

# Podstawy fizyczne i materiałowe badań magnetycznych stali konstrukcyjnych niskowęglowych i stopowych magnetycznych oraz paramagnetycznych. Uwagi ogólne – skala laboratoryjna

Zbigniew Hilary Żurek

## Wprowadzenie

Stal konstrukcyjna ze względu na dobre właściwości mechaniczne jest podstawowym materiałem stosowanym w technice. Stopy żelaza, będące w większości przypadków magnetyczne, diagnozować można także magnetycznie, nie wykluczając innych metod. Wielkościami magnetycznymi fizycznymi czuły na strukturę realną materiału są przede wszystkim:

- przenikalność magnetyczna początkowa i maksymalna;
- natężenie koercji;
- straty histerezy;
- straty wiroprowadowe;
- straty relaksacyjne.

Zmienność parametrów magnetycznych materiału w zależności od temperatury jest na tyle istotna, że w fundamentalnym dziele: *Ferromagnetyzm*, Bozorth wskazał, że obok naprężenia temperatura jest najważniejszym czynnikiem na nie wpływającym. Zmienność przenikalności materiału w danej ustalonej temperaturze [4] może być wywołana między innymi:

- procesem obróbki plastycznej;
- procesem obróbki cieplnej;
- szybkością chłodzenia;
- czynnikiem chłodzącym;
- relaksacją naprężenia;
- czasem starzenia;
- obciążeniami sprężystymi i zmęczeniowymi.

Metodę magnetyczną można stosować do analizy struktury realnej oraz wyznaczania faz w stopach żelaza. Istnieje wiele odmian tej metody, w których wykorzystuje się odpowiednią wielkość fizyczną lub przebieg danego zjawiska. Stosowane są urządzenia oparte na pomiarze:

- przenikalności magnetycznej;
- magnetyzacji nasycenia;
- magnetycznego pola rozproszenia;
- strat magnetycznych.

Złożoność zagadnienia wynika z samego opisu fizycznego przenikalności magnetycznej [1, 2, 3]:

$$\mu_r = \frac{12J_s^2 \delta k_B T}{24\mu_0 k_B T \left[ K_{ef} + \frac{3}{2} \lambda_{ef} \sigma \right] + p w^2 \text{cl} \left[ 1 - e^{-l/\tau} \right]} \quad (1)$$

gdzie:

- $J_s$  – magnetyzacja nasycenia;
- $T$  – temperatura termodynamiczna;
- $k_B$  – stała Boltzmanna;
- $\delta$  – grubość efektywnej ścianki domenowej;
- $l$  – szerokość domeny;
- $\mu_0$  – stała magnetyczna;
- $K_{ef}$  – efektywna stała anizotropii magnetokrystalicznej;
- $\lambda_{ef}$  – efektywny współczynnik magnetostrykcji;
- $\sigma$  – naprężenie;
- $p$  – parametr zależny od rodzaju ścianki domenowej;
- $c$  – stężenie elementów oddziałujących z wektorem spontanicznej magnetyzacji (mogą to być atomy międzywęzłowe węgla, azotu, tlenu);
- $w$  – stała oddziaływania danego elementu z wektorem magnetyzacji spontanicznej;
- $t$  – czas liczony od momentu rozmagnesowania (redystrybucji elementów porządkujących się kierunkowo);
- $\tau$  – czas relaksacji dojścia do stanu równowagi.

Jak widać ze wzoru (1), także budowa domeny magnetycznej wpływa na przenikalność magnetyczną materiału.

Dodatkowo w materiałach z dodatnim współczynnikiem magnetostrykcji magnetyzacja zwiększa się przy rozciąganiu, a zmniejsza przy ściskaniu. W materiałach z ujemną magnetostrycją zjawisko następuje odwrotnie. Typowym przykładem materiału o dodatnim współczynniku magnetostrykcji jest żelazo, a z ujemnym współczynnikiem  $\lambda$  – nikiel [4, 5].

$$\lambda = \frac{dl}{l} = \frac{3}{2} \lambda_{<100>} \left( \cos^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \quad (2)$$

gdzie:

- $\cos \varphi = \alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 + \alpha_3 \beta_3$  – wartość cosinusa dla kąta pomiędzy wektorem magnetyzacji a kierunkiem pomiaru magnetostrykcji;
- $\alpha_i$  i  $\beta_i$  – cosinusy kierunkowe w stosunku do osi układu współrzędnych.

Energia magnetoelastyczna opisana jest wzorem:

$$E_{\sigma} = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \varphi \quad (3)$$

gdzie:

- $\lambda_s$  – współczynnik magnetostrykcji nasycenia;
- $s$  – naprężenie;
- $\varphi$  – kąt między wektorem magnetyzacji nasycenia  $J_s$  a osią kierunku naprężenia  $\sigma$ .

Zjawiskiem odwrotnym do magnetostrykcji jest konwersja magnetoelastyczna, polegająca na zmianie parametrów magnetycznych ferromagnetyków pod wpływem naprężeń zewnętrznych. Zależność ta, związana z ferromagnetykami, nazwana od odkrywcy efektem Villariego, umożliwia pomiar obciążeń mechanicznych w elementach maszyn. W określonym zakresie natężenia pola magnetycznego i naprężenia efekt Villariego jest odwrotnością efektu Joule'a. Wartość współczynnika magnetostrykcji opisuje podatność materiału do badań magnetycznych naprężenia. Zmiany przenikalności materiału od obciążeń sprężystych wyprowadzane są z zachodzących w materiale procesów energetycznych.

W przybliżeniu otrzymamy następującą zależność:

$$\sigma \approx \frac{1}{\mu_r} \frac{J_s^2}{3\lambda_s \mu_0} \quad (4)$$

gdzie:

- $J_s$  – magnetyzacja nasycenia;
- $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni (współczynnik magnetyczny).

Po przekształceniu otrzymamy zależność na przenikalność względną:

$$\mu_r \approx \frac{J_s^2}{3 \cdot \mu_0 \cdot \lambda_s \cdot \sigma} = \frac{J_s^2}{3\mu_0 \lambda_s E_Y \varepsilon} \quad (5)$$

gdzie:

- $\mu_r$  – przenikalność magnetyczna względna;
- $E_Y$  – moduł Younga;
- $\varepsilon$  – odkształcenie wzdłużne;
- $\lambda_s$  – współczynnik magnetostrykcji.

Zapis termodynamiczny omawianych zależności przedstawia równanie [6]:

$$\frac{1}{l} \left( \frac{\partial l}{\partial H} \right)_{\sigma} = \left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_H = d \quad (6)$$

Zmiany magnetyzacji  $J$  lub indukcji magnetycznej  $B$  od naprężenia  $\sigma$  są równoważne zmianom odkształceń magnetostrykcji  $\lambda = \Delta l/l$  od zmian natężenia pola magnetycznego  $H$ . Związki te definiują czułość „piezomagnetyczną”  $d$  materiału [6, 7]. Zależnie od znaku magnetostrykcji kierunek działania sił może zmniejszać lub zwiększać magnetyzację.

Odwracalne zmiany magnetoelastyczne występują w ograniczonym zakresie we wszystkich materiałach spolaryzowanych magnetycznie, wykazujących magnetostrykcję. Złożone przeliczenia termodynamiczne [6, 7, 8] sprowadzają się do wykazania tożsamości:

$$d \equiv \lambda \quad (7)$$

Współczynnik magnetostrykcji  $\lambda$  jest równoważny współczynnikowi czułości  $d$ . Wpływ naprężenia na związki magneto-mechaniczne materiału (o magnetostrykcji dodatniej i ujemnej) dla czystego Ni oraz stopu 68% NiFe [9] pokazano na rysunku 1.

Współczynniki magnetostrykcji stopów żelazo – nikiel używały maksymalny współczynnik magnetostrykcji  $24 \cdot 10^{-6}$  przy zawartości 20% lub 40% niklu. Współczynniki magnetostrykcji współczesnych materiałów sięgają rzędu  $2000 \cdot 10^{-6}$ .

### 1. Efekty magnetyczne i zjawiska fizyczne wykorzystywane w budowie przetworników pomiarowych

Dziesięć najważniejszych efektów magnetycznych zapoczątkowanych odkryciem Joule’a o zastosowaniach technicznych i pomiarowych zamieszczono w tabeli 1.

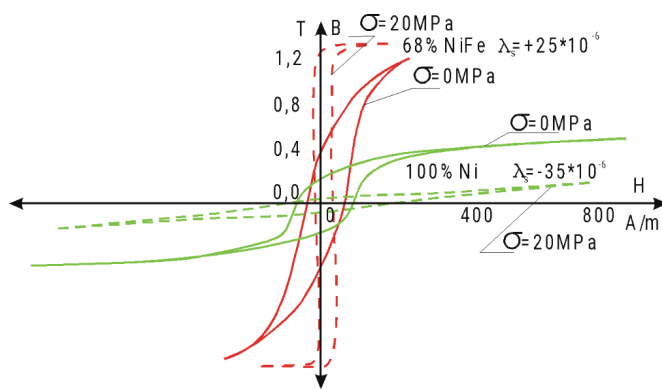
Na bazie wymienionych efektów magnetycznych powstały przetworniki pomiarowe służące do budowy bezpośrednich systemów przetwarzania sygnału lub urządzeń, za pomocą których możemy dokonywać pośrednich pomiarów. Podział ten przedstawiono graficznie na rysunku 2. Okręgami zaciemnionymi oznaczono efekty, na bazie których powstały przetworniki pomiarowe pola magnetycznego. Pozostałe to grupa efektów służąca do budowy przetworników pomiarowych siły, momentu siły, twardości oraz pomiaru przemieszczeń kątowych i liniowych.

Do zastosowań pomiarowych pola magnetycznego na pierwszym miejscu (historycznie) zaliczyć należy efekt Thomsona. Efekt Thomsona wprowadza z kolei w grupę przetworników opartych na związkach galwanomagnetycznych w materiałach. Do najważniejszych zaliczyć można efekt magnetoelastyczności Thomsona oraz efekt Halla.

Podstawą tych efektów jest działanie siły Lorentza na nośniki poruszające się w polu magnetycznym. Zjawiska te obejmują efekty elektryczne i cieplne, występujące w przewodniku lub półprzewodniku przewodzącym prąd i umieszczonym w polu magnetycznym.

#### 1.1. Zakresy zmienności namagnesowania materiału ferromagnetycznego

Podczas badań elementów maszyn metodami magnetycznymi spotykamy materiały o bliżej nieokreślonym składzie i obróbce plastycznej, a tym samym parametrach magnetycznych. Zakres namagnesowania materiału i znajomość tego zakresu są bardzo

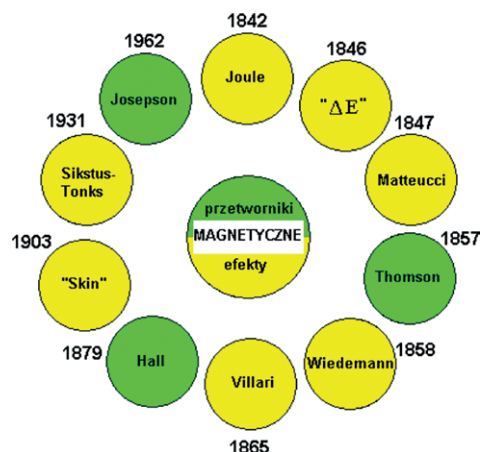


Rys. 1. Pętle histerezy magnetycznej

Tabela 1. Ważniejsze efekty magnetyczne

Lp.	Nazwisko odkrywcy lub nazwa efektu	Objaśnienie efektu	Zastosowanie techniczne
1	Joule	zmiana kształtu materiału ferromagnetycznego i ferrimagnetycznego wraz ze zmianą magnetyzacji (magnetostrykcja)	przetworniki magnetostrykcyjne
2	$\Delta E$	zmiana modułu Younga pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego	opóźnienia fali akustycznej dla składowych liniowych pola magnetycznego
3	Matteucci	skręcanie pręta ferromagnetycznego w podłużnym polu magnetycznym	przetworniki magnetoelastyczne
4	Thomson	zmiana oporności elektrycznej pod wpływem pola magnetycznego	przetworniki magnetoelastyczne
5	Wiedemann	skręcanie pręta przewodzącego prąd w wyniku działania pola magnetycznego	przetworniki siły i naprężenia skręcania
6	Villari	zmiana magnetyzacji od naprężenia	przetworniki magnetoelastyczne
7	Hall	powstanie poprzecznego napięcia w materiałach przewodzących i półprzewodzących po przyłożeniu pola magnetycznego prostopadłe do kierunku prądu	przetworniki magnetogalwaniczne
8	Skin	przesunięcie prądu od wnętrza do warstwy zewnętrznej (prądy wirowe)	przetworniki położenia
9	Sixtus	magnetyzacja impulsowa wywołana skokami Barkhausena	przetworniki zbliżenia
10	Josephson	efekt tunelowy pomiędzy dwoma nadprzewodzącymi materiałami z cienką warstwą izolującą	czujniki Wiegenda i magnetometri SQUID

Kursywą – oznaczono pary podstawowych efektów odwracalnych



Rys. 2. Efekty magnetyczne wykorzystane w budowie przetworników pomiarowych pola magnetycznego - pola zaciemnione

Tabela 2. Zmienność parametrów fizycznych materiału w procesie odkształcenia plastycznego

Wielkość fizyczna	Oznaczenie	Reakcja parametru				Czułość parametru
		%				
Odształcenie plastyczne	$\epsilon$	20 ↑	40 ↑	60 ↑	80 ↑	* → *****
Przenikalność magnetyczna	$\mu_r$	25 ↓	31 ↓	41 ↓	47 ↓	***
Natężenie koercji	$H_c$	50 ↑	66 ↑	71 ↑	108 ↑	***
Magnetyzacja nasycenia	$J_s$	0,01 ↓	0,02 ↓	0,03 ↓	0,04 ↓	*
Masa właściwa	$d$	0,0003 ↓	0,0009 ↓	0,007 ↓	0,013 ↓	*
Elektryczny opór właściwy	$\rho$	6 ↑	11 ↑	18 ↑	23 ↑	**
Mikrotwardość	HV	14 ↑	36 ↑	53 ↑	71 ↑	***
Kwadrat szerokości linii dyfrakcyjnych promieni rentgenowskich	$\Delta^2$	88 ↑	178 ↑	256 ↑	344 ↑	*****
	$J_{MRM}$	25 ↓	31 ↓	41 ↓	47 ↓	***

ważne, ponieważ decydują o możliwości stosowania metody magnetycznej. Waga zagadnienia namagnesowania materiału przedstawiona zostanie na przykładzie żelaza elektrolitycznego. W tabeli 2 zamieszczono zakresy zmian niektórych parametrów fizycznych charakteryzujących odkształcenia plastyczne żelaza elektrolitycznego [1, 2, 3].

Wśród właściwości magnetycznych materiałów ferromagnetycznych poddawanych starzeniu analizowane są [11]: zmiany natężenia pola koercji  $H_c$ , wartość tangensa kąta strat na histerezę magnetyczną  $tg\delta_b$ , przenikalność magnetyczna  $\mu_r$ , tangens kąta strat relaksacyjnych  $tg\delta_r$ . Próba oceny materiału elementu poprzez badanie materiału w zakresie wartości magnetyzacji nasycenia nie jest w warunkach praktycznych możliwa. Odkształcenia plastyczne powodujące znaczne zmiany przenikalności magnetycznej i natężenia pola koercji (do 50%) są przyczyną nieznacznych lub nawet nieistotnych ze względu na możliwości zastosowań praktycznych zmian magnetyzacji nasycenia od 0,01% do 0,04%.

## 2. Stanowisko pomiarowe i kalibracja układu pomiarowego do pomiaru dynamicznej pętli histerezy – (przenikalność skuteczna)

Schemat układu pomiarowego do zmontowania przez każdego elektryka jest bardzo prosty, jak pokazano na rysunku 3 [lit. *Oscyloskop elektroniczny*, Rydzewski]. Podstawowymi elementami układu są: cewka długa, o wymiarach zapewniających jednorodne pole magnesujące, cewka pomiarowa i obwody pomiarowe natężenia pola i indukcji magnetycznej.

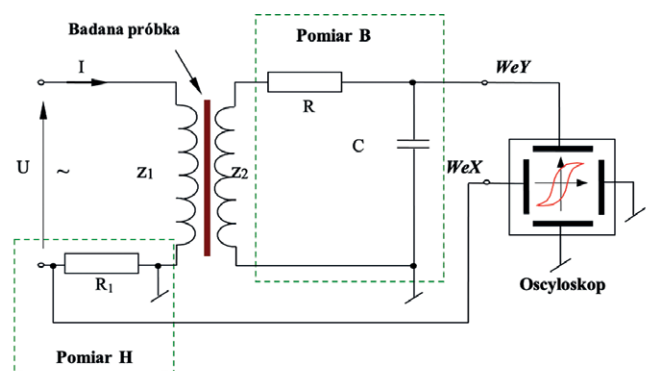
Natężenie pola magnetycznego  $H$  przypadające na działkę  $d$  osi  $x$  oscyloskopu pomiarowego dla wykonanego układu wyznaczono z zależności:

$$H/d = \frac{D_x z_1}{R_1 L} \cdot 10^2 \quad (8)$$

gdzie:

- $D_x$  – współczynnik odchylenia wzmacniacza  $X$ ;
- $z_1$  – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego;
- $R_1$  – szeregowo rezystancja w uzwojeniu pierwotnym;
- $L$  – średnia droga strumienia magnetycznego.

Aby uzyskać pętlę histerezy, napięcie doprowadzone do toru  $Y$  powinno być proporcjonalne do indukcji magnetycznej  $B$ .



Rys. 3. Układ do pomiaru dynamicznych pętli histerezy

Napięcie proporcjonalne do  $B$  otrzymuje się po scałkowaniu napięcia  $u_2$ . Jeżeli  $R \gg 1/(\omega C)$ , wtedy układ ten można traktować jako całkujący ograniczający błąd, co sprawdzono na próbkach wzorcujących. Przy znanym współczynniku odchylenia oscyloskopu w kierunku osi  $Y$  indukcja magnetyczna dla działki  $d$  odchylenia osi  $y$  oscyloskopu wyznaczana jest z zależności:

$$B/d = \frac{RCD_Y}{z_2 S} \cdot 10^4 \quad (9)$$

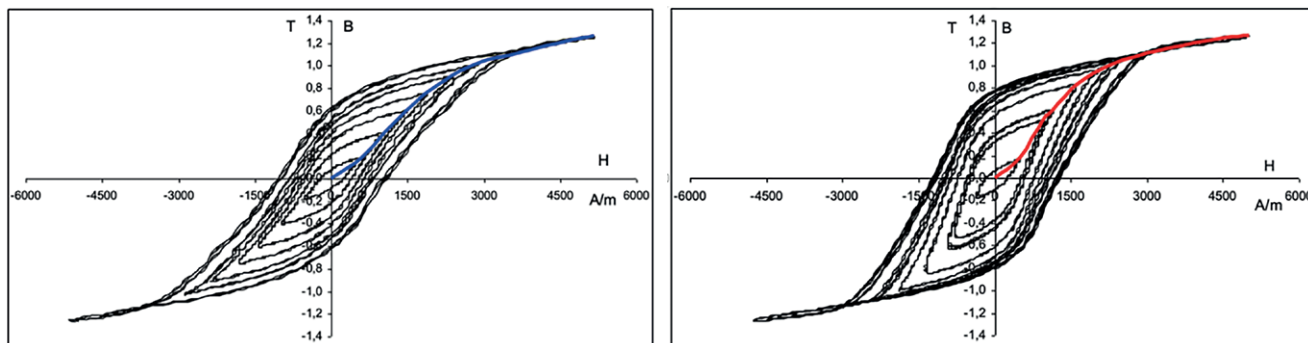
gdzie:

- $R$  – rezystancja układu całkującego;
- $C$  – pojemność układu całkującego;
- $D_Y$  – współczynnik odchylenia wzmacniacza;
- $z_2$  – liczba zwojów uzwojenia wtórnego;
- $S$  – przekrój rdzenia.

Wyniki zarejestrowane układem pomiarowym z rysunku 2 zamieszczono na rysunku 4.

Pomiary prowadzono w zakresach natężenia pola magnetycznego, dla którego widoczne są zmiany w przebiegu krzywych pierwotnego magnesowania materiału bez obciążeń i z obciążeniem maksymalnym 250 MPa. Krzywe te posłużyły do wyznaczenia krzywych przenikalności magnetycznej.

Czułość magnetosprężysta  $S$  charakteryzuje zmiany podatności magnetycznej badanego materiału pod wpływem



Rys. 4. Pętle histerezy charakteryzujące efekt Villariego badanych stali bez i z obciążeniem

działającego obciążenia. Czułość magnetosprężystą  $S_{max}$  wyznaczono dla maksymalnych przyrostów krzywych przenikalności magnetycznej badanych próbek. Czułość tę wyznaczono ze wzoru [10]:

$$S_r = \frac{\mu_{r\sigma} - \mu_r}{\mu_r \cdot \sigma} \cdot 100 \frac{\%}{MPa} \quad (10)$$

gdzie:

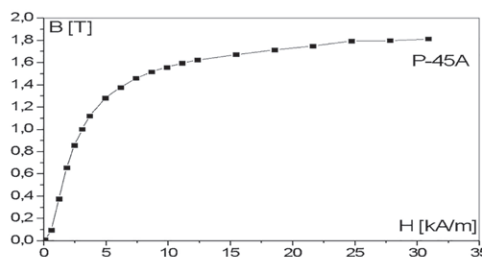
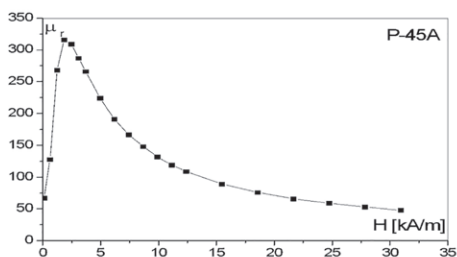
- $\mu_{r\sigma}$  – maksymalna względna przenikalność magnetyczna (przy obciążeniu);

- $\mu_r$  – maksymalna względna przenikalność magnetyczna (bez obciążenia);
- $\sigma$  – naprężenie rozciągające MPa.

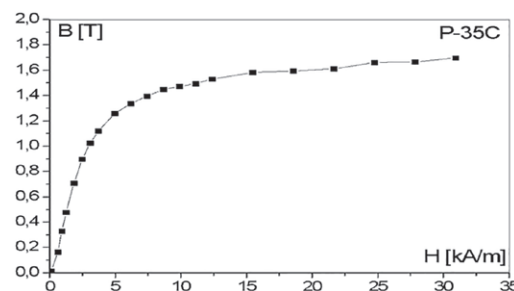
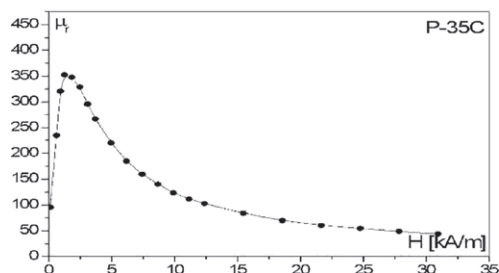
### 3. Pomiar statycznej pętli histerezy – przenikalność magnetyczna

Pomiar statycznej pętli histerezy wykonano w laboratorium Uniwersytet Śląskiego. Punktem zainteresowania były stale stosowane w kolejnictwie na zestawy kolejowe toczne. W poniższym zestawie tabel i wykresów podano składy chemiczne badanej stali, wykresy przenikalności magnetycznej i krzywe pierwszego magnesowania.

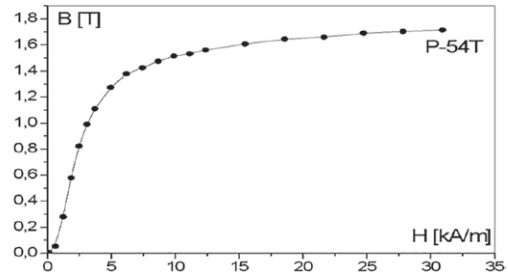
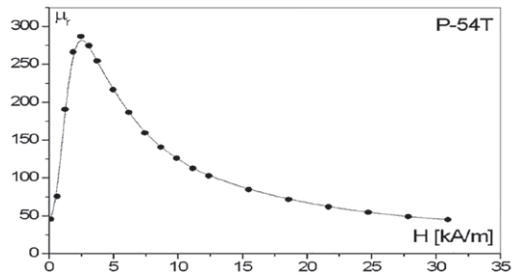
P45 Skład chemiczny stali [%]											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al metaliczny	
			(max)								
0,42÷0,50	0,60÷0,90	015÷0,40	0,030	0,030	0,30	0,30	0,30	0,08	0,05	0,020÷0,050	



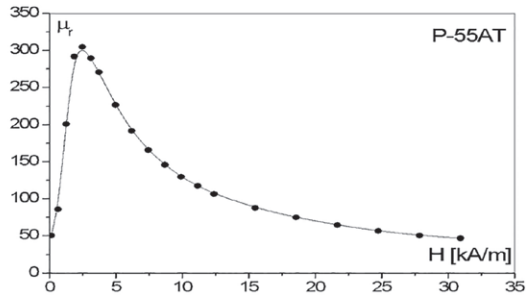
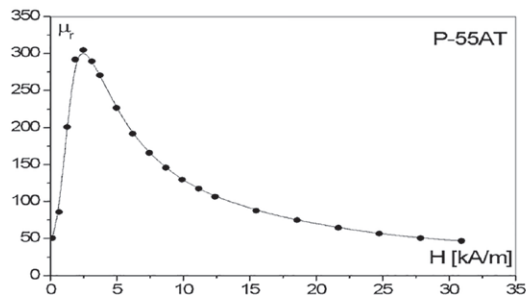
P35 Skład chemiczny stali [%]											
C max	Mn max	Si max	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al metaliczny	
			(max)								
0,37	1,10	0,45	0,35	0,35	0,30	0,30	0,30	0,05	0,05	0,020÷0,050	



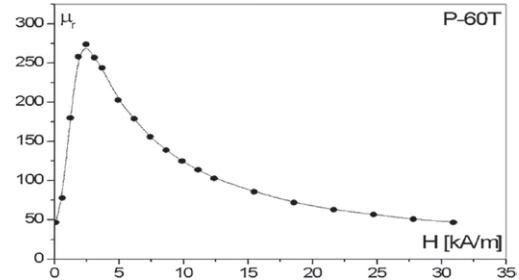
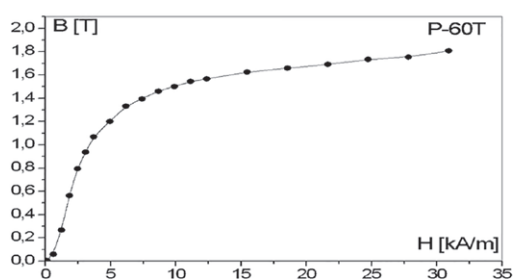
P54T Skład chemiczny [%]										
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al
0,57	0,84	0,37	0,016	0,008	0,03	0,02	0,04	0,004	0,001	0,029



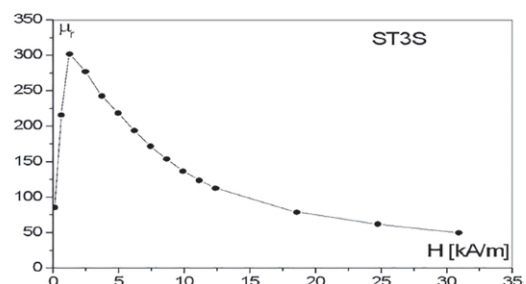
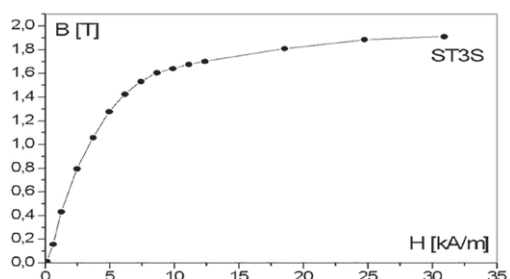
P55AT Skład chemiczny [%]										
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al
0,56	0,82	0,37	0,014	0,008	0,02	0,01	0,04	0,002	0,001	0,027



P60 TU Skład chemiczny [%]										
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al
0,58	0,86	0,36	0,019	0,019	0,02	0,02	0,04	0,002	0,001	0,025



	C max	Mn max	Si	P	S	Al min metaliczny
St3S	0,22	1,1	0,10÷0,35	0,050	0,050	min





Zestawienie zbiorcze dla stali bez obciążenia i z obciążeniem przedstawiono na rysunku 5.

**4. Magnetyczne odwzorowanie dynamicznego stanu naprężenia**

Możliwość pomiaru naprężenia i drgań w elementach ferromagnetycznych w wyniku pomiaru zmian natężenia pola magnetycznego (efekt Villariego). Przeprowadzono eksperyment z pomiarem pola magnetycznego. Wykonano pomiary odkształceń przetwornikami tensometrycznymi połączonymi w układ pełnego mostka, strzałki ugięcia, drgań przetwornikiem piezoceramicznym i parametrycznym firmy Analog Devices. Rejestrowano i porównywano sygnały napięciowe przetworników pomiarowych w funkcji czasu.

**4.1. Odwzorowanie odkształcenia sprężystego, zginania i drgań**

Badania prowadzono w skali laboratoryjnej. Częstotliwość zginania regulowano obrotami silnika. Testowano płaskownik ze stali St3 o długości 24 cm i przekroju 25 × 8 mm. Ugięcia cykliczne wymuszano za pomocą specjalnie przygotowanych krzywek. Równoległe prowadzone badania porównawcze obejmowały pomiary odkształceń powierzchniowych  $\epsilon$  – przetwornikiem tensometrycznym, strzałki ugięcia  $s$  – przetwornikiem potencjometrycznym, składowej stycznej natężenia pola magnetycznego  $H_t$  – przetwornikiem magnetorezystancyjnym KMZ 10A i pomiary drgań przetwornikami piezoceramicznym KD i parametrycznym ADXL. Na płaskownik jednostronnie utwardzony działano siłą pochodzącą od układu napędowego, jak pokazano na rysunku 6. Za źródło pola magnetycznego magnesującego materiał płaskownika posłużył magnes trwały przetwornika drgań.

**4.2. Stanowisko pomiarowe**

Stanowisko pomiarowe (rys. 6) składało się z płaskownika utwardzonego jednym końcem oraz krzywki zadającej ugięcia o regulowanej częstotliwości i amplitudzie. Płaskownik kontrolowano przetwornikami: drgań (ADXL), pola magnetycznego (KMZ) oraz mostkiem tensometrycznym.

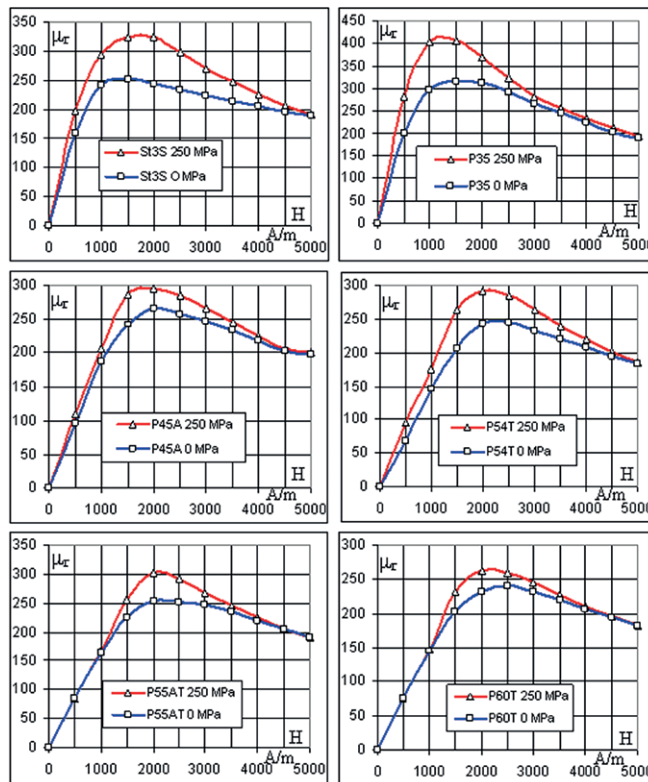
Na badanym płaskowniku (rys. 6) rozmieszczono przetworniki pomiarowe 1, 2, 3, opisane w tabeli 3.

Oprócz krzywki KI, pokazanej na rysunku 6, zastosowano krzywki o zarysach przekroju jak na rysunku 7.

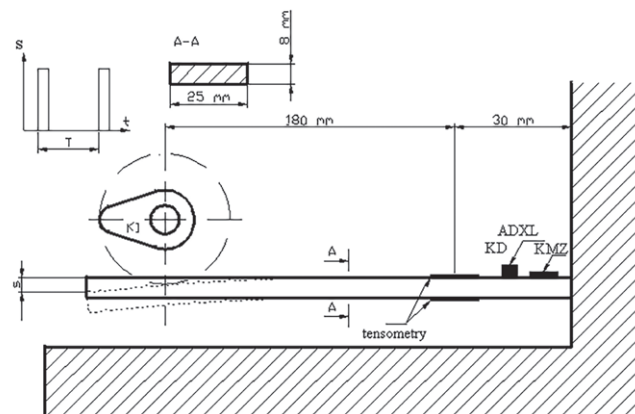
Tabela 3. Zestawienie przetworników pomiarowych

Nr	Przetwornik pomiarowy	Rodzaj	Typ	Czułość
1	Odształceń (tensometry w układzie pełnego mostka)	Parametryczny	4 x ITWL	R = 120, k = 2,2
2	Natężenia pola magnetycznego (mostek MR)	Parametryczny	KMZ 10B	20 V/KA/m*
3	Drgań	Parametryczny	ADXL	300 V/g
4	Drgań	Generacyjny	KD	100 mV/g
5	Strzałki ugięcia	Parametryczny	potencjometr liniowy	

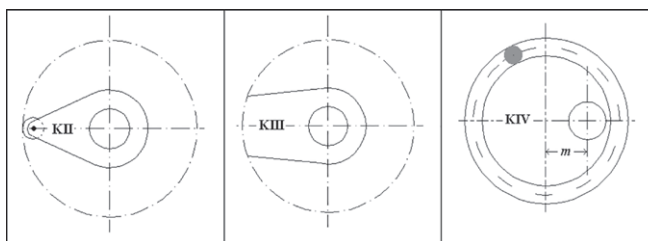
\*U zasilania = 5 V



Rys. 5. Zestawienie wyników pomiaru przenikalności magnetycznej wybranych stali



Rys. 6. Schemat stanowiska badawczego



Rys. 7. Kształty pozostałych krzywek KII do KIV

Powierzchnię natarcia krzywki KII stanowiło miniaturowe łożysko. Powierzchnia zewnętrznego pierścienia łożyska tocznego kulkowego osadzonego asymetrycznie pełniła rolę kolejnej krzywki – KIV. Krzywki różniły się wielkością mimośrodów z wysokości wzniosu krzywki (rys. 7).

Wprowadzenie kilku krzywek miało na celu wykazanie jakościowych oraz ilościowych związków pomiędzy zarejestrowanymi przebiegami napięciowymi przeprowadzonych pomiarów:

- przetwornikiem tensometrycznym – napięcie  $u_{pt}(t)$ , (rys. 8);
- przetwornikiem magnetorezystancyjnym – napięcie  $u_{pm}(t)$ ;
- przetwornikiem potencjometrycznym strzałki ugięcia –  $u_{pp}(t)$ .

Jednoczesny pomiar odkształcenia przetwornikami tensometrycznymi i natężenia pola magnetycznego przetwornikami magnetorezystancyjnymi umożliwił śledzenie przebiegów napięciowych oraz ocenę zbieżności amplitudowej i czasowej rejestrowanych przebiegów napięciowych. Wstępne wyniki badań pozwoliły także na dokonanie wyboru typu przetwornika drgań do dalszych badań.

Porównanie sygnałów napięciowych z jednocześnie pracujących przetworników drgań serii KD i serii ADXL z sygnałem napięciowym przetworników tensometrycznych w układzie pełnego mostka skompensowanego termicznie (rys. 9) zadykowały o wyborze przetwornika parametrycznego ze wzmacniaczem wewnętrznym ADXL jako docelowego ze względu na korzystniejsze pasmo przenoszenia w zakresie pomiaru bardzo niskich częstotliwości.

Dalsze badania prowadzono z przetwornikami ADXL ( $P_{pd}$ ), KMZ ( $P_{pm}$ ), mostkowym przetwornikiem tensometrycznym ( $P_{pt}$ ) oraz przetwornikiem potencjometrycznym ( $P_{pp}$ ).

## 5. Błąd powodowany od zmiany odległości pomiaru

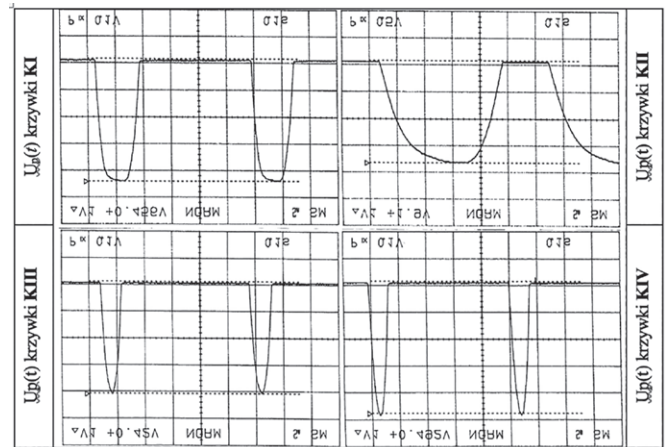
Czułość detekcji wad podczas magnetycznych nieniszczących badań defektoskopowych zależy głównie od stabilności odległości sondy pomiarowej od materiału. Jeżeli sonda pomiarowa jest wyposażona w przetwornik magnetorezystancyjny, a nie w hallotron, to dodatkowy błąd powodowany jest negatywnym oddziaływaniem składowej normalnej magnetycznego pola rozproszenia na przetwornik. Dla stosunku składowych  $H_x/H_y = 0,1$  błąd przetwarzania sięga 50% [129]. Dodatkowa przyczyna wpływająca na błąd pomiaru i czułość detekcji wynika z niezachowania podczas pomiaru stałej odległości sondy pomiarowej od badanej powierzchni. Wartość tego błędu może sięgać 70%.

Mierzone natężenie pola magnetycznego magnesowanego elementu uzależnione jest od odległości przetwornika pomiarowego od powierzchni. Najczęstszą przyczyną zmian odległości jest bicie promieniowe elementu. Ze względu na złożoność analityczną zagadnienia wpływ bicia promieniowego elementu (rys. 10) na pomiar natężenia pola magnetycznego wyznaczono symulacyjnie.

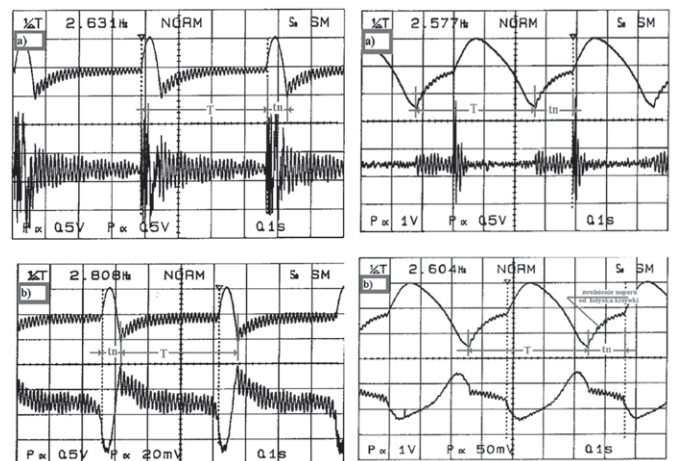
Odległość  $l_s$  przetwornika pomiarowego zmienia się po obwodzie obręczy w zakresie  $l_{s1} \leq l_{s2} \leq l_{s2} = l_{s1} + \delta$ . Przeanalizowany zostanie wpływ bicia promieniowego w zakresie od  $-0,45$  mm do  $+0,5$  mm na błąd pomiaru od przekroczenia założonej odległości pomiaru równej  $0,5$  mm (rys. 11).

W przeliczeniu procentowym wpływ bicia na wartość błędu przedstawia się następująco (rys. 12).

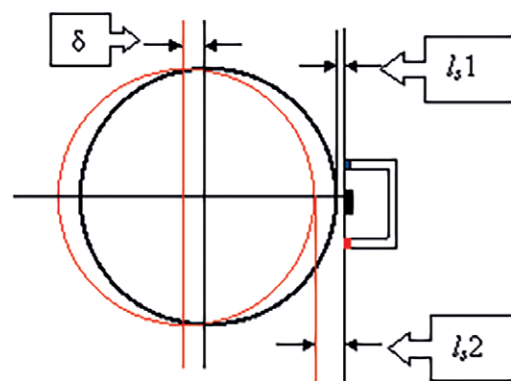
Zmiana odległości przetwornika w zakresie  $0,5$  mm  $\pm$   $0,1$  mm jest przyczyną błędu w zakresie  $+6\%$  do  $-7\%$ . W celu ograniczenia wpływu błędu pomiaru należy zapewnić stałą odległość pomiaru. Dopuszczalne jest bicie w zakresie setnych milimetra.



Rys. 8. Przebiegi napięciowe  $u_{pp}(t)$  potencjometrycznego przetwornika pomiarowego



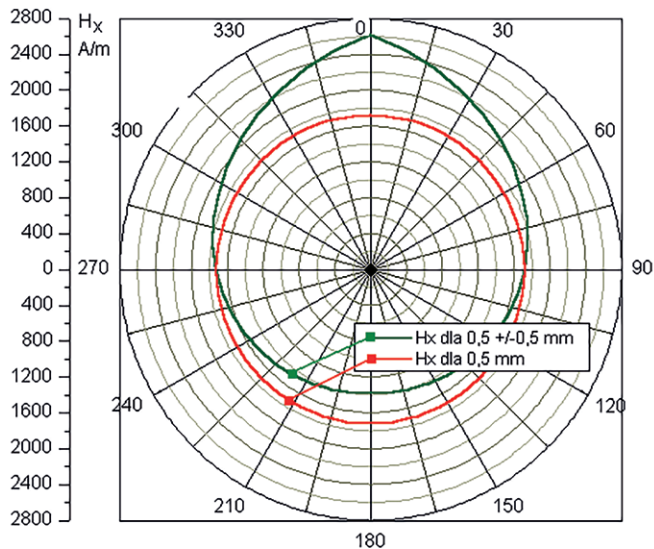
Rys. 9. Porównanie przebiegów pomiarowych napięciowych przetwornika tensometrycznego z przebiegami napięciowymi przetwornika: ADXL – a, KMZ – b (wymuszenie krzywką II)



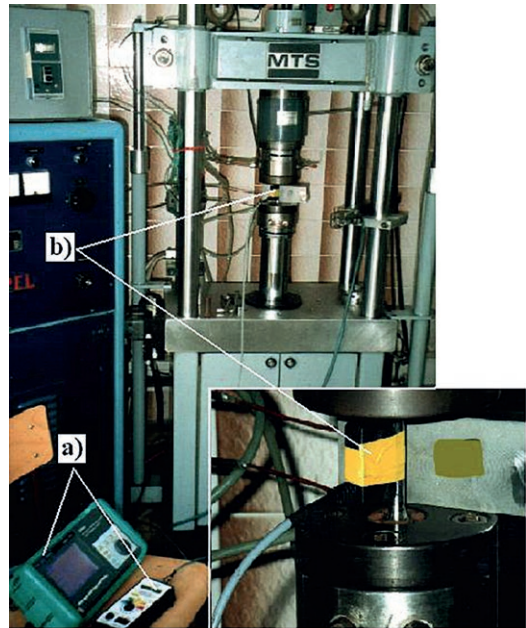
Rys. 10. Wpływ bicia promieniowego na odległość  $l_s$  przetwornika pomiarowego

Metoda magnetyczna zapewnia bezstykowy pomiar sił i naprężenia. Pomiar taki prowadzono w próbkach stalowych przygotowanych do badań wytrzymałościowych. Badano próbki ze stali ST3 o średnicy 10 mm, długości 150 mm i przekroju  $78,5$  mm<sup>2</sup>. Próbkę mocowano w maszynie MTS (rys. 13)

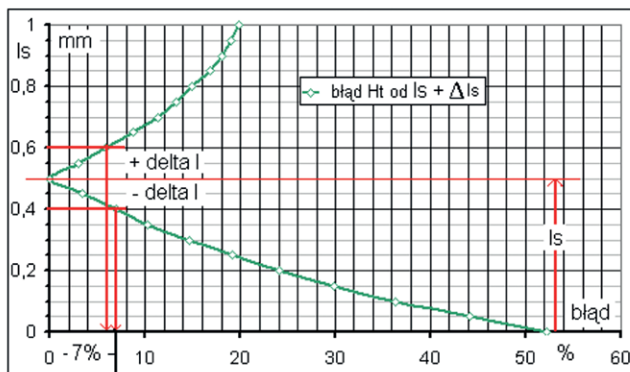




Rys. 11. Zmienność składowej  $H_x$  po obwodzie obręczy dla  $l_s = 0,05$  mm ( $H_{max}$ ) do 1,00 mm ( $H_{min}$ )



Rys. 13. Stanowisko pomiarowo-rejestrujące - a; próbka z sondą pomiarową - b

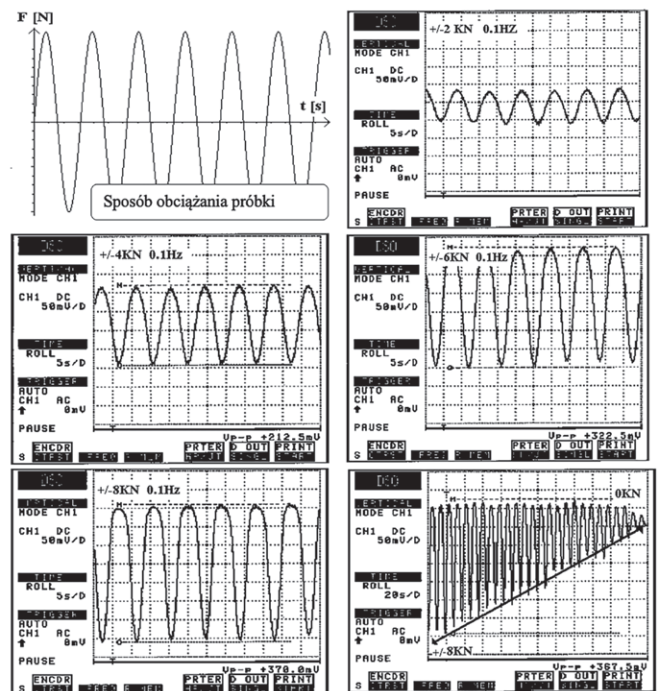


Rys. 12. Wpływ  $\Delta l_s$  na błąd pomiaru

poddawano obciążeniom w zakresie od 0–8 kN, zmieniając częstotliwość cyklu obciążeń od 0,1–50 Hz. Wyniki badań potwierdzają możliwość bezstykowego pomiaru naprężenia i drgań. Wyniki pomiarów zamieszczono na rysunkach 6.5 i 6.6. Maszyna MTS sterowana elektronicznie zapewnia regulację wartości siły podczas badań.

Przeprowadzona seria pomiarów wykazała liniowość zmian magnetyzacji od naprężenia dla dolnego zakresu granicy sprężystości  $R_s$ . Asymetrię pomiędzy ściskaniem a rozciąganiem zaobserwowano przy sile 5 kN. Możliwość bezstykowego pomiaru częstotliwości zmian naprężenia, a więc i drgań pochodzenia mechanicznego, badano w zakresie obciążeń zmiennych od 0,1 Hz do 50 Hz (rys. 14). Obniżenie siłą 1 kN przy częstotliwości 50 Hz wynikało jedynie z ograniczeń technicznych maszyny wytrzymałościowej.

Większość ferromagnetyków cechuje proporcjonalność zmian parametrów magnetycznych do naprężenia w dolnych zakresach naprężenia sprężystego przy asymetrii pomiędzy ściskaniem a rozciąganiem.

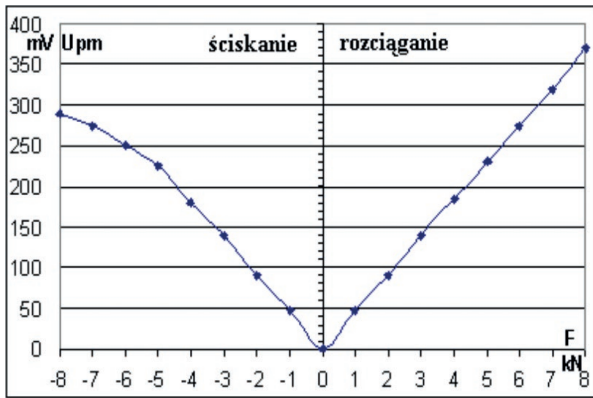


Rys. 14. Pomiar naprężenia od obciążeń zmiennych cyklicznie

Charakterystyki przetwarzania sondy pomiarowej i pomiaru obciążeń mechanicznych otrzymane z badań próbki o przekroju okrągłym wykonane na stanowisku MTS zamieszczono na rysunku 15.

## 6. Badanie nierównomierności naprężenia w połączeniu wciskowym

Symulacje pomiaru natężenia pola magnetycznego sondą pomiarową prowadzono w programie FEMM. Kształt



Rys. 15. Charakterystyka pomiarowa sondy podczas obciążania ferromagnetyka

powierzchni bocznej pierścienia (rys. 16) spowodował konieczność analizy symulacyjnej rozkładu pola magnetycznego. Wyniki obliczeń analitycznych zamieszczono w tabeli (tab. 4). Przykład rozkładu linii sił pola magnetycznego i indukcji magnetycznej w wycinku pierścienia zewnętrznego pokazano na rysunku 17.

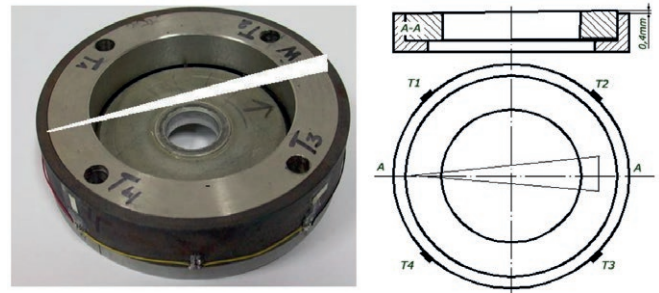
Na rysunku 15 oznaczono lokalizacje tensometrów i ich kierunek w stosunku do osi pierścienia oraz wartości wskazań mostka tensometrycznego. Nierównomierność rozkładu naprężeń od błędu wcisku oddaje w pełni wykres kołowy przedstawiony na rysunku 17.

Pomiary magnetyczne porównane z pomiarami tensometrycznymi wykazały niezwykłą precyzję odwzorowania stanu naprężenia w polu magnetycznym. Odkształcenia od naprężenia tnącego  $\sigma$ , mierzono tensometrami T1 i T3. Tensometrami T2 i T4 zarejestrowano odkształcenia od ściskania. Pomiary prowadzono w układzie  $\frac{1}{4}$  mostka tensometrycznego. Pozostałe trzy tensometry mostka pomiarowego pracowały jako kompensacyjne. Wahania temperatury podczas badań nie przekraczały  $0,4^{\circ}\text{C}$ . Gałąź  $\frac{1}{4}$  mostka tensometrycznego wzorcowano dla każdej serii pomiarowej rezystorem o wartości  $520\text{ k}\Omega$ . Wyniki pomiarów natężenia pola magnetycznego na wysokości osi tensometrów T1 i T3 zamieszczono w tabeli 4. Rezultaty przeprowadzonych pomiarów tensometrycznych, na które składały się dwie serie pomiarowe po trzy pomiary przed i po wcisku, zamieszczono w tabeli 5.

Płaszczyzna pomiaru sondy pomiarowej przecina osie tensometrów T1 i T3. Tensometry te zarejestrowały odkształcenia uśrednione od naprężenia tnącego. Tensometry T2 i T4 zarejestrowały odkształcenia uśrednione od naprężenia ściskającego. Obszary naprężenia zarejestrowanego za pomocą tensometrów przemieszczone są w stosunku do płaszczyzny pomiaru magnetycznego o kilka milimetrów.

Potwierdzono eksperymentalnie możliwość wykrywania zmian naprężenia dla stali konstrukcyjnych o niewielkich czułościach magnetomechanicznych i współczynnikach magnetystrykcji. Czułość pomiarową metody potwierdza fakt wykrycia wpływu paska folii ( $0,03\text{ mm}$ ) wprowadzonego podczas wcisku pomiędzy powierzchnie pierścieni w miejscu kontrolowanym tensometrem T1.

Kolejna aplikacja analityczna – laboratoryjna metody polegała na ocenie poprawności połączenia wciskowego za pomocą



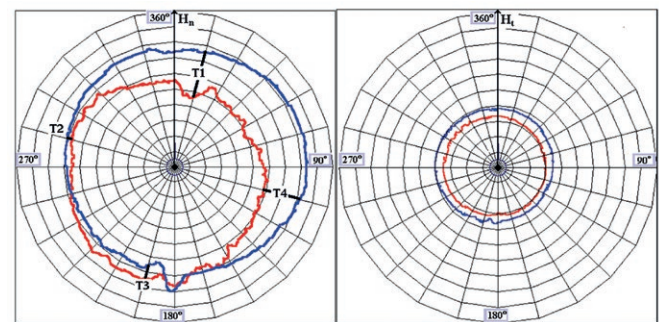
Rys. 16. Fotografia pierścienia i schemat celowego błędu połączenia wciskowego

Tabela 4. Pomiar tensometryczny

Tensometr pomiarowy		T1	T2	T3	T4
Napięcie wyjściowe mostka $U_{zas} = 6\text{ V}$ , $R_t = 120\ \Omega$ , $k = 1,95$	mV	1,45	-0,34	0,20	-3,53
Wyznaczone odkształcenie	%	0,483	0,113	0,066	1,177
Pomierzone naprężenia (błąd wcisku)	MPa	106,4	24,8	14,5	259,6
Wyznaczone analitycznie naprężenia (stan prawidłowy)	MPa	130,84	9,93	130,84	9,93

Porównanie wyników pomiarów

Punkt lokalizacji osi tensometru		T1	T2	T3	T4
Pomierzona zmiana natężenia pola magnetycznego DH	A/m	260	70	70	240
Pomierzone naprężenia Ds	MPa	106,4	24,8	14,5	259,6



Rys. 17. Pomierzona niejednorodność naprężenia na obwodzie pierścienia dla składowych natężenia pola magnetycznego

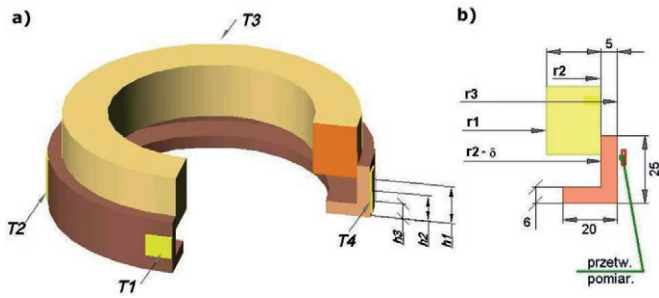
Tabela 5. Pomiar magnetyczny

Wyniki pomiaru [A/m]	Tensometry			
	T1	T2	T3	T4
Przed wciskiem	240	390	260	180
Po wcisku	520	320	330	420
$\Delta H$	260	70	70	240

metody magnetycznej [137]. Możliwość bezstykowej kontroli naprężenia ma duże znaczenie w procesie łączenia i montażu elementów maszyn.

Badania symulacyjne pokazano na rysunku 18. Kształt pierścienia zewnętrznego narzucony został stosowanym systemem mocowania stanowiska pomiarowego.





Rys. 18. Przekrój badanego połączenia

Wcisk  $\delta$ , dla zadanych promieni pierścienia zewnętrznego i wewnętrznego oceniono analitycznie i numerycznie. Założono naprężenia w zakresie do  $\frac{1}{2}$  granicy sprężystości dla stali St3. Obliczeniami numerycznymi oceniono wpływ kształtu podstawy pierścienia zewnętrznego na odkształcenia jego powierzchni bocznej.

Przed eksperymentem przeprowadzono analityczną ocenę naprężenia od przyjętego zakresu przemieszczeń  $\delta$  w celu utrzymania założonej wartości naprężenia. Pierścień zewnętrzny wykonany jest ze stali St3, a pierścień wewnętrzny ze stali wysokostopowej nierdzewnej 1H18N9. Założenia konstrukcyjne:  $\delta = 0,05$  mm,  $r_1 = 71$  mm,  $r_2 = 66$  mm,  $r_3 = 47$  mm.

Dla równych  $E_1 = E_2 = E$  ciśnienie w połączeniu wciskowym wyniesie:

$$p = \frac{E\delta}{r_2} \left( \frac{(r_2^2 - r_1^2) \cdot (r_3^2 - r_2^2)}{2r_2^2(r_3^2 - r_2^2)} \right) \quad (11)$$

Naprężenia  $\sigma_r$  i  $\sigma_t$  wyniosą kolejno:

$$\sigma_{r(\max)} = p \quad (12)$$

$$p \left( \frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \right) \leq \sigma_t \leq p \left( \frac{2r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \right) \quad (13)$$

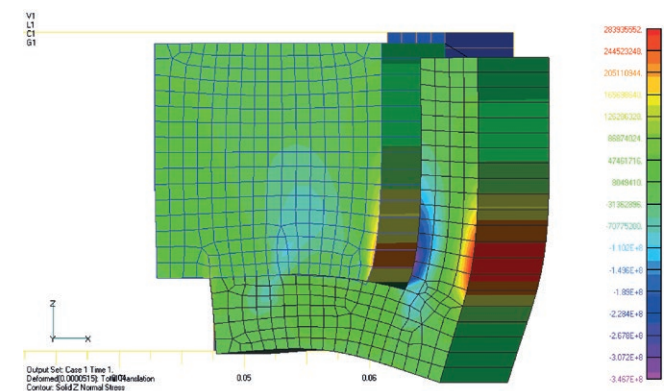
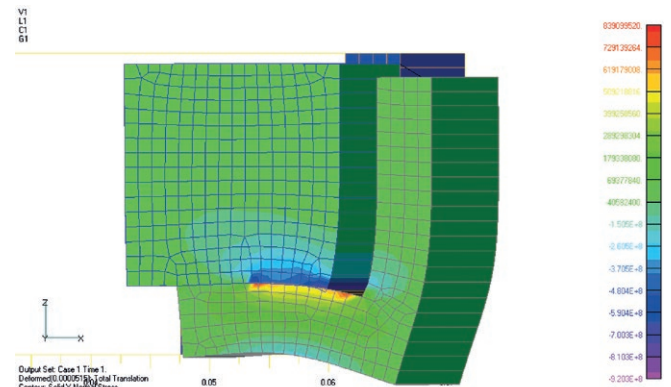
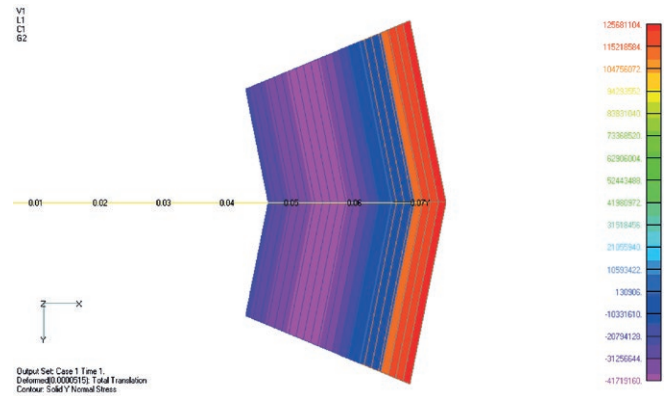
Dla przemieszczeń w pierścieniu zewnętrznym równych  $\delta = 0,05$  mm przewidywany przedział zmian naprężenia  $\sigma_t$  powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej pierścienia (St3) od połączenia wciskowego kształtował się w zakresie naprężenia sprężystego w przedziale:

$$126,35 \text{ MPa} \leq \sigma_t \leq 135,33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{r(\max)} = p = 9,93 \text{ MPa}$$

Symulacje MES, przedstawione na rysunku 19, potwierdzają wyliczenia analityczne i wykazują, że górna część pierścienia jest wolna od wpływu kształtu pierścienia zewnętrznego.

Symulacje pomiaru natężenia pola magnetycznego sondą pomiarową prowadzono także w programie FEMM. Kształt powierzchni bocznej pierścienia spowodował konieczność analizy symulacyjnej rozkładu pola magnetycznego.



Rys. 19. Rozkład naprężenia wzdłuż osi y, x, z

### Pomiary magnetyczne stali wysokostopowych paramagnetycznych

Wraz z postępującym procesem obciążeń zmęczeniowych parametry fizyczne materiału, z którego wykonano podzespół lub element, ulegają charakterystycznym i złożonym zmianom.

Zmiany te należy rozpatrywać indywidualnie dla każdej stali. Znajomość związków magnetomechanicznych [102, 103, 105, 106, 110], jak i elektromechanicznych PHYBAL [72] umożliwia zastosowanie jednej z metod diagnostyki stanu elementu ze względu na obciążenia zmęczeniowe.

Oprócz stali węglowych ferromagnetycznych badaniom poddano wybrane gatunki paramagnetycznych stali austenitycznych, chromowo-niklowych i chromowo-manganowych oraz stale wysokostopowe ferromagnetyczne [102, 103, 105].

W wielu przypadkach dla stali ferromagnetycznych wyznaczenie zmian parametrów magnesowania prowadzone jest na podstawie przebiegu statycznej pętli histerezy. Dla stopów stali paramagnetycznych analiza zmian powierzchni pętli histerezy magnetycznej i jej przebiegu nie jest wystarczająca lub trudna do uzyskania, dlatego wyznacza się dodatkowo parametry elektryczne materiału.

W zakresie magnetycznych metod badania stali austenitycznych mamy do czynienia z użytecznym (tylko pomiarowo) zjawiskiem niestabilności paramagnetycznego austenitu i zmianą jego właściwości w kierunku magnetycznym. Zmiana właściwości jest powodowana złożonymi zmianami strukturalnymi, powodowanymi przejętą przez materiał energią procesów mechanicznych, termicznych lub zmęczeniowych [65, 99, 105].

Niemagnetyczne stopy są to struktury paramagnetycznego austenitu, z ewentualnym wydzieleniem grafitu. Pierwiastkami powodującymi obniżenie temperatury przemiany  $\gamma \rightarrow \alpha$  są mangan i nikiel, przy czym austenityzujące działanie manganu jest znacznie silniejsze niż niklu. Stabilność austenitu manganowego jest znacznie wyższa niż niklowego. W przeciętnym składzie chemicznym austenitycznej stali manganowej jest ok. 12,5% Mn (stal Hadfielda). Czynnikiem powodującym rozkład austenitu w tej stali są powolne chłodzenie i wygrzewanie. Nagrzewanie tej stali zwiększa jej przenikalność magnetyczną, osiągającą maksimum w 400°C. Odształcenia plastyczne, jak i naprężenia mechaniczne wpływają na rozpad austenitu, zarówno w stalach manganowych, manganowo-niklowych, jak i niklowych, jednak z różną intensywnością.

W stali chromowo-niklowej rozpad austenitu następuje przy ochłodzeniu do temperatury  $-20^{\circ}\text{C}$ . Stosowanie do celów elektrotechnicznych kwasowej stali austenitycznej chromowo-niklowej uzasadnione jest jedynie jej odpornością na korozję. W stali tej po zgnieciu lub wygrzewaniu następuje wydzielenie węglików i częściowa przemiana  $\gamma \rightarrow \alpha$ , zmieniająca parametry magnetyczne. Trwałość austenitu regulowana jest między innymi dodatkiem tytanu i chromu. Badaniu poddano stal chromowo-niklową oraz stal chromowo-manganową. Oceńano możliwość korelowania odształceń plastycznych ze stabilnością austenitu i pomiarem zmian parametrów magnetycznych [95, 103].

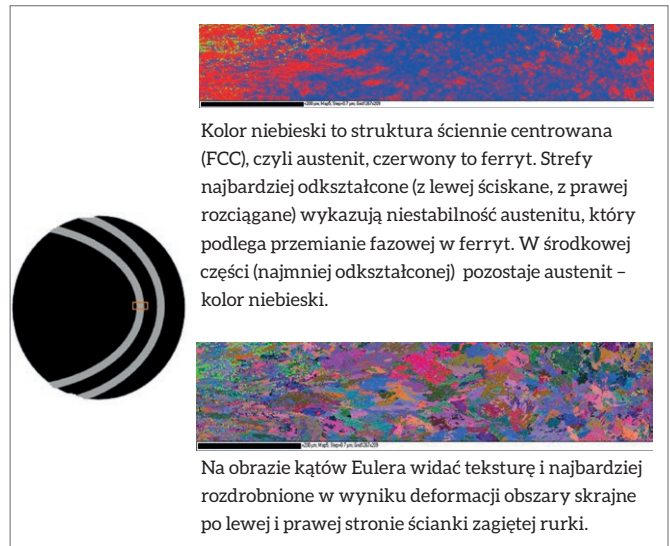
Na rysunku 20 zamieszczono wycinek rurki chromowo-niklowej (austenitycznej) do badań wpływu odształceń na rozpad austenitu, z oznaczonym punktem pomiarowym początkowym (1) i końcowym (21). Na rysunku obok przedstawiono strukturalne efekty odształcenia plastycznego w miejscu zgięcia rurki w postaci przyłożonego magnesu.

Na stanowisku EBSD (*Electron Backscatter Diffraction*) zbadano przekrój rurki oznaczony na rysunku 22 prostokątną ramką. Na rysunku tym przedstawiono obrazy zmian struktury oraz korespondujące kąty Eulera, wywołane procesem odształceń plastycznych poszczególnych ziaren badanego obszaru (rys. 22).

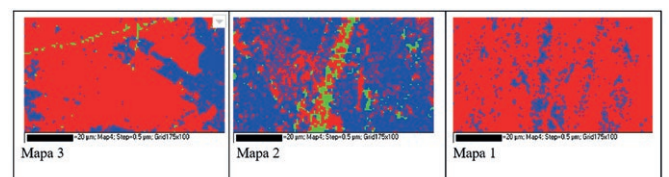
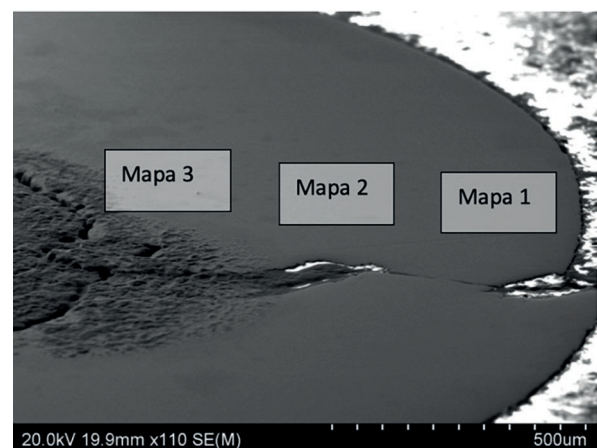
Inną metodykę badań zastosowano dla stali chromowo-manganowej z kołpaków wirników turbogeneratorów (tj. osłon połączeń czołowych uzwojenia wirnika). Fotografie kołpaków oraz próbki wykonane ze stali G18H18 zamieszczono na rysunku 23.



Rys. 20. Badany wycinek i test z magnesem



Rys. 21. Oznaczona strefa zglądu wraz z mapą odształceniowych zmian struktury przekroju i kąty Eulera korespondujące ziarnom



Rys. 22. Lokalne przemiany struktury w miejscu gięcia

Złożony proces zmęczenia materiału często trudno jest zaobserwować na obrazach struktur. W niektórych przypadkach można wskazać na prostsze przebiegi narastania zmian





Rys. 23. Kołpaki wirników turbogeneratorów oraz zestawienie typów badanych próbek

Tabela 6. Skład chemiczny stali A298 class C

C	Si	Cr	Mn	P	S	V
0,12	0,80	20,0	20,0	0,05	0,015	0,5



Rys. 24. Próbkę wyciętą na elektrodrażarce przed obróbką szlifowania i wycinek przewężony próbki pobrany do badań metalograficznych

zmęczeniowych związane z defektami liniowymi lub punktowymi. Najprostsze to linie poślizgu i składające się z nich pasma poślizgu. Dobry przykład stanowi stal chromowo-manganowa (ASTM A298 class C, EN, DIN – X8CrMn1818), której parametry fizyczne zostały tak zaprogramowane składem chemicznym (tabela 6) i procesem obróbki, aby parametry elektryczne i magnetyczne (paramagnetyk) nie ulegały zmianie podczas pracy ze względu na obecność silnego pola przemiennego. Jest to wysoko stabilna parametrycznie stal chromowo-manganowa. W stali tej obserwujemy rozwój i przemieszczanie linii pasm poślizgu w stosunku do struktury początkowej nadanej materiałowi elementu w fazie obróbki plastycznej procesu produkcji.

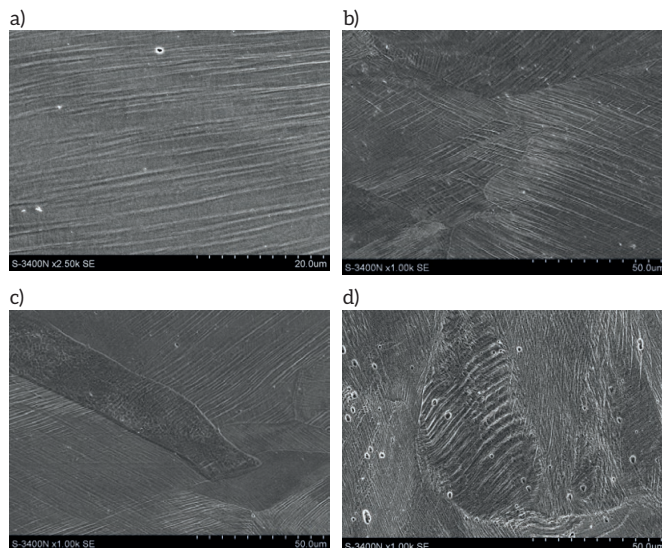
Zapotrzebowanie energetyki na opracowanie badań dodatkowych dla elementów wykonanych z tej grupy stali zaowocowało wieloma badaniami i wynikami zawartymi w artykułach [93–98]. Próbki stali o kształcie przedstawionym na rysunku 24 poddano badaniu wpływu wysoko cyklicznych obciążeń zmęczeniowych o charakterze odzerowo tętniącym dodatnim.

W miarę wzrostu liczby cykli obciążeń wzrasta liczba pasm poślizgu i zmienia się kierunek ich ułożenia w stosunku do obrazu powstałego w procesie obróbki kucia i walcowania (rys. 25).

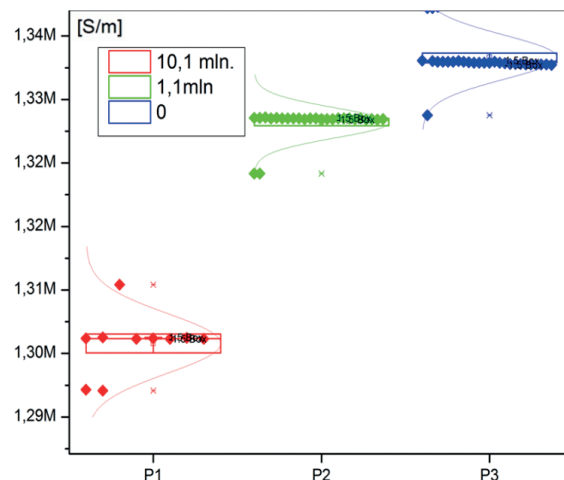
Poza obrazami zmiany ilości liczby linii poślizgu otrzymanymi w zastosowanym powiększeniu mikroskopu elektronowego brak widocznych struktur, które świadczyłyby o zmianie przenikalności materiału, a zmiana taka występuje (rys. 26).

Podczas badania tej stali zaobserwowano zmiany przenikalności magnetycznej materiału, które w procesie relaksacji zanikały. Czas powrotu przenikalności magnetycznej podwyższonej podczas cyklicznego uginania płaskownika, trwał do 30 minut.

W procesach rozwoju pasm poślizgu obserwujemy ekskluzję i intruzję w powierzchni materiału.



Rys. 25. Struktury stali A298 class C powodowane wzrostem cykli obciążeń zmęczeniowych odzerowo tętniących od struktury wejściowej: a) po kolejne cykle obciążeń zderzeniowych – 1,0 mln cykli; b) 20 mln cykli; c) 30 mln cykli



Rys. 26. Pomiar metodą techniczną półautomatyczna próbki z rysunku wykazuje zmiany przewodności materiału próbek o trzech stanach obciążenia.

Tabela 7. Skład chemiczny stali chromowo-niklowej X6CrNiTi18-10

Skład chemiczny	Ni	Cr	Mn	Mo	Ti	Fe
Normatywny [%]	9–12	17–19	≤2	≤0,15	≤0,7	
Zmierzony [%]	9,71	18,04	1,30	0,22	0,30	69,86

Tabela 8. Skład chemiczny stali chromowo-manganowej G18H18

Skład chemiczny zmierzony w %	N	Cr	Mn	Mo	Ti	Fe	
	0,575	18,315	19,127	0,077	0,067	61,495	
Skład chemiczny normatywny w %	C	Si	Cr	Mn	P	S	N
	Max 0,12	Max 0,80	17,5–20,0	17,5–20,0	Max 0,05	Max 0,015	Min 0,5

W próbkach materiału kołpaka wykonano dodatkowe pomiary zmian magnesowania oraz stwierdzono zmiany w strukturze wywołane odkształceniem plastycznym, jak pokazano na rysunku 29 i 30. Składy chemiczne stali chromowo-niklowej (rurki) i chromowo-manganowej (kołpaki) zamieszczono w tabelach 7 i 8.

Pomierzony skład chemiczny stali chromowo-niklowej (X6CrNiTi18-10), poza zawartością molibdenu, jest zgodny z danymi zawartymi w normach. Różnica wykazana w składzie stali nie wpływa na strukturę austenitu. Próbka stali X6CrNiTi18-10 (odcinek rurki) w stanie wyjściowym, tj. niepoddana odkształceniom plastycznym, wykazuje strukturę austenityczną z nielicznymi granicami bliźniaczymi (rys. 27). Próbki poddane zginaniu na zimno wykazują strukturę austenityczną z licznymi granicami bliźniaczymi (rys. 28). W wyniku przemiany martenzytycznej w strukturze występują liczne wyspy martenzytu. Widoczne na zdjęciach czarne plamki (jamki trawienne), będące wynikiem przyspieszonego polerowania i trawienia, nie mają wpływu na wynik badań magnetycznych.

Badania metalograficzne stali stopowej chromowo-manganowej G18H18, o składzie chemicznym: 61,50% Fe; 18,32% Cr; 19,13% Mn; 0,58% N, przeprowadzono przy użyciu mikroskopu skaningowego Hitachi S-4200, ze szczególnym uwzględnieniem miejsca najbardziej odkształconego. Próbki tej stali wykazują strukturę austenityczną (rys. 29) z wyraźnymi pasmami poślizgu. Miejsce najbardziej odkształcone różni się pod względem mikrostruktury o dodatkowe pasma poślizgu (rys. 30).

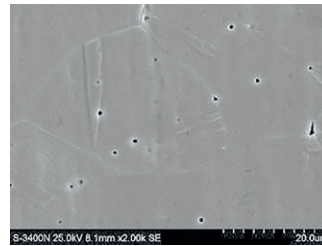
Ujawniono stosunkowo duże ziarna austenitu z granicami bliźniaczymi, charakterystyczne dla stali chromowo-niklowej (rys. 27 i 28). W stali chromowo-manganowej mamy do czynienia z licznymi liniami poślizgu charakterystycznymi dla struktury silnie odkształconej (rys. 29 i 30).

Z przedstawionych porównań pomiędzy stalami chromowo-niklowymi a chromowo-manganowymi wynika różny charakter zmian ich struktury, będący odpowiedzią na wprowadzone odkształcenia plastyczne.

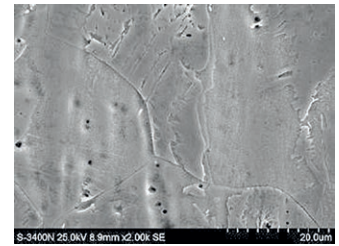
## 8.2. Przykłady zastosowań – pole magnetyczne obiektu i defektu

Pole magnetyczne obiektu mierzone po jego powierzchni jest zakłócone wieloma czynnikami, wśród których najważniejsze to: naprężenia wewnętrzne i niejednorodność struktury materiału, jej nieciągłość, jak i geometria układu stanowisko – sonda. W celu opracowania praktycznej metody detekcji wad autor przeprowadził szereg eksperymentów wyjaśniających, w jaki sposób należy interpretować obraz pola magnetycznego obiektu z jego stanem technicznym [12–16]. Na rysunku 31 pokazano pierścien z wzorcami defektów oraz zarejestrowany obraz zewnętrznego pola magnetycznego.

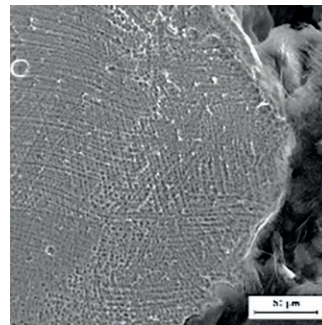
W celu oddzielenia zmian przebiegu pola magnetycznego defektu ciągłości geometrycznej od składowych pola niezwiązanych z geometrią defektu (niejednorodność struktury, naprężenia wewnętrzne), należy zastosować wiele procedur pomiarowych. Zadanie to opracował Dr Tomasz Janeczek (pierwszy promowany doktor nauk technicznych autora). Zastosowanie procedury filtrowania cyfrowego sygnału zgodnie z poniższymi wzorami (12–14) umożliwiło wyodrębnienie



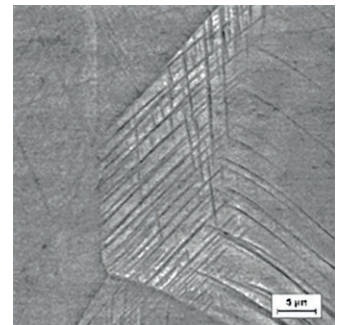
Rys. 27. Struktura stali X6CrNiTi18-10 w stanie początkowym



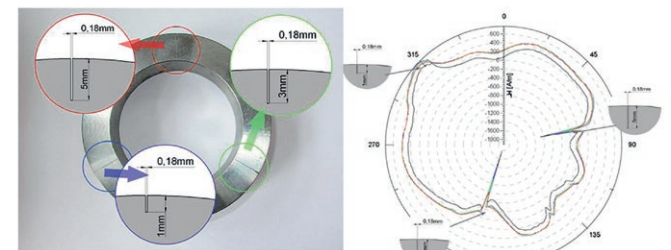
Rys. 28. Struktura stali X6CrNiTi18-10 po odkształceniu



Rys. 29. Struktura stali Cr-Mn (G18H18), materiał eksploatowany do awarii



Rys. 30. Struktura stali Cr-Mn (G18H18) po dodatkowym zginaniu na zimno



Rys. 31. Wzorec wad i zarejestrowany obraz pola magnetycznego po obwodzie

obrazu magnetycznego wady z obrazu pola magnetycznego obiektu [17, 18].

$$y_i = x_i \cdot w \cdot k_{12} \quad (14)$$

$$x_i = \left( x_i - \frac{1}{M} \sum_{i=\frac{M-1}{2}}^{i+\frac{M-1}{2}} x_i \right) \quad (15)$$

$$w = \frac{t_{\max}}{w_{\max}} \quad (16)$$

$$t_{\max} = \left( x_i - \frac{1}{100} \sum_{i=\frac{100-1}{2}}^{i+\frac{100-1}{2}} x_i \right) \quad (17)$$

$$y_i = x_i \cdot w \cdot k_{12} \quad (18)$$



$$x_i = \left( x_i - \frac{1}{M} \sum_{i=\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} x_i \right) \quad (19)$$

$$w = \frac{t_{max}}{w_{max}} \quad (20)$$

$$t_{max} = \left( x_i - \frac{1}{100} \sum_{i=\frac{100-1}{2}}^{\frac{100-1}{2}} x_i \right) \quad (21)$$

gdzie:

- $x_i$  – sygnał wejściowy;
- $y_i$  – sygnał wyjściowy;
- $w$  – współczynnik wzmocnienia;
- $k$  – wzmocnienie sygnału;
- $t_{max}$  – wartość maksymalna sygnału dla stałego okna  $M = 100$ ;
- $w_{max}$  – wartość maksymalna sygnału dla wybranego okna  $M$  (wybranego poziomu filtra);
- $M$  – liczba punktów użytych do obliczenia wartości średniej.

Na rysunku 31 podano przykład zarejestrowanej mapy pola magnetycznego wycinka jednej osi z zestawu kołowego. Zastosowana procedura uśredniania sygnału pomiaru, jak pokazano na rysunku 33, umożliwiła precyzyjne wskazanie defektu.

Na rysunku 33 pokazano wpływ bicia promieniowego podczas automatycznego pomiaru namagnesowania powierzchni walcowej elementu (np. czopa osi) [12–18].

Badanie elementów okrągłych wymaga zminimalizowania wartości promieniowego bicia elementu i odległości od przetwornika pomiarowego.

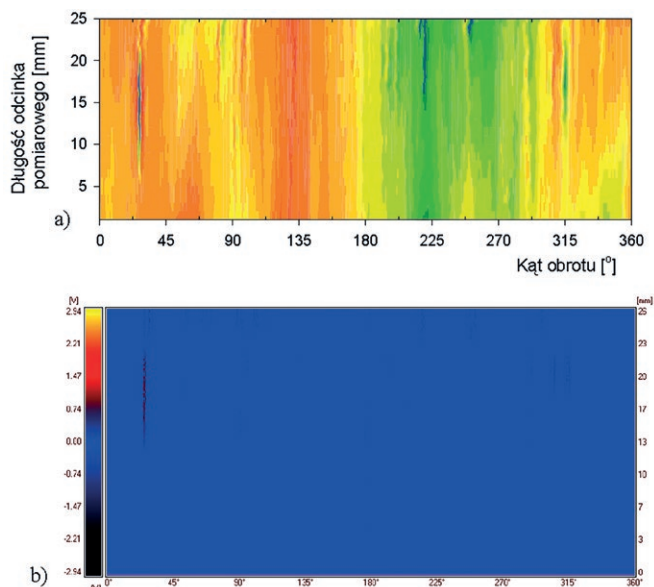
Znaczenie przetwarzania sygnału i przetwarzania obrazu dla wszystkich metod badawczych obrazuje czop osi po regeneracji, zakwalifikowany pozytywnie do eksploatacji po badaniach ultradźwiękowych. Badania magnetyczne wskazały na defekty procesu napawania.

Każda z metod defektoskopowych lub metod oceny stanu ma swoiste ograniczenia badawcze, o których należy pamiętać przed podjęciem badań. Na rysunkach 34 i 35 pokazano skuteczność metody w detekcji wad regeneracji czopa napyłaniem ogniowym

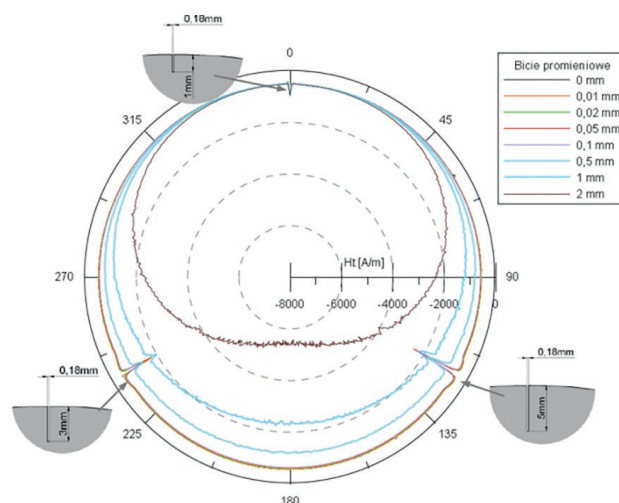
Na obrazie powierzchni po regeneracji (rys. 35) widoczne są miejsca (inne to) o rozwarstwieniu mogącym powodować znaczny problem eksploatacyjny. Faktu tego nie uwidaczniają inne metody NDT.

## Literatura

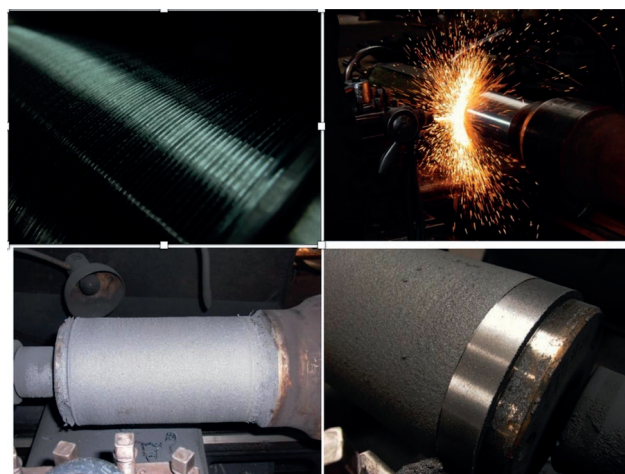
- [1] RASEK J.: *Materiały amorficzne i ich właściwości*, [w:] *W kręgu krystalografii i nauki o materiałach*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2002, s. 207–245.
- [2] RASEK J.: *Kinetyka zjawisk wydzielania i rozpuszczania w roztworach stałych  $\alpha\text{Fe-N/C}$* . Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 1983.
- [3] RASEK J.: *Wybrane zjawiska dyfuzyjne w metalach krystalicznych i amorficznych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2000.



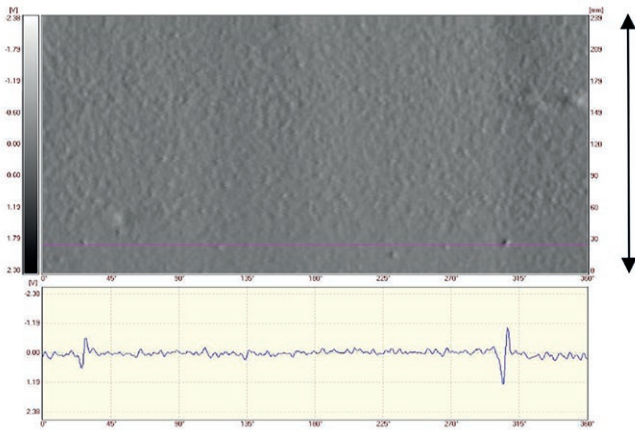
Rys. 32. Obraz rzeczywisty i obraz przetworzony (dla celów defektoskopii) mapy pola magnetycznego wycinka osi



Rys. 33. Przykład wpływu efektu zmiany odległości na czułość detekcji wad



Rys. 34. Czop osi przygotowanie, napyłanie i toczenie po regeneracji



Rys. 35. Mapa powierzchni czopa osi z jednoczesnym podglądem sygnału pomiarowego w wybranym przekroju osi

- [4] BOZORTH R.: *Ferromagnetism M*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Magnetics Society, Sponsor, Inc., New York 1936, An IEEE Press Classic Reissue, Magnetic Society, 1993, 2001.
- [5] KACZKOWSKI Z.: *Równania piezomagnetyczne. Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie*. Praca zbiorowa, PWN, Warszawa 1978, s. 180–192.
- [6] KACZKOWSKI Z.: *Magnetoelastyczność. Materiały piezoceramiczne i ich zastosowanie*. Praca zbiorowa, PWN, Warszawa 1978, s. 211–219.
- [7] BIEŃKOWSKI A.: *Metoda badania magnetoelastycznego zjawiska Villariego w ferrytach*. VI Krajowe Sympozjum Pomiarów Magnetycznych, Komisja Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Katowice 2000,
- [8] BIEŃKOWSKI A.: *Magnetoelastic Villari effect in Mn-Zn ferrites*. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, Vol. 215–216, Netherlands, June 2000.

- [9] HINZ G., VOIGT H.: *Sensors. A comprehensive survey – magnetoelastic sensors*. VACUUMSCHMELZE GmbH, Edited by VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG 1990.
- [10] GUMANIUK M.M.: *Czujniki magnetoelastyczne w automatyce*. WNT, Warszawa 1967.
- [11] MARKUSZEWICZ M., MIERZEJEWSKI A.: *Materiały magnetyczne*. Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze, Katowice 1954.
- [12] ŻUREK Z.H.: *Badania stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ELEKTRYKA z. 196, MONOGRAFIA, s. 1–150, Gliwice 2005.
- [13] ŻUREK Z.H.: *Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych N N507 0807 33*.
- [14] ŻUREK Z.H.: *Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [15] ŻUREK Z.H., DUKA P.: *Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
- [16] ŻUREK Z. H.: *Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów N N510 238538 (raport)*.
- [17] SMITH S.W.: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, 1997–2003.
- [18] Doktorat. Rok: 2008. Tomasz Janeczek, Politechnika Śląska Wydział Transportu.

Tytuł oryginału: Diagnostyka eksploatacyjna kolejowych zestawów kołowych metodą magnetyczną. PROMOTOR Żurek Zbigniew

 Zbigniew Hilary Żurek

reklama

reklama