnetycznej metody oceny stanu naprężeń w materiałach konstrukcyjnych zwłaszcza anizotropowych, Politechnika Gdańska, 2015
- [4] Piotr Sędek, „Odprężanie mechaniczne”, Praca Zbiorowa pod redakcją prof. dr. hab. inż. Jana Pilarczyka, Poradnik Inżyniera, Spawalnictwo, cz.1, rozdział 13.6, str. 587-592. Wyd. WNT W-wa, 2003
- [5] B. Augustyniak, Zjawiska magnetosprężyste i ich wykorzystanie w nieniszczących badaniach materiałów, Monografia 38, Wyd. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2003
- [6] L. Piotrowski, M. Chmielewski, B. Augustyniak, „Procedura szybkiego wyznaczania stanu naprężeń własnych za pomocą sondy z wirującym przemiennym polem magnetycznym – przypadek złączy spawanych ze stali magnetycznie anizotropowej”, Energetyka, vol. 6, s. 318-325, 2016
- [7] K. Krasnowski, „Influence of stress relief annealing on mechanical properties and fatigue strength of welded joints of thermomechanically rolled structural steel grade S420MC”, Archives of metallurgy and materials, vol. 54, no. 4, pp. 1059-1072, 2009
- [8] Instrukcja obsługi - Miernik MEB2c, Mag-Lab sc, Gdańsk, 2010