

WYKRYWANIE WAD MATERIAŁOWYCH METODĄ PAMIĘCI MAGNETYCZNEJ METALU

Streszczenie: W artykule przedstawiono ogólne podstawy fizyczne metody pamięci magnetycznej metalu, kryteria określania obszarów z anomalią magnetyczną i przykłady jej zastosowań. Metoda Pamięci Magnetycznej Metalu (MPMM) jest szybkim, nieniszczącym narzędziem diagnozowania obszarów wewnętrznych naprężeń i odkształceń oraz różnego rodzaju wad materiałowych. Wykorzystuje ona zjawisko rozproszenia strumienia magnetycznego na obszarach materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej. Opisana metoda jest efektywna w wykrywaniu różnego rodzaju wad materiałowych i obszarów koncentracji naprężeń.

1. Wstęp

Metoda Pamięci Magnetycznej Metalu (MPMM) jest szybkim, nieniszczącym narzędziem diagnozowania obszarów wewnętrznych naprężeń i odkształceń oraz różnego rodzaju wad materiałowych. Wykorzystuje ona zjawisko rozproszenia strumienia magnetycznego na obszarach materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej.

Metoda MPMM nie wymaga, silnego namagnesowania za pomocą elektromagnesów albo magnesów stałych, wystarczy naturalne namagnesowanie w magnetycznym polu Ziemi.

2. Podstawy fizyczne metody

Sondy pomiarowe, przemieszczające się przy powierzchni badanego elementu, mierzą natężenie prostopadłej do powierzchni składowej pola magnetycznego H_p . Wartości i zmiany znaku H_p są wskazaniem, na podstawie których dokonywana jest lokalizacja obszarów z anomalią magnetyczną. W szczególności wykryte mogą być obszary koncentracji naprężeń, w których mogą zachodzić procesy prowadzące do obniżenia własności wytrzymałościowych i destrukcji materiału.

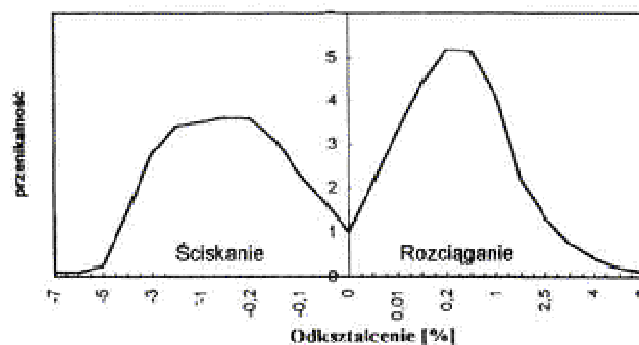
Zależność między zmierzonymi wartościami H_p i odkształceniem lub naprężeniem materiału opisuje zjawisko magnetosprężyste.

Miarą stopnia namagnesowania ciała, również w ziemskim polu magnetycznym, jest wartość indukcji magnetycznej B , jaka została wytworzona wewnątrz materiału. Stopień namagnesowania zależy od natężenia pola magnesującego H i przenikalności magnetycznej materiału μ :

$$B = H \mu$$

Przenikalność magnetyczna μ określonego materiału zależy od: natężenia pola magnesującego H , historii namagnesowania, gatunku stali, temperatury, stanu naprężenia i odkształcenia materiału.

Zmiany przenikalności magnetycznej przy rozciąganiu i ściskaniu próbki stalowej w polu magnetycznym Ziemi przedstawiono na rys.1.



Rys.1.

Próbka była rozciągana i ściskana w zakresie odkształceń sprężystych i plastycznych. W zakresie odkształceń sprężystych przenikalność magnetyczna rośnie liniowo z naprężeniem i przy rozciąganiu osiąga wartość blisko pięciokrotnie większą od wartości początkowej, natomiast przy ściskaniu niemal trzykrotnie większą. Liniowa zależność przenikalności magnetycznej od naprężenia kończy się po osiągnięciu granicy plastyczności: $\epsilon \approx 0,2\%$, a potem, po jej przekroczeniu: wartość przenikalności początkowo nie zmienia się, a potem szybko maleje. Przy ściskaniu natomiast przedział odkształceń, przy których wartość przenikalności nie zmienia się jest znacznie dłuższy.

Wpływ naprężeń na zdolność metalu do magnesowania wyjaśnić można zachowaniem się domen magnetycznych. Przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego H powoduje powstanie wyróżnionej orientacji domen w kierunku pola magnesującego. Przy małym natężeniu pola magnesującego wyróżniona orientacja domen zachodzi przez rozszerzenie obszaru tych domen, które były spolaryzowane w kierunku przyłożonego pola magnetycznego. Domeny te powiększają swoją objętość przez sprężyste przesunięcie granic. Jeśli pole magnetyczne znika, to granice domen wracają do położenia wyjściowych.

W silniejszym polu magnesującym zachodzą procesy powiększenia obszaru domen przez trwałe przemieszczenie granic, które odrywają się od defektów sieci i przesuwają w kierunku wymuszonym przez pole magnesujące. Pole magnesujące wymusza też zmianę orientacji elementarnych magnesów w domenach mniej korzystnie zorientowanych względem natężenia pola magnesującego. Występują obroty domen i ich orientowanie w kierunku pola magnesującego. Tak jak przesunięcia granic domen mogą być odwracalne i trwałe, tak też i obroty kierunku namagnesowania w domenach mogą być zarówno odwracalne jak i nieodwracalne.

Naprężenie mechaniczne przyłożone do elementu znajdującego się w polu magnetycznym wpływa na łatwość przesuwania granic domen i zmiany kierunku polaryzacji (obracania się) domen. W zakresie odkształceń sprężystych naprężenie ułatwia magnesowanie – powoduje wzrost przenikalności magnetycznej, która zależy również od kierunku naprężenia względem kierunku pola magnesującego. Odkształcenie plastyczne związane jest ze zmianami struktury materiału i w zakresie dużych odkształceń plastycznych obserwuje się zmniejszenie wartości przenikalności magnetycznej – w stałym polu magnetycznym gwałtownie maleje stopień namagnesowania.

Występujące w metalu lokalne zmiany obciążenia, a więc i odkształcenia generują odpowiednie, również lokalne zmiany stopnia namagnesowania, jak wady w postaci nieciągłości materiału.

Normalnie, wewnątrz namagnesowanego jednorodnego elementu linie sił biegną równoległe do powierzchni i nie ma składowej indukcji prostopadłej. Strumień magnetyczny wewnątrz zamkniętego obwodu magnetycznego nie wytwarza pola magnetycznego na

zewnątrz, brak pola rozproszonego i natężenie pola magnetycznego przy powierzchni jednorodnego, zamkniętego obwodu magnetycznego jest równe zero.

W przypadku magnesu sztabkowego (obwód magnetyczny otwarty) wykonanego z materiału o jednorodnych własnościach magnetycznych – źródłem pola magnetycznego przy powierzchni sztabki pomiędzy biegunami nie jest rozproszenie strumienia indukcji, lecz strumień zamykający obwód magnetyczny przez powietrze między biegunami. Pole to stanowi tło dla pola powstałego w wyniku rozproszenia strumienia indukcji na nieciągłościach materiału. Tak zachowuje się każdy oddzielny element konstrukcji.

Jeżeli w namagnesowanym, jednorodnym elemencie wystąpi zakłócenie jednorodności, np. w postaci pęknięcia otwartego na powierzchni, lub wtrącenia o innych własnościach magnetycznych, lokalnej zmiany grubości, czy lokalnej zmiany własności magnetycznych na skutek naprężenia, odkształcenia plastycznego czy zmęczeniowych zmian struktury, to w obszarze o odmiennych własnościach magnetycznych będzie inny stopień namagnesowania, inna też będzie indukcja..

Linie sił indukcji wchodząc do obszaru o odmiennych własnościach magnetycznych zmieniają kierunek. I tak:

- ⊗ przy wchodzeniu w obszar materiału, w którym przenikalność magnetyczna jest mniejsza niż w materiale rodzimym (gaz, żużel, wtrącenie metalu nieferromagnetycznego, czy silne odkształcenie plastyczne) strumień indukcji ulegnie rozproszeniu – pionowa składowa indukcji ma zwrot na zewnątrz badanego elementu i odpowiednio znak składowej pionowej rozproszonego pola nad powierzchnią będzie dodatni;
- ⊗ przy przechodzeniu z materiału rodzimego do obszaru o większej przenikalności magnetycznej (np. w obszar zwiększonych naprężeń sprężystych), linie sił pola magnetycznego wewnątrz materiału skupiają się - pionowa składowa indukcji ma zwrot do środka badanego elementu i odpowiednio znak składowej pionowej rozproszonego pola nad powierzchnią będzie ujemny.

W obydwu przypadkach pojawia się składowa indukcji prostopadła do powierzchni badanego elementu B_p , która powoduje powstanie na zewnątrz elementu składowej pionowej pola magnetycznego H_p . Rejestrują to sondy przesuwane nad powierzchnią badanego elementu. Wymiary, kształt, orientacja i położenie wady wpływają na parametry rozkładu natężenia rozproszonego pola magnetycznego.

W omawianej metodzie wskazaniem wykorzystywanym do oceny stopnia odkształcenia materiału są rozkłady składowej pionowej natężenia rozproszonego pola magnetycznego H_p , w ogólnym przypadku wewnątrz elementu ferromagnetycznego o przenikalności magnetycznej μ powstaje indukcja $B = \mu \cdot H$, gdzie H jest natężeniem pola magnesującego, w tym przypadku Ziemi. Za powstanie rozproszonego pola magnetycznego nad powierzchnią elementu odpowiedzialna jest składowa indukcji prostopadła do powierzchni, powstaje ona wtedy, gdy na drodze strumienia indukcji wewnątrz elementu znajdzie się obszar materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej. Wtedy:

$$H_p = \frac{1}{\mu_0} B_p$$

gdzie: stała $\mu_0 = 2\pi \cdot 10^{-7}$ jest przenikalnością magnetyczną powietrza..

Wartość B_p , a tym samym i wartość H_p jest proporcjonalna do szybkości zmian (gradientu) indukcji B wzdłuż badanego elementu, wtedy:

$$H_p \sim \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta z}$$

lub

$$(9) H_p \sim \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta\mu}{\Delta z}$$

Przy wchodzeniu strumienia indukcji do obszaru o mniejszej przenikalności magnetycznej maleje indukcja. Składowa pionowa indukcji i składowa pionowa pola rozproszonego mają znak dodatni. Przy wychodzeniu strumienia indukcji z obszaru o mniejszej przenikalności magnetycznej indukcja rośnie, a składowe pionowe indukcji i pola rozproszonego mają znak ujemny. Nad środkiem tego obszaru wartość H_p przechodzi przez zero. Z dala od obszaru o odmiennych własnościach magnetycznych materiał znów jest jednorodny, linie indukcji biegną równoległe do powierzchni i nie ma pola rozproszonego.

Jeśli zmiana indukcji ΔB na jakimś odcinku Δz jest spowodowana naprężeniem, to składowa pionowa pola rozproszonego jest równa:

$$H_p = \frac{1}{\mu_0} \lambda_{H.T.} \Delta\sigma$$

gdzie: $\lambda_{H.T.}$ Jest czułością zjawiska magnetosprężystego materiału w stałym polu magnesującym H i temperaturze T .

Jako miarę koncentracji naprężenia (intensywności istniejącej niejednorodności materiału, takiej jak: pęknięcie, pęcherz podpowierzchniowy, wtrącenie, wżer korozyjny) w metodzie MPMM przyjęto tzw. magnetyczny współczynnik intensywności naprężenia, określony jako gradient (intensywność zmiany) składowej pionowej rozproszonego pola magnetycznego na ustalonym odcinku drogi, przy prostopadłym przekraczaniu linii koncentracji naprężenia:

$$K_{in} = \frac{|\Delta H_p|}{2l_\sigma}$$

gdzie: K_{in} – magnetyczny współczynnik intensywności naprężenia;

$|\Delta H_p|$ - bezwzględna wartość różnicy H_p między dwoma punktami położonymi na prostopadłej do KN w równej odległości l_σ , po przeciwnych stronach KN .

W przypadku badania elementów uprzednio namagnesowanych w sposób sztuczny, poprawna interpretacja wskazań uzyskanych metodą MPMM jest trudna, a czasem niemożliwa. Lokalne pola magnetyczne, związane z namagnesowanymi obszarami zakłócają zapis naprężeń i odkształceń, odzwierciedlających obciążenia materiału w czasie eksploatacji.

3. Wykrywanie wad spawalniczych

Przy spawaniu gazowym rozkład magnetyzmu szczątkowego jest także określony poprzez naprężenia i odkształcenia szczątkowe. Źródłem zewnętrznego pola magnetycznego może być magnetyczne pole Ziemi. Naprężenia i deformacje powstające podczas spawania w okresach grzania i chłodzenia, jednocześnie ze zmianami strukturalnymi z powodu efektu magnetomechanicznego formują magnetyczną (domenową) teksturę metalu. Powstaje anizotropia magnetyczna określona zgodnie z wzorem:

$$E\sigma = -3/2 \lambda \sigma \cos^2 \varphi$$

gdzie:

$E\sigma$ - energia magnetosprężysta

- λ - stała magnetostrykcji stopu
- φ - kąt między kierunkiem działania napięć rozciągających i magnetyzmem szczątkowym M_s .

Na powstających defektach spawalniczych określonych rozmiarów powstają węzły zamocowania domen, które kształtują rozmagnesowujące pole defektów odzwierciedlające się na powierzchni spawu w postaci magnetycznych pól rozproszenia.

Ustalono eksperymentalnie, że w miejscu maksymalnej niejednorodności struktury metalu i technologicznych defektów spawania, składowa normalna magnetycznego pola rozproszenia H_p wykazuje gwałtowną skokową zmianę. Ustalono także, linia zmiany znaku pola rozproszenia (linia $H_p=0$) odpowiada linii koncentracji naprężeń szczątkowych. W ten sposób, na drodze odczytu informacji magnetycznej, która powstaje w procesie spawania, powstaje unikalna możliwość oceny faktycznego stanu spoiny. Ocena ta jest całkowita i uwzględnia dla każdej spoiny jednocześnie: rozkład naprężeń szczątkowych i deformacji oraz defektów spawania.

Jeżeli spawanie ma miejsce w warunkach obciążeń zewnętrznych (w obecności naprężeń), to decydującą rolę odgrywają dyslokacje, ilość i ruchliwość których będzie określała stan naprężeń i deformacji, odpowiednio: dla spoiny i obszaru wpływu ciepła. Przy tym, granice domen lokują się w obszarach koncentracji dyslokacji, utrudniając ich przemieszczenie.

Połączenia spawane w trakcie eksploatacji podlegają działaniu złożonych statycznych i cyklicznych obciążeń: od ciężaru, kompensacyjnych, spowodowanych ciśnieniem wewnętrznym, cyklicznym zmianom parametrów pracy (ciśnienie, temperatura), nierównomiernego rozkładu temperatury i wpływu środowiska korozyjnego. Uszkodzenia połączeń spawanych rozwijają się zgodnie z mechanizmami zmęczeniowymi, starzenia, kruchości i kruchości wodorowej. procesami poprzedzającymi eksploatacyjne uszkodzenia połączeń spawanych są zmiany właściwości i mikrostruktury metalu w obszarach koncentracji naprężeń. Odpowiednio zachodzi także zmiana właściwości magnetycznych metalu, oddająca faktyczny stan naprężeń i deformacji połączeń spawanych.

Jako parametr określający rozkład magnetyzmu szczątkowego w połączeniu spawanym i w jego pobliżu, przyjęto natężenie magnetycznego pola rozproszenia $-H_p$, łatwo mierzalnego przy pomocy specjalistycznych przyrządów - magnetometrów. W zależności od konstrukcji połączeń spawanych stosuje się magnetometrię z jednym czujnikiem ferrytycznym (jednokanałowy reżim pracy), lub z dwoma i większą ilością czujników (wielokanałowy reżim pracy). Reżim jednokanałowy stosuje się do połączeń spawanych kątowych i trójkątów, gdy nie ma dostępu kontrolowania jednocześnie z dwóch stron spoiny. Reżim dwukanałowy stosuje się przy kontroli czołowych połączeń spawanych. Do przeprowadzenia kontroli tą metodą nie trzeba oczyszczać powierzchni połączenia spawanego z rdzy, zgorzeliny i nacieków. Czujnik jest przesuwany ręcznie przez operatora wzdłuż spoiny po obwodzie (osobno dla samej spoiny), a następnie poprzecznie do spoiny na odległość od niej 30-50mm (tj. od strefy wpływu ciepła) w głąb materiału rodzimego. Skokowa zmiana znaku wielkości H_p wskazuje na koncentrację naprężeń szczątkowych po linii $H_p=0$ na konkretnym odcinku połączenia spawanego. Odcinki te zaznacza się kredą lub farbą.

Poziom koncentracji naprężeń szczątkowych określa stosunek $K=|\Delta H_p|/\Delta l_k$. Na podstawie wyników określenia wartości K dla różnych odcinków, na których zaobserwowano skokową zmianę wielkości H_p . Ustala się jej maksymalną wartość i co za tym idzie maksymalną koncentrację naprężeń szczątkowych.

Wielokanałowy magnetometr składa się z urządzenia skanującego, zawierającego

dwa czujniki ferrytyczne i czujnik pomiaru długości, procesor, klawiaturę sterującą, bloki pamięci operacyjnej i długookresowej oraz monitor ciekło-krystaliczny, na którym przedstawiane są graficznie mierzone parametry.

Jakość połączeń spawanych ocenia się wg charakteru rozkładu pola magnetycznego H_p w obszarze koncentracji naprężeń szczytkowych i deformacji (obszar KN). Przy tym współczynnik koncentracji naprężeń szczytkowych K określa się jako gradient zmiany pola $|\Delta H_p|$ na długości kontrolowanego odcinka Δl_k . Maksymalna wartość $K_{max} = |\Delta H_p| / \Delta l$ cechuje obszar koncentracji naprężeń, w których $|\Delta H_p|$ - jest maksymalną zmianą pola H_p pomiędzy dwoma sąsiednimi punktami kontroli położonymi w odstępach Δl_k .

Średnią wartość K dla całego obwodu spoiny określa się w następujący sposób:

$$K_{\text{sr}} = \frac{1}{n} \sum \frac{H_p^i}{\Delta l_k}$$

gdzie:

ΔH_p — zmiana pola pomiędzy dwoma sąsiednimi punktami kontroli na odcinku Δl ;

n - ilość odcinków kontroli Δl_k .

W celu ilościowej oceny poziomu koncentracji naprężeń określa się intensywność zmiany składowej normalnej pola magnetycznego H_p , przy przejściu przez linię KN (linię $H_p = 0$):

$$K_{in} = \frac{|\Delta H_p|}{2\lambda_k}$$

gdzie:

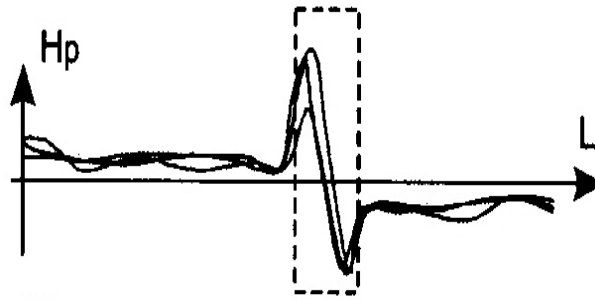
K_{in} — gradient magnetycznego pola rozproszenia lub magnetyczny współczynnik intensywności naprężeń, opisujący intensywność zmiany stanu namagnesowania metalu w obszarze koncentracji naprężeń i odpowiednio intensywność zmiany pola H_p ;

$|\Delta H_p|$ -wartość bezwzględna różnicy pola H_p między dwoma punktami kontroli, położonymi w równej odległości λ_k po obu stronach linii $H_p = 0$.

Odcinki λ_k muszą być prostopadłe do linii $H_p = 0$, ponieważ pokrywają się w wyniku tego z kierunkiem działania maksymalnych naprężeń rozciągających.

4. Ogólne kryteria wyróżnienia stref anomalii magnetycznych

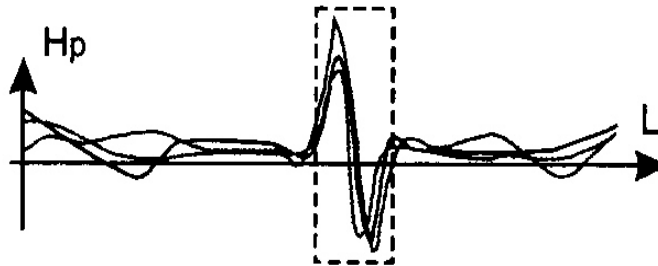
1. Zmiana znaku przebiegu H_p w funkcji długości skanowanego elementu we wszystkich kanałach jednocześnie (dla rur i przewodów rurowych, łopatek turbin, korpusów aparatury itp.) – rys. 2.



Rys.2.

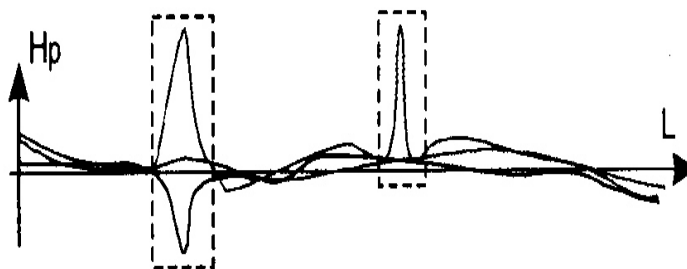
2. Wielokrotna zmiana znaku składowej pola rozproszenia H_p we wszystkich kanałach jednocześnie:

- na odległości mniejszej od dwóch zewnętrznych średnic ($<2D_z$ dla rur);
- na odległości mniejszej od dwóch grubości ścianek (dla przewodów rurowych, połączeń spawanych, zbiorników itp.) – rys. 3.



Rys.3.

3. Nagły różnobiegunowy rozkład składowej pola H_p w różnych kanałach (charakteryzuje poziom naprężeń resztkowych) lub nagły wyskok w jednym z kanałów. Dla połączeń spawanych może to wskazywać na obecność lokalnego defektu wewnątrz spoiny – rys.4..



Rys.4.

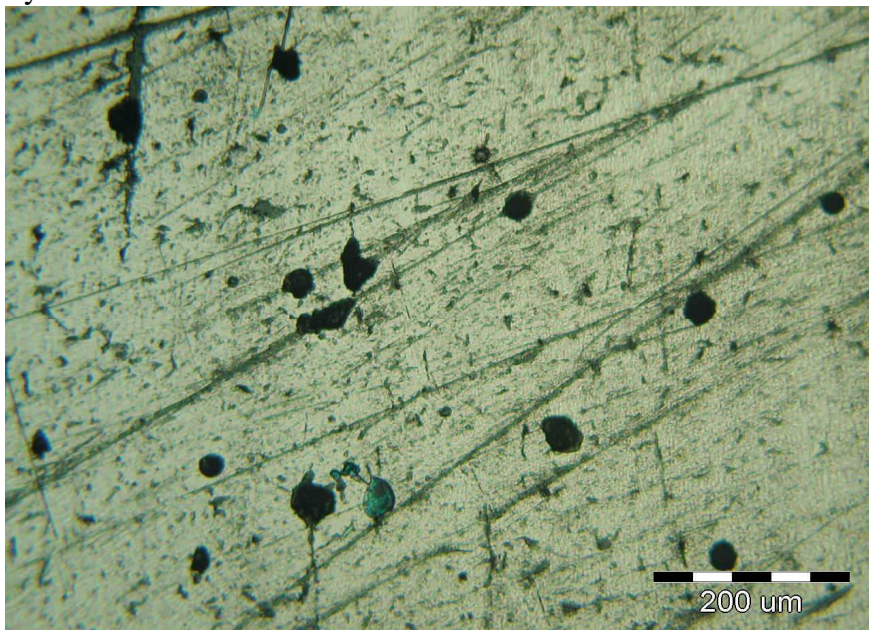
4. Zmieniająca się skokowo, również bez zmiany znaku składowa pola H_p z maksymalnym gradientem $\frac{dH}{dx}$ - rys.5.



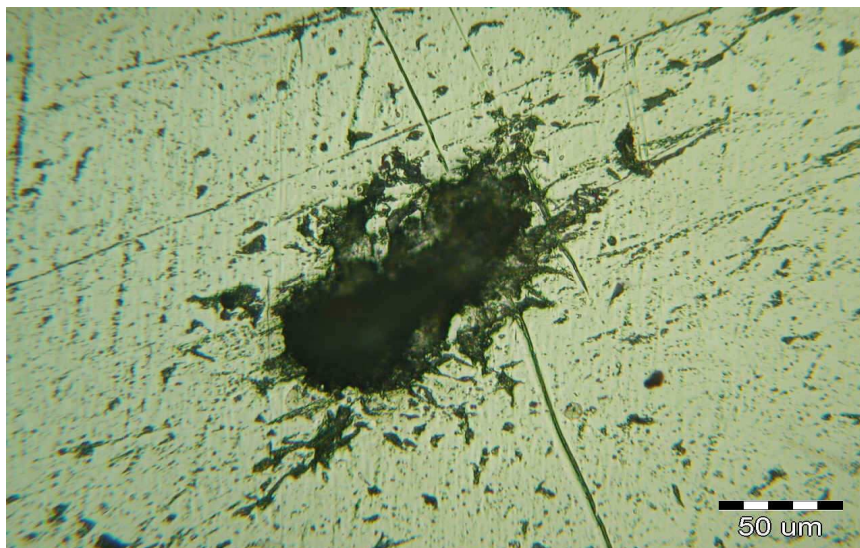
Rys.5.

5. Metalograficzne badania mikrostruktury złącza spawanego w miejscu anomalii magnetycznych

Na przekroju poprzecznym spoiny stwierdzono występowanie por i wtrąceń o większych rozmiarach. Na rys.6 – duże skupisko wtrąceń globularnych o znacznych rozmiarach, zlokalizowane na granicy spoiny i ścianki wycinka. Również przy powierzchni lica spoiny stwierdzono w kilku miejscach obecność pojedynczych, większych wtrąceń globularnych i por. Wtrącenia te i pory mogły być przyczyną występujących w tym miejscu anomalii magnetycznych.



Rys 6. Skupisko dużych wtrąceń globularnych na granicy spoiny i ścianki wycinka. Pow. 150x.



Rys.7. Przekrój poprzeczny spoiny w miejscu anomalii magnetycznych. Szlif nie trawiony. Widoczna duża pora w spoinie. Pow. 380x.

Wytrawienie szlifów metalograficznych nitałem ujawniło mikrostrukturę odpuszczonego martenzytu zarówno w spoinie, jak i w ściance wycinka. Mikrostruktura tego rodzaju świadczy o poddaniu elementu, z którego pobrano wycinek, obróbce cieplnej polegającej na hartowaniu i niskim odpuszczaniu.



Rys.8. Szlif poprzeczny spoiny po wytrawieniu nitałem. Widoczna mikrostruktura odpuszczonego martenzytu oraz globularne wtrącenie. Pow. 380x.

5. Zakończenie

Opisana metoda jest efektywna w wykrywaniu różnego rodzaju wad materiałowych i obszarów koncentracji naprężeń. Interpretacja uzyskanych obszarów anomalii magnetycznych, ze względu na dużą czułość metody i zależność od wielu czynników jest utrudniona i wymaga dużego doświadczenia.

Literatura

1. Dubov A.A. Diagnostyka wytrzymałości oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem Magnetycznej Pamięci Metalu. Dozór Techniczny 2, 2002, 14 – 18 i Dozór Techniczny 1, 2002, 37-40.
2. Deputat J. Podstawy metody magnetycznej pamięci metalu. Dozór Techniczny 5, 2002, 97-105.
3. Łapiński Z., Łukaszewicz J. Badania metodą pamięci magnetycznej wodorowanych próbek stalowych. Problemy Techniki Uzbrojenia. 5, 2004.
4. Sprawozdanie z pracy nt. Badania materiałowe wycinków materiałów konstrukcyjnych oraz próby rozciągania próbek ze stali 30HGS, poddanych uprzednio obróbkom cieplnym. PW. Wydział Inżynierii Materiałowej. 2005.
5. A.A. Dubow „Metoda pamięci magnetycznej (MPM) metalu i przyrządy pomiarowe” – Moskwa 2001 r.
6. „Metoda magnetycznej pamięci metalu – diagnostyka XXI wieku. Metal Science - Warszawa 2000 r.
7. A.A. Dubow. „Sposób określenia stanu granicznego metalu w obszarach koncentracji naprężeń na podstawie gradientu magnetycznego pola rozproszenia”. Metal Science – Warszawa 2001 r.

DETECTION OF MATERIAL DEFECTS BY THE METHOD OF METAL MAGNETIC MEMORY

The physical backgrounds of the method of metal magnetic memory and some examples of its application are presented in the paper. The method is a non-destructive testing method to test internal stresses and deformations of material structures and detect existing defects. The method uses a phenomena of dissipation of the magnetic field at fragments of material having different magnetic permeability.