

Magnetyczna ocena naprężeń w instalacjach rurociągowych z wykorzystaniem efektu Barkhausena

Magnetic evaluation of stress in the operation of pipeline using the Barkhausen effect

Streszczenie

Elementy konstrukcji stalowych wykazują niezerowy stan naprężeń na każdym etapie eksploatacji, od fazy wytwarzania do wyłączenia obiektu. Znajomość wielkości, a także charakteru naprężeń, w tym wartości naprężeń głównych i kierunków ich działania, pozwala na określenie stopnia wyczerpania trwałości konstrukcji lub poszczególnych jej elementów. Do badań stanu naprężeń w materiałach stalowych stosowane są m.in. metody tensometryczne i magnetyczne. W artykule przedstawiono wyniki badań naprężeń własnych w wybranych fragmentach rurociągu. Celem badań było określenie przydatności metody magnetycznej do określenia stanu naprężeń w tego typu konstrukcji. Mierzono poziom natężenia efektu Barkhausena (EB) w wybranych punktach, a następnie wyznaczono znak i poziom naprężeń w tych fragmentach. Wyniki badań za pomocą EB zostały zweryfikowane przez pomiar naprężeń metoda tensometryczną.

Słowa kluczowe: rurociągi, naprężenia, efekt Barkhausena

Abstract

Elements of steel structures exhibit a non-zero state of stress at every stage of operating, from the manufacturing phase to the recycling of the object. Knowledge of the size and the nature of stress, including the principal stresses and directions of their actions cause to determination the degree of exhaustion of the sustainability of the structure or its individual components. To test the stress state in the steel materials are used, inter alia, strain gauge and magnetic methods. The paper presents the results of stresses in the selected parts of the pipeline. The aim of the study was to determine the usefulness of magnetic methods for determining the state of stress in this type of construction. Measured the level of intensity of the Barkhausen effect in certain points, and then determined the character and the level of stress in these passages. The test results by means of the EB has been verified by measurement of stress by the strain gauge method.

Keywords: pipelines, stress, Barkhausen effect

Wstęp

Eksploatacja urządzeń ciśnieniowych w energetyce zawodowej spotyka się z problemami zapewnienia bezpieczeństwa ich obsługi. Bezawaryjne użytkowanie podyktowane jest również względami ekonomicznymi. Szczególnym obciążeniem cieplno-mechanicznym poddawane są elementy kotłów parowych i rurociągów wysokoprężnych.

W krajowej, jak i zagranicznej energetyce znane są przypadki awarii walczaków kotłowych, elementów ciśnieniowych kotłów oraz rurociągów. Urządzenia te podlegają dozorowi Urzędu Dozoru Technicznego.

Najczęstsze awarie rurociągów wysokoprężnych lokalizowane są w elementach kształtowych (łuki, trójniki, czwórniki) i spoinach. Już na etapie projektowym, zgodnie z Warunkami Technicznymi Dozoru Technicznego przyjmowane są wskaźniki bezpieczeństwa dla zakładanych parametrów pracy. Wielkości te, w zależności od konkretnego obiektu wynoszą:

- temperatura robocza < 540°C,
- ciśnienie robocze do 40 MPa.

Elementy użyte do budowy muszą mieć, zgodnie z normami, certyfikat producenta zawierający podstawowe dane materiałowe i wytrzymałościowe.

Mgr Dariusz Mężyk – Instytut Energetyki, Warszawa.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: dariusz.mezyk@ien.com.pl

Dotychczas stosowane Polskie Normy wykorzystywane były również przy wykonywaniu ponownych obliczeń wytrzymałościowych dla obiektów, które pracowały projektowy czas eksploatacji lub zbliżyły się do niego. Obliczenia te mają za zadanie określenie aktualnej wytrzymałości obiektu. Pojmując problem szerzej, z uwzględnieniem zagadnień z zakresu mechaniki pękania i trwałości materiałów, obliczenia wytrzymałościowe wykonywane za pomocą programów do symulacji komputerowej mogą dać cenne wskazówki, zapewniając możliwość bieżącej oceny wytrzymałości obiektu, a także oceny stopnia zagrożenia awarią w warunkach użytkowania. Dotyczy to praktycznie całej energetyki, ponieważ elektrownie i elektrociepłownie podlegające UDT [1] przekroczyły okres obliczeniowy i poddawane są procesom modernizacyjnym.

Eksploracja i diagnostyka rurociągów

W badaniach zachowania rurociągów konieczne jest wyznaczenie występujących w nich naprężeń i przemieszczeń z uwzględnieniem obszarów krytycznych. Do obliczeń przyjmuje się uproszczony model rurociągów, jakim jest belka zamocowana za pomocą systemu zawiesznień i utwierdzeń. Obciążenie rurociągu stanowi ciśnienie wewnętrzne, rozkład temperatury wzdłuż rurociągu oraz ciężar rurociągu i reakcje podpór.

W wyniku otrzymuje się wartości sił, momentów gnących i skręcających oddziałujących na rurociąg oraz wartości dylatacyjnych przemieszczeń cieplnych. Na tej podstawie określa się obszary, gdzie wyłączenie osiągnie największe wartości. Wyznaczenie charakterystyki obciążenia krytycznych elementów, stanowiącej relacje pomiędzy stanem naprężenia, odkształcenia, temperatury i czasem, uzyskuje się przy zastosowaniu metody elementów skończonych przy założeniu sprężysto-plastycznego modelu materiału. Równoczesne działanie obciążeń mechanicznych i obciążeń cieplnych wynikających ze zmiany temperatury wywołuje odpowiednie stany odkształceń, można przedstawić zależnością:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\sigma} + \beta \Delta T$$

gdzie:

ε_{σ} – odkształcenie liniowe wywołane stanem naprężenia,

β – wsp. rozszerzalności liniowej,

ΔT – przyrost temperatury,

ε – sumaryczne odkształcenie liniowe.

Związek ten jest o tyle złożony, że jest zależny od modułów sprężystości, które wraz ze współczynnikiem są zależne od temperatury. Uwzględnia się to, wprowadzając wartości średnie w rozpatrywanym obszarze temperatury. Naprężenia wywołane różnicą temperatury na grubości ścianki rurociągu przyjmują wartości kilkudziesięciu MPa.

Wytrzymałość określa zdolność materiału do przeniesienia sumy naprężeń występujących w stanie nieobciążonym oraz powstających pod działaniem obciążeń roboczych – cieplnych i mechanicznych. Zapas trwałości czasowej wyczerpuje się w trakcie eksploatacji i zależy od gatunku, właściwości mechanicznych i mikrostruktury materiału oraz obciążeń mechanicznych i wywołanych zmiennych stanów naprężeń, a także od charakteru cykli cieplnych.

Ze względu na złożoność zjawisk występujących w czasie eksploatacji w zmiennej temperaturze trudne jest opracowanie uniwersalnej metody badania odporności materiału na zmęczenie cieplne, a zatem i jego trwałości. Na ogół przyjmuje się, że zmęczenie cieplne materiału to proces powstawania i rozwoju pęknięć w materiale oraz zmiany jego właściwości wywołane wielokrotnymi zmianami temperatury [2].

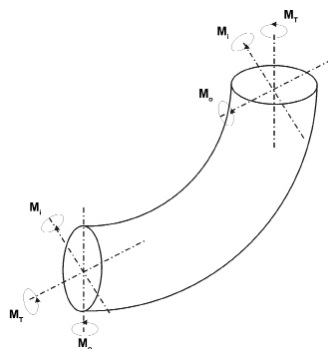
Zmęczenie cieplne jest procesem zmęczeniowym niskocyklowym, gdzie istotną składową amplitudy odkształcenia jest odkształcenie plastyczne zachodzące w materiale w każdym cyklu zmian temperatury.

Głównymi czynnikami wpływającymi na przebieg zmęczenia cieplnego są:

- czynniki charakteryzujące wymianę ciepła,
- czynniki geometryczne obiektu,
- czynniki wynikające z właściwości fizycznych i mechanicznych materiału,
- parametry cyklu zmian temperatury.

Rurociąg łączący kocioł z turbiną poddany jest w czasie eksploatacji obciążeniom wynikającym ze zmian temperatury, ciśnienia czynnika oraz reakcji zamocowań i ograniczeń dylatacji cieplnej. Objawia się to powstawaniem dodatkowych naprężeń w materiale, skracając czas bezawaryjnej eksploatacji. Problem trwałości rurociągów jest głównie związany z trwałością łuków, tym bardziej, że trwałość eksploatacyjna łuków jest około czterokrotnie mniejsza niż odcinków prostoliniowych. Łuki głównych rurociągów pary mogą ulec rozerwaniu bez poprzedzającej nieszczelności.

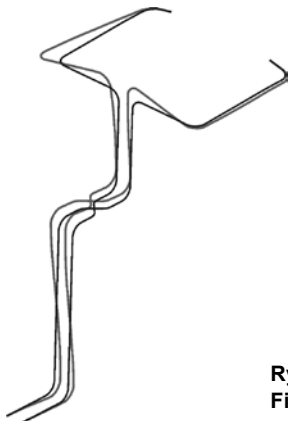
Utrudnienie realizacji przemieszczeń termicznych wywołuje deformacje trasy rurociągu, co prowadzi do zmiany kierunku spadu poziomych odcinków i gromadzenia się kondensatu. Zgodność rzeczywistej geometrii trasy rurociągu z geometrią projektową (po wykonaniu naciągów kompensacyjnych), z uwzględnieniem



$$M_R = \sqrt{M_o^2 + M_i^2 + M_r^2}$$

Rys. 1. Schemat obciążenia łuku momentami gnącymi i skręcającymi
Fig 1. Diagram of load of arc bending moments and torsion

spadów poziomych odcinków rurociągu, powinna być kontrolowana pomiarami geodezyjnymi położenia rurociągu. Długotrwała eksploatacja powoduje utratę skuteczności naciągów montażowych, co jest bezpośrednią przyczyną zmiany wielkości i kierunków spadów związanych z pracą cieplną rurociągu (rys. 2). Efektem jest niekorzystne zjawisko gromadzenia się kondensatu powodujące powstawanie korków parowo-wodnych.



Rys. 2. Deformacja cieplna rurociągu
Fig 2. Thermal pipeline deformation

W trakcie długotrwałej eksploatacji ciśnieniowych obiektów energetycznych pracujących w wysokich temperaturach następuje wyczerpanie zapasu trwałości i zmiana struktury materiału. Jedną z przyczyn jest zmienny stan naprężeń oraz ich rozkład względem osi wzdłużnej rurociągów w kolejnych cyklach pracy obiektu.

Celem wykrycia wad produkcyjnych bądź eksploatacyjnych, stosuje się wiele metod badawczo-pomiarowych, których rezultaty stanowią kryterium oceny jakości i bezawaryjnej pracy rurociągu. Wśród nich jedną z kluczowych ról odgrywają pomiary stanu naprężeń materiału rurociągu.

Metodyka badań naprężeń metodą tensometryczną

Do badań stosowane są trójczłonowe foliowe rozezy tensometryczne kompensowane termicznie. Rozezy zainstalowane są w wybranych punktach badanych elementów. Po stabilizacji cieplnej układów pomiarowych rejestruje się wartości stanów równowagi dla każdego członu rozezy pomiarowej, a następnie wskazania kolejnego stanu równowagi. Odprężenie warstwy powierzchniowej badanego elementu powoduje koncentrację naprężeń własnych w obszarze rozezy, czemu towarzyszy powstanie odkształceń [3]. Odkształcenia te są mierzone (rys. 3 i 4). Wartości naprężeń głównych i kierunki ich działania wyznacza się za pomocą wzorów Mathar'a.

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_b}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{4A} (\varepsilon_b + \varepsilon_c) \pm \frac{E}{4B} \sqrt{(2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$$

gdzie:

σ_1, σ_2 – naprężenia główne,

α – kąt odchylenia naprężenia σ_1 od kierunku pomiarowego „a”,

E – moduł sprężystości podłużnej elementu badanego,

A, B – współczynniki zależne od konstrukcji rozety,

$\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ – mierzone odkształcenia.

Dla najczęściej badanych stali badanych w energetycznych instalacjach rurociągowych takich jak P91 i 13HMF, przyjęto moduł sprężystości podłużnej $E = 2,1 \times 10^5$ MPa [4].

Naprężenia zredukowane σ_{zred} oblicza się na podstawie hipotezy Hubera wykorzystując zależność obowiązującą dla dwukierunkowego stanu naprężeń jaki występuje w badanych warstwach powierzchniowych:

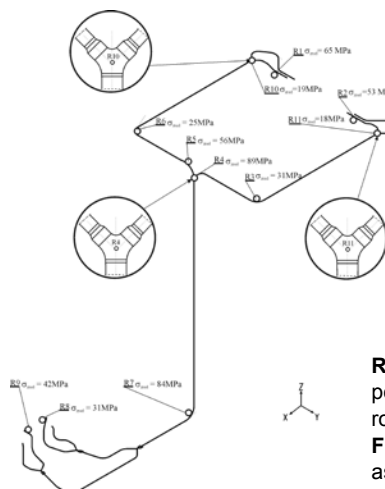
$$\sigma_{zred} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1\sigma_2}$$

Dla elementów stalowych przyjmuje się, że naprężenia własne, których wartość w każdym z kierunków głównych spełnia warunek $\sigma_{1,2} \leq 0,1R_e$ występują normalnie w konstrukcjach stalowych. Do określenia normalnego poziomu naprężeń można stosować również zależność $\sigma_{zred} \leq 0,1R_e$.



Rys. 3. Instalacja tensometryczna na rurociągu, wykonanie odwiertu odprężającego

Fig 3. Strain gauge installation on the pipeline



Rys. 4. Lokalizacja obszarów pomiarowych naprężeń na rurociągach pary

Fig 4. Location of stress measuring areas on the pipeline

Podstawy pomiaru naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkhausena

Ze względu na konieczność minimalizacji kosztów badań stanu naprężeń niezbędne wydaje się stosowanie metody, która cechuje się z jednej strony tym, iż jest dogodna do praktycznego stosowania (mając na uwadze znaczną liczbę punktów pomiarowych, koszt przygotowania powierzchni do pomiaru i czas jednostkowego pomiaru także czas obliczeń naprężeń), a z drugiej strony dostarcza wyników rzetelnych. Z tego powodu we współpracy z Politechniką Gdańską prowadzone są prace mające na celu wdrożenie do pomiaru naprężeń nieniszczącej metody magnetycznej opartej na efekcie Barkhausena.

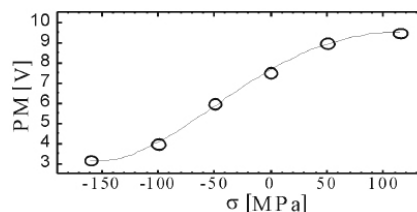
Odpowiedzialny za zjawisko histerezy magnetycznej skok Barkhausena [5] granicy domenowej wewnątrz magnesowanego materiału generuje dwa zjawiska fizyczne, które są bardzo dogodne do zastosowania w dziedzinie badań nieniszczących jakości materiału i stanu naprężeń. Te zjawiska to impulsowa zmiana indukcji magnetycznej przy powierzchni oraz impuls akustyczny docierający do powierzchni.

Zjawisko pierwsze jest wykorzystywane w metodzie określanej *metodą szumów Barkhausena*, choć powinna być określana jako metoda polowego efektu Barkhausena – dla odróżnienia od analogicznego efektu – tzw. *mechanicznego efektu Barkhausena* wywołanego zmiennym w czasie naprężeniem. W obu efektach sygnałem pierwotnym jest napięcie indukowane w cewce zbliżonej do powierzchni metalu. W przypadku zjawiska emisji impulsu akustycznego (określanej zjawiskiem emisji magneto-akustycznej) sygnałem pierwotnym jest napięcie generowane w przetwornikach piezoelektrycznych [6].

Efekt Barkhausena związany jest ze skokowymi przemieszczeniami głównie granic typu 180° . Tym samym wymuszona naprężeniem zmiana populacji tych granic „widoczna” jest w zmianie natężenia efektu Barkhausena. W przypadku jednoosiowych naprężeń i pola magnetycznego współosiowego z naprężeniem natężenie efektu Barkhausena powinno wzrastać dla naprężeń rozciągających i odpowiednio maleć dla naprężeń ściskających.

Na rysunku 5 przedstawiono wykres zależności tego parametru (określonego jako parametr PM) od poziomu naprężenia σ . Nasycenie zmian natężenia EB dla badanej stali występuje dla naprężeń na poziomie ok. ± 200 MPa, który bliski jest poziomowi granicy wytrzymałości. Dynamika zmian natężenia EB w funkcji naprężeń ma kluczowe znaczenie dla rozdzielczości metody, a tym samym i dla dokładności oceny naprężeń.

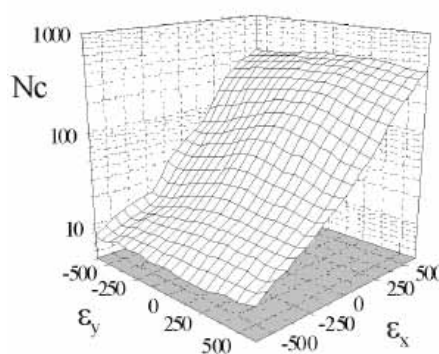
W warunkach przemysłowych pomiar sygnału Barkhausena możliwy jest przy magnesowaniu lokalnym za pomocą elektromagnesu w kształcie litery U oraz detekcji sygnału przez cewkę indukcyjną zbliżoną do magnesowanej powierzchni.



Rys. 5. Wpływ naprężeń na wartość maksymalną natężenia efektu Barkhausena

Fig 5. Effects of stress on the maximum intensity of the Barkhausen effect

W przypadku rurociągów wykonanych ze stali ferrytycznych można wykorzystać do pomiaru naprężeń własnych metody magnetyczne wykorzystując wpływ naprężeń na właściwości magnetyczne stali, np.: pomiar parametrów pętli histerezy magnetycznej, pomiar harmonicznych, czy też pomiar natężenia efektu Barkhausena (EB). Ta ostatnia metoda wydaje się być szczególnie przydatną dla potrzeb badań nieniszczących w przypadku badania rurociągów, gdyż spełnia wymienione wyżej warunki. Podkreślić też należy, że za pomocą tej metody można mierzyć odkształcenia w dowolnym kierunku na zakrzywionej powierzchni rurociągu. Korzystając z próbki materiału poddanej skalowaniu uzależniającemu liczbę impulsów N_c od naprężeń w kierunkach głównych (rys. 6) zwiększa się dokładność wyników badań.



Rys. 6. Funkcja skalowania dla płaskiego stanu naprężeń (stal St3)

Fig 6. Scaling function for the plain state of stress (steel St3)

W warunkach przemysłowych pomiar sygnału Barkhausena możliwy jest przy magnesowaniu lokalnym za pomocą elektromagnesu w kształcie litery U oraz detekcji sygnału przez cewkę indukcyjną zbliżoną do magnesowanej powierzchni.

W przypadku rurociągów wykonanych ze stali ferrytycznych można wykorzystać do pomiaru naprężeń własnych metody magnetyczne wykorzystując wpływ naprężeń na właściwości magnetyczne stali, np.: pomiar parametrów pętli histerezy magnetycznej, pomiar harmonicznych, czy też pomiar natężenia efektu Barkhausena (EB). Ta ostatnia metoda wydaje się być szczególnie przydatną dla potrzeb badań nieniszczących w przypadku badania rurociągów, gdyż spełnia wymienione wyżej warunki. Podkreślić też należy,

że za pomocą tej metody można mierzyć odkształcenia w dowolnym kierunku na zakrzywionej powierzchni rurociągu. Korzystając z próbki materiału poddanej skalowaniu uzależniającemu liczbę impulsów N_c od naprężeń w kierunkach głównych (rys. 6) zwiększa się dokładność wyników badań.

Badania porównawcze naprężeń rurociągu przemysłowego

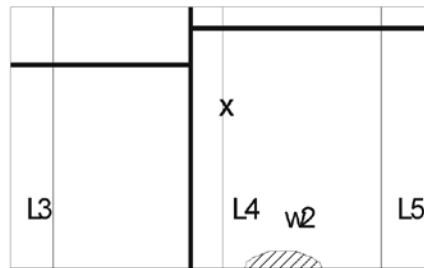
W wybranych fragmentach rurociągu przesyłowego przeprowadzono badania naprężeń własnych. Rurociąg ten cechuje się konstrukcją spawaną z półokręgów. Rura podparta była na podporach odległych o kilkanaście metrów. Po odsłonięciu rurociągu stwierdzono występowanie plastycznych odkształceń ściany rurociągu w miejscach jego kontaktu z podporą. Celem badań było określenie przydatności metody magnetycznej do określenia stanu naprężeń w tego typu konstrukcji. Mierzono poziome natężenia EB w wybranych punktach dla dwóch fragmentów rurociągu a następnie wyznaczono znak i poziom naprężeń w tych fragmentach. Wyniki badań za pomocą EB zostały zweryfikowane przez pomiar naprężeń za pomocą metody wiercenia otworów [7].

Do badań użyto miernika natężenia efektu Barkhausena typ MEB-2c. Miernik ten magnesuje lokalnie za pomocą elektromagnesu typu C materiał z częstością około 10 Hz. Sygnał napięciowy efektu Barkhausena indukowany jest w cewce detekcyjnej zbliżonej do magnesowanej powierzchni. W wyniku przetworzenia sygnału otrzymujemy trzy parametry: 1 – napięcie skuteczne natężenia EB (parametr v_1), 2 – liczbę impulsów EB (parametr Counter) w zadanym czasie dla ustalonego poziomu progu dyskryminacji (U_p), oraz napięcie szczytowe sygnału indukowanego w cewce kontrolnej na rdzeniu sondy (parametr v_2).

Wyniki pomiarów i ich analiza

Pomiary wykonano w 7 seriach. Na rysunku 7 pokazano schematycznie położenia linii (przerwane), w których prowadzono pomiary. Linia grubą oznaczono spoiny. Serie obwodowe (L1 do L5) dotyczą ośmiu punktów umieszczonych na obwodzie rury w odstępach kątowym $\Delta\alpha = 45^\circ$.

Wpływ na natężenie efektu Barkhausena naprężenia działającego w kierunku równoległym do kierunku pola magnetycznego sondy EB jest zasadzie jednoznaczny dla typowych stali ferrytycznych: naprężenie rozciągające zwiększa a naprężenie ściskające – zmniejsza natężenie EB. Wzrost lub obniżenie natężenia EB wyraża się dla miernika MEB-2c przez wzrost i obniżenie parametrów v_1 oraz *counter*. Ilościowo zależność ta



Rys. 7. Schemat położenia linii pomiarowych (L3, L4, L5)

Fig 7. Diagram of the positions of the measurement lines (L3, L4, L5)



Rys. 8. Fragment badanego rurociągu

Fig 8. Fragment of the tested pipeline

jest specyficzna dla danego gatunku stali i musi być określona przez procedurę skalowania. Skalowanie wykonano dla materiału stosowanego do napraw remontowych rurociągu.

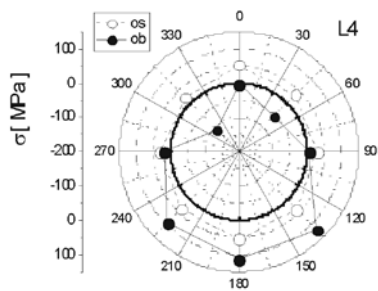
Wyniki obliczeń naprężeń dotyczących wyników pomiarów natężenia EB na obwodzie (linie L4, L5) w układzie biegunowym przedstawiono na rysunkach 9 i 10. Kąt $\alpha = 0$ odpowiada położeniu sondy na szczycie rury. Wykresy z otwartych kółek (o) dotyczą pomiarów w kierunku osiowym ('os'), a wykresy z pełnych kółek (•) w kierunku obwodowym ('ob'). Poziom naprężeń $\sigma = 0$ przedstawia okrąg wykreślony grubą linią. Wartości dodatnie naprężeń są usytuowane na zewnątrz tego okręgu a wartości ujemne – w jego wnętrzu.

Ocena poziomu naprężeń w badanych obszarach wynikająca z analizy wyników pozwala na stwierdzenie następujących właściwości:

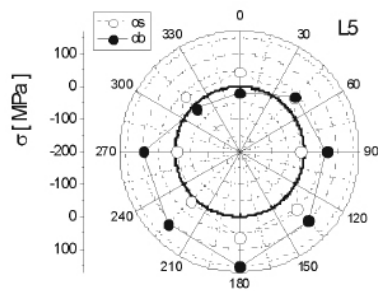
Naprężenia osiowe są dodatnie (rys. 9, 10), przy czym zauważyć można wzrost naprężeń rozciągających w części górnej i dolnej tego fragmentu rury w miarę przemieszczania się od linii L3 do L5.

Naprężenia obwodowe rury zmieniają się w sposób niejednostajny. Dla linii L4 i L5 zauważyć można podobny typ zależności jak dla linii L3 (tu nie pokazanej) – dolna część rury jest rozciągana i maksimum tych naprężeń występuje ok. kąta $\alpha = 180^\circ$ (rys. 9, 10).

Opisany stan naprężeń wskazuje na ich znaczącą lokalną zmianę wzdłuż badanych odcinków rurociągu. Stan ten wynika zapewne z zastosowanej technologii budowy rurociągu (spawanie z fragmentów) i ze sposobu jego eksploatacji (stosowanie podpór i obciążenia gruntem), a także z aktualnego w trakcie badań rozkładu sił działających na rurociąg. Rurociąg został pozbawiony części podpór i był odkształcony (powyginany). Szczegółowa analiza stanu naprężeń badanego rurociągu wykracza poza zakres niniejszego opracowania i nie była celem podjętych badań.



Rys. 9. Rozkłady kątowe naprężeń dla serii L4
Fig 9. Angular distributions of stresses for a series of L4



Rys. 10. Rozkłady kątowe naprężeń dla serii L5
Fig 10. Angular distributions of stresses for a series of L5

Ważnym argumentem przy ocenie jakości przedstawionych tu wyników wyznaczania naprężeń za pomocą EB jest efekt porównania tych wyników z wynikami badań wykonanych inną metodą. Pomiar składowych naprężeń własnych wykonano tensometryczną metodą Mathara, wykorzystując aparaturę Instytutu Energetyki.

Pomiar przeprowadzono w punkcie leżącym na linii L4 i zaznaczonym na rysunku 7 znakiem (x). Na rysunku 9 położenie tego punktu odpowiada kątowi $\alpha = 80^\circ \pm 10^\circ$. Uzyskane metodą Mathara wartości składowych naprężeń pokazano w tabelicy I. Podano też tam wartości naprężeń wyznaczone z metody magnetycznej przez interpolację wyników badań uzyskanych z sąsiednich punktów.

Tabelica I. Składowe naprężeń wyznaczonych dwiema metodami
Table I. Stress components determined by two methods

Metoda	tensometryczna	magnetyczna EB
σ osiowe, MPa	$+78 \pm 3$	$+40 \pm 15$
σ obwodowe, MPa	-5 ± 3	-10 ± 15

Z porównania poziomów tych naprężeń można wyciągnąć wniosek o bardzo dobrej zgodności jakościowej (co do znaku naprężeń), a także o stosunkowo dobrej zgodności ilościowej wyników uzyskiwanych obiema metodami.

Również wyniki badań prowadzone obiema metodami (tensometryczną i magnetyczną) elementów grubościennego rurociągu pary zgodnie z rysunku 4 wykazują dużą zbieżność. Wartości uzyskane metodą EB obarczone są większym błędem pomiaru przy pełnej zgodności kierunków naprężeń głównych.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Natężenie efektu Barkhausena badanego fragmentu rurociągu nie jest duże w porównaniu z typowymi stalami niskowęglowymi, ale różni się istotnie i w sposób systematyczny w badanych obszarach, co można wiązać głównie ze zmianami w poziomie naprężeń, o ile przyjąć jednorodność struktury badanych fragmentów rurociągu. Wydaje się jednak, iż brak wyraźnych różnic w sygnale efektu Barkhausena dla różnych spawanych fragmentów świadczy o tym, iż rurociąg wykonywano z blach, które nie różniły się istotnie mikrostrukturą.
2. Pomimo tego, iż skalowanie wykonano dla materiału ze stanem powierzchni innym od stanu powierzchni rurociągu, to wydaje się, iż zastosowana procedura transformacji wyników pozwoliła na poprawne wyznaczenie naprężeń. Wynik ten został potwierdzony przez porównanie z wynikiem pomiaru metodą tensometryczną.

3. Pomiary efektu Barkhausena za pomocą parametru v_1 i N_c umożliwiają wyznaczenie zmian poziomu naprężeń w badanym materiale z dokładnością rzędu kilku % przy czym błąd bezwzględny wartości wskazanych naprężeń jest większy i wynika głównie z ewentualnych różnic między wzorcem a badanym materiałem.
4. Przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić, iż zastosowanie efektu Barkhausena dla oceny naprężeń w cienkościennych konstrukcjach takich jak rurociągi przesyłowe, jak i grubościennych rurociągach instalacji ciśnieniowych jest w pełni wykonalne.
5. Celowe jest przeprowadzenie większej serii badań na różnych materiałach z wykorzystaniem obu metod (tensometria oporowa i metoda magnetyczna) dla opracowania metody pomiaru o pełnej powtarzalności uzyskiwanych wyników badania stanu naprężeń ocenianych rurociągów pracujących w różnych warunkach obciążeń.

Literatura

- [1] Warunki Urzędu Dozoru Technicznego WUDT/UC.
- [2] Mężyk D. Eksploatacja i diagnostyka rurociągów energetycznych – wybrane zagadnienia. Materiały konferencyjne GRE 2004.
- [3] Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole-Drilling Strain- Gage Method. ASTM E837.
- [4] PN-EN 13480 Rurociągi przemysłowe metalowe
- [5] Augustyniak, B., Chmielewski, M., Chicois, J.; Magnetomechanical damping and mechanical Barkhausen effect as measured for normal load mode; Editions de Physique Journal de Physique IV 1996,
- [6] Augustyniak, B.; Emisja magnetomechaniczna; Emisja Akustyczna; IPPT Warszawa 1994,
- [7] Augustyniak B., Chmielewski M., Piotrowski L., Skibiński T., Mężyk D. Wyniki badania naprężeń własnych w rurociągu „PRZYJAŻŃ”. Materiały konferencyjne 31 KKBN-2002.