

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA INŻYNIERIA MECHANICZNA
DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Dorota Jackiewicz

**Ocena stanu naprężeń w ferromagnetycznych elementach
konstrukcyjnych z zastosowaniem zjawiska magnetosprężystego**

Promotor

prof. dr hab. inż. Roman Szewczyk

Promotor pomocniczy

dr hab. inż. Szymon Gontarz, prof. uczelni

WARSZAWA 2023

Streszczenie

Tematem niniejszej pracy jest weryfikacja możliwości wykorzystania zjawiska magnetosprężystego do oceny stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych wykonanych ze stali ferromagnetycznej. Zjawisko magnetosprężyste polega na zmianie charakterystyk magnetycznych materiałów w wyniku działania naprężeń od sił zewnętrznych.

W ramach pracy została opracowana metodyka badania właściwości magnetycznych oraz magnetosprężystych elementów wykonanych ze stali konstrukcyjnych wykorzystująca próbki ramkowe. Zbadano charakterystyki magnetyczne, magnetosprężyste, jak również zbadano wpływ temperatury na charakterystyki magnetyczne wybranych stali. W celu zbadania wpływu czasu i warunków środowiskowych na charakterystyki magnetosprężyste wykonano badania charakterystyki magnetosprężystych próbek po procesie „step cooling”.

Zrealizowane w ramach pracy pomiary eksperymentalne umożliwiły walidację propozycji rozszerzenia modelu Jilesa – Athertona w odniesieniu do opisu procesu magnesowania stali konstrukcyjnych w obecności naprężeń.

W ramach pracy opracowano także metodykę weryfikacji możliwości oceny stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych wykonanych ze stali ferromagnetycznej, w płaskiej kratownicy na kracie trójkątnej w układzie Warrena. Zbadano charakterystyki magnetosprężyste w dwóch konfiguracjach kratownicy. W pierwszej konfiguracji S zastosowano próbki z otworami, gdzie każda próbka miała zamknięty magnetowód. W drugiej konfiguracji M zastosowano próbki bez otworów, a magnetowód został zamknięty przez układ trzech próbek. W układzie tym uzyskano czułość pomiarową przekraczającą 39 mT/kN.

Otrzymane wyniki badań potwierdziły możliwość wykorzystania opracowanej metody w konfiguracji M do oceny stanu naprężeń w ferromagnetycznych elementach konstrukcyjnych. Na podstawie uzyskanych wyników wykonano modelowanie charakterystyk magnetosprężystych.

Badania przeprowadzone w ramach pracy, zarówno z wykorzystaniem próbek okiennych, jak i na modelowych kratownicach, potwierdziły możliwość stosowania opracowanej metody do monitorowania stanu wybranych konstrukcji wykonanych z ferromagnetycznych stali konstrukcyjnych przy czułości pomiarowej przekraczającej 39 mT/kN.

Słowa kluczowe: ocena stanu naprężeń, zjawisko magnetosprężyste, stale konstrukcyjne

Summary

The subject of the thesis is verification of the possibility of application of magnetoelastic effect in assessment of stress condition in structural elements made of ferromagnetic steel. Magnetoelastic effect involves change of magnetic characteristics of ferromagnetic materials under the influence of stress originating from the external force.

The methodology of investigation of magnetic and magnetoelastic properties of elements made of structural steel was developed as a part of the thesis, utilizing frame-shaped samples. The magnetic, magnetoelastic and temperature characteristics of selected structural steels were measured. In order to investigate the influence of time and environmental conditions on the magnetoelastic characteristics, they were measured again after subsection of the magnetoelastic samples to the step cooling process.

Performed experimental measurements allowed validation of the proposed extended Jiles-Atherton model in modeling of the magnetization process in structural steel subjected to external stress.

The verification methodology of stress assessment possibility in structural elements made of ferromagnetic steel was developed for plane Warren truss based on equilateral triangles. The magnetoelastic characteristics were investigated in two configurations of the truss. The first configuration (S-configuration) utilized elements with holes, allowing to obtain closed magnetic circuit in each single element. In the second configuration (M-configuration) full elements were used and the magnetic circuit was made of three elements. The magnetoelastic sensitivity exceeding 39 mT/kN was obtained in the M-configuration.

The obtained results confirmed the possibility of application of the developed M-configuration based methodology in assessment of stress condition in ferromagnetic structural elements. Utilizing the obtained measurement results, the modeling of magnetoelastic characteristics in the truss was performed.

The investigation conducted with both frame-shaped samples and exemplary trusses confirmed the possibility of utilization of developed methodology in assessment of stress condition in selected structures made of ferromagnetic structural steel, with magnetoelastic sensitivity exceeding 39 mT/kN.

Key words: assessment of stress, magnetoelastic effects, construction steels

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Cel i zakres pracy	9
3. Metody oceny stanu naprężeń.....	11
3.1. Metoda tensometryczna	11
3.2. Metody optyczne	13
3.2.1. Metoda światłowodowa	13
3.2.2. Metoda triangulacyjna	16
3.3. Metoda wibrotermograficzna	18
3.4. Metody magnetyczne	19
3.4.1. Metoda magnetyczno-proszkowa	19
3.4.2. Metoda rozproszenia strumienia magnetycznego.....	20
3.4.3. Magnetowizja	21
3.4.4. Metoda prądów wirowych i tomografia wioprowadowa	22
3.4.5. Metoda magnetostrykcyjna.....	24
3.5. Metoda oceny stanu naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkausena	25
3.6. Metoda magnetycznej pamięci metalu	26
3.7. Metoda pomiarów magnetosprężystych.....	27
3.7.1. Metoda jarzmowa	27
3.7.2. Metody wykorzystujące zamknięty obwód magnetyczny badanej konstrukcji	28
3.8. Metoda elektromagnetyczna	30
3.9. Podsumowanie	31
4. Zjawisko magnetosprężyste	34
5. Modele procesu magnesowania	41
5.1. Model Jilesa-Athertona	41
5.2. Model Takacsa	44
5.3. Wpływ naprężeń mechanicznych na tensor względnej przenikalności magnetycznej.....	45
6. Metody identyfikacji parametrów modelu procesu magnesowania	50
7. Przedmiot badań	54
7.1. Właściwości fizykochemiczne i mechaniczne stali X30Cr13.....	54
7.2. Właściwości fizykochemiczne i mechaniczne stali 13CrMo4-5.....	54
8. Metodyka badań.....	56

8.1. Założenia dotyczące metodyki badań	56
8.2. Stanowisko do pomiaru właściwości magnetostrykcyjnych.....	59
8.3. Stanowisko do pomiaru charakterystyk temperaturowych	61
9. Wyniki badań.....	62
9.1. Charakterystyki magnetyczne próbek pierścieniowych.....	63
9.1.1. Wyniki dla stali X30Cr13.....	64
9.1.2. Wyniki dla stali 13CrMo4-5.....	66
9.1.3. Wnioski.....	69
9.2. Charakterystyki magnetyczne próbek ramkowych	70
9.2.1. Wyniki dla stali X30Cr13.....	71
9.2.2. Wyniki dla stali 13CrMo4-5.....	73
9.2.3. Wnioski.....	76
9.3. Charakterystyki magnetostrykcyjne $B(H, \sigma)$ próbek ramkowych.....	77
9.3.1. Wyniki dla stali X30Cr13.....	77
9.3.2. Wyniki dla stali 13CrMo4-5.....	80
9.3.3. Wnioski.....	83
9.4. Charakterystyki temperaturowe $B(T)$ próbek ramkowych	84
9.5. Charakterystyki magnetostrykcyjne $B(H, \sigma)$ próbek ramkowych po procesie „step cooling”	86
9.6. Analiza wyników badań.....	94
10. Możliwości oceny stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych wykonanych ze stali ferromagnetycznej	96
10.1. Wymagania dotyczące weryfikacji	96
10.2. Opracowana metoda testów	96
10.3. Charakterystyki magnetostrykcyjne.....	100
10.3.1. Konfiguracja S kratownicy	100
10.3.2. Konfiguracja M kratownicy.....	103
10.4. Analiza wyników badań.....	110
11. Modelowanie magnetostrykcyjnych charakterystyk stali ferromagnetycznych z zastosowaniem modelu Jilesa-Athertona.....	113
12. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	120
Bibliografia.....	122

1. Wstęp

Badania nieniszczące stalowych elementów konstrukcyjnych znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie, energetyce oraz transporcie: szczególnie w przemyśle lotniczym i morskim [98]. Pomimo intensywnego rozwoju metod badań nieniszczących w okresie ostatnich 120 lat, stosowane aktualnie rozwiązania posiadają liczne ograniczenia i niedogodności.

Pierwsze badania nieniszczące elementów stalowych wiązały się z zastosowaniem w roku 1893 techniki ultradźwiękowej [89]. W badaniach nieniszczących stosowano także, od 1895 roku, promieniowanie rentgenowskie [16]. Jednak zastosowanie metod ultradźwiękowych wiąże się z niedogodnościami związanymi z koniecznością ręcznego pozycjonowania sondy pomiarowej, natomiast zastosowanie promieniowania przenikliwego jest szczególnie niebezpieczne, w przypadku konieczności zastosowania znacznych energii przy badaniu elementów stalowych.

Z tego względu, od wczesnych lat trzydziestych dwudziestego wieku [98], w przemyśle stosowane są szeroko magnetyczne metody badań nieniszczących. Metody te są całkowicie bezpieczne dla operatora. Ponadto większość metod magnetycznych umożliwia badanie bezkontaktowe [71], [94], co jest szczególnie korzystne w przypadku systemów automatycznych, które zmniejszają konieczność zaangażowania operatora w proces badań nieniszczących.

Jednak należy podkreślić, że stosowane w przemyśle badania nieniszczące koncentrują się na detekcji nieciągłości na ograniczonym obszarze. Dotyczy to zarówno nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych (metody z zastosowaniem prószków magnetycznych [70], [83], metoda detekcji rozproszenia strumienia magnetycznego [70], [83], metoda prądów wirowych [70], [72]). Jedynie metody tomografii wiroprowodowej umożliwiają ocenę rozkładu nieciągłości pod powierzchnią większego obszaru – pojedynczego przekroju elementu konstrukcyjnego [93]. Jednak wymagają one skomplikowanego układu pomiarowego oraz dużej mocy obliczeniowej, niezbędnej do przeprowadzenia przekształcenia odwrotnego, umożliwiającego odtworzenie rozkładu nieciągłości w badanym przekroju elementu konstrukcyjnego [79].

Opisanych powyżej niedogodności pozwala uniknąć zastosowanie metody z wykorzystaniem zjawiska magnetosprężystego. W metodzie tej wykorzystywane jest zjawisko zmiany przenikalności magnetycznej materiału ferromagnetycznego pod wpływem naprężeń mechanicznych [9]. W rezultacie metoda ta umożliwia nie tylko detekcję

nieciągłości (pęknięć) elementu konstrukcyjnego, lecz także ocenę rozkładu naprężeń mechanicznych w materiale. Ponadto, ze względu na szerokie możliwości umieszczenia uzwojeń magnesujących i pomiarowych, przy zastosowaniu metody z wykorzystaniem zjawiska magnetosprężystego można przeprowadzić ocenę stanu naprężeń w elemencie konstrukcyjnym w sposób, który uwzględnia jego cechy funkcjonalne, takie jak sposób przenoszenia obciążeń lub miejsca potencjalnych spiętrzeń naprężeń. Z tego względu, metoda z wykorzystaniem zjawiska magnetosprężystego jest szczególnie atrakcyjna do zastosowania w badaniach nieniszczących przemysłowych elementów konstrukcyjnych, zarówno kratownic [19], [82] jak i elementów maszyn wykonanych ze stali ferromagnetycznych [30].

Główną przeszkodą w zastosowaniu metody z wykorzystaniem zjawiska magnetosprężystego do badań ferromagnetycznych jest brak zarówno ilościowej informacji w zakresie magnetosprężystych charakterystyk stali konstrukcyjnych, jak i ograniczone możliwości modelowego opisu wpływu naprężeń mechanicznych na przenikalność magnetyczną zróżnicowanych typów stali. W niniejszej pracy podjęto próbę uzupełnienia stanu wiedzy, który umożliwi szersze zastosowanie metody z wykorzystaniem zjawiska magnetosprężystego w badaniach nieniszczących. W pracy przedstawiono uniwersalną metodę wyznaczania magnetosprężystych charakterystyk stali konstrukcyjnych, jak również rozwinięcie modelu Jilesa–Athertona uwzględniające wpływ anizotropii naprężeń na charakterystyki magnesowania stali. Umożliwia to zarówno eksperymentalne wyznaczenie wpływu naprężeń na charakterystyki magnesowania elementów z różnych typów ferromagnetycznych stali konstrukcyjnych, jak również przewidzenie wpływu naprężeń na charakterystykę magnesowania w odniesieniu do specyficznych wartości naprężeń i natężenia pola magnesującego stal. Opracowane rozwiązania zweryfikowano w odniesieniu do przykładowej konstrukcji kratownicy stalowej, poddanej działaniu obciążeń zbliżonych do obciążeń w warunkach rzeczywistych.

Opracowana metoda pomiarów i badania stanu materiału konstrukcji umożliwia szerokie stosowanie w zakresie inżynierii lądowej, jak również w badaniach innych konstrukcji takich jak badania na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego, badania konstrukcji morskich czy wybrane badania urządzeń inżynierii biomedycznej.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest weryfikacja możliwości wykorzystania zjawiska magnetosprężystego do oceny stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych wykonanych ze stali ferromagnetycznej. Bezpośrednio z celem pracy wiąże się teza pracy: ocena stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych wykonanych ze stali ferromagnetycznej może być zrealizowana z wykorzystaniem zjawiska magnetosprężystego.

W ramach pracy została opracowana metoda badania właściwości magnetycznych oraz magnetosprężystych elementów wykonanych ze stali konstrukcyjnych wykorzystująca próbki ramkowe. Wytypowano materiały do badań oraz wykonano badania właściwości magnetycznych i magnetosprężystych w tych materiałach. Wyznaczono:

- pętle histerezy magnetycznej $B(H)$ wybranych stali,
- wpływ maksymalnej wartości pola magnesującego H_m na wartość maksymalnej indukcji magnetycznej B_m (charakterystyki $B_m(H_m)$),
- wpływ maksymalnej wartości pola magnesującego H_m na wartości przenikalności μ (charakterystyki $\mu(H_m)$),
- wpływ wartości pola magnesującego H na indukcję magnetyczną B przy ustalonych wartościach zadanych naprężeń mechanicznych σ (pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$),
- wpływ wartości naprężeń σ na wartości indukcji magnetycznej B przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m (charakterystyki $B(\sigma)_{H_m}$),
- wpływ wartości naprężeń σ na wartości przenikalności μ przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m (charakterystyki $\mu(\sigma)_{H_m}$),
- wpływ wartości temperatury T na wartości maksymalnej indukcji magnetycznej B_m przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m (charakterystyki $B_m(T)_{H_m}$),

W celu zbadania wpływu czasu i warunków środowiskowych na charakterystyki magnetosprężyste wykonano proces „step cooling” dla próbek ramkowych z wybranego materiału. Wyznaczono:

- wpływ wartości pola magnesującego H na indukcję magnetyczną B przy ustalonych wartościach zadanych naprężeń mechanicznych σ (pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$) po procesie „step cooling”,
- wpływ wartości naprężeń σ na wartości indukcji magnetycznej B przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m (charakterystyki $B(\sigma)_{H_m}$) po procesie „step cooling”.

Pomiary eksperymentalne umożliwiły walidację propozycji rozszerzenia modelu Jilesa – Athertona w odniesieniu do opisu procesu ` stali konstrukcyjnych w obecności naprężeń. W rozszerzonym modelu uwzględniono wpływ energii anizotropii spowodowanej naprężeniami mechanicznymi na kształt krzywej bezhisterezy oraz na kształt pętli histerezy magnetycznej w stalach ferromagnetycznych.

W celu potwierdzenia tezy pracy, zweryfikowano możliwość oceny stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych wykonanych ze stali ferromagnetycznej w płaskiej kratownicy na kracie trójkątnej w układzie kratownicy Warrena [13]. Wyznaczono:

- wpływ wartości pola magnesującego H na indukcję magnetyczną B przy ustalonych wartościach zadanych naprężeń mechanicznych σ (pętla histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$),
- wpływ wartości naprężeń σ na wartości indukcji magnetycznej B_m przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m (charakterystyki $B_m(\sigma)_{H_m}$).

Zakres zrealizowanych prac umożliwił weryfikację tezy rozprawy doktorskiej oraz umożliwił poszerzenie stanu wiedzy w zakresie wykorzystania zjawiska magnetosprężystego do nieniszczących badań elementów ferromagnetycznych.

3. Metody oceny stanu naprężeń

Ocena stanu naprężeń konstrukcji, w uproszeniu monitorowanie stanu konstrukcji, to połączenie sieci pomiarowych wyposażonych w urządzenia pomiarowe i wykonawcze, sensory i akulatory, z zaawansowanymi centrami przetwarzania danych w celu uzyskania informacji o stanie konstrukcji. Monitorowanie stanu konstrukcji wykonuje się w celu wykrycia, zlokalizowania oraz ocenie wielkości uszkodzenia lub wykrycia możliwości potencjalnego uszkodzenia konstrukcji [114]. Dotychczasowe rozwiązania bazują na rozbudowanych systemach czujników oraz złożonej analizie sygnałów. Jest to spowodowane tym, że wszelkiego typu źródła potencjalnych uszkodzeń konstrukcji, w pierwszym etapie, wykazują niewielki wpływ na układ pomiarowy. Drugim czynnikiem wpływającym na jakość systemu monitorowania jest liczba punktów pomiarowych. Są to systemy kosztowne, przez co liczba punktów jest ograniczona. Są one najczęściej rozłożone w najbardziej newralgicznych miejscach konstrukcji, w miejscach spodziewanych uszkodzeń.

Ważnym czynnikiem wpływającym na zastosowanie systemu oceny naprężeń jest specyfika konstrukcji. Ma na to wpływ zarówno sama konstrukcja, jak i jej położenie, narażenie na wpływ czynników a w znaczącej mierze materiał zastosowany do wykonania konstrukcji. Wpływa to zarówno na dobór metody diagnozowania uszkodzeń, jak i na sposób przetwarzania danych pomiarowych.

3.1. Metoda tensometryczna

Wśród metod stosowanych do oceny stanu naprężeń konstrukcji jedną z pierwszych metod była metoda tensometryczna. Metoda ta wzięła swój początek od czujników sił i momentów skręcających powszechnie stosowanych w przemyśle. Do pomiarów naprężeń w konstrukcji zastosowano analogiczny system jak w czujnikach siły. Na element ulegający odkształceniu naklejony jest tensometr, który pod wpływem odkształcenia zmienia swoją rezystancję [12], [119]. Schematyczną metodę pomiaru przedstawiono na rysunku 3.1.

Tensometry są czujnikami służącymi do pomiaru odkształceń. W wyniku zmiany swojej długości zmieniają się ich rezystywność, a przez co rezystancja.

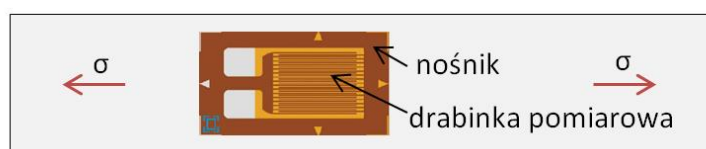
Zjawisko to ma miejsce zarówno dla dodatniej jak i dla ujemnej zmiany wymiarów tensometru. Zmiany te opisuje zależność (3.1) [65]:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.1)$$

gdzie ρ – jest opornością właściwą materiału przewodnika, L – jest długością przewodnika, A – jest polem przekroju poprzecznego przewodnika.

Obecnie najczęściej spotykanymi rodzajami tensometrów oporowych są tensometry metalowe oraz tensometry półprzewodnikowe [65].

Tensometry metalowe zbudowane są zazwyczaj z folii metalowej naniesionej na podłoże elastyczne oraz z warstwy zabezpieczającej. Największymi zaletami tych tensometrów jest bardzo dobrze opracowana technologia i wysoka powtarzalność. Z kolei ich wadą jest niewielka czułość.



Rys. 3.1. Schemat metody pomiaru naprężeń przy pomocy tensometru [109].

Tensometry półprzewodnikowe są wykonane najczęściej z monokryształów germanu lub krzemu [111] w postaci pręcika, do naklejania, lub też wykonane w badanej konstrukcji. Zaletą tensometrów półprzewodnikowych, w porównaniu z klasycznymi, jest nawet pięćdziesięciokrotnie większa czułość odkształceniowa. Natomiast wadą są ich właściwości mechaniczne: kruchość oraz niska odporność na uszkodzenia mechaniczne. Kolejną wadą tensometrów półprzewodnikowych jest znaczny wpływ temperatury na ich rezystancję, co skutkuje koniecznością kompensacji temperaturowej [65].

Zaletą czujników tensometrycznych jest łatwość montażu, prosta konstrukcja oraz czułość pozwalająca uzyskać dość dobrą rozdzielczość pomiarową. Natomiast do wad tych czujników należy zaliczyć znaczący wpływ temperatury, w szczególności w odniesieniu do tensometrów półprzewodnikowych. Również konieczność ich naklejania wymaga zastosowania kleju, który wykazuje zjawisko płynięcia. W przypadku pomiarów dynamicznych jest to zjawisko pomijalne, natomiast w pomiarach statycznych jest ono bardzo niekorzystne, ponieważ utrudnia rejestrację zmian wolnozmiennych.

3.2. Metody optyczne

3.2.1. Metoda światłowodowa

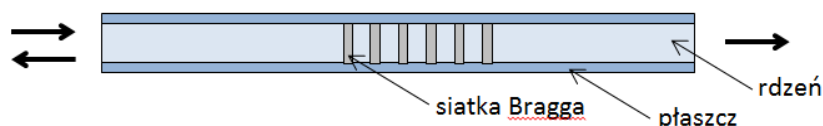
W metodzie tej wykorzystuje się czujniki światłowodowe [31], [118]. Czujniki światłowodowe do zastosowań w monitoringu stanu konstrukcji są swoją budową zbliżone do światłowodów stosowanych w telekomunikacji. Jednak w porównaniu do światłowodów telekomunikacyjnych takie czujniki wymagają pewnej modyfikacji w postaci pokrycia z materiałów o wysokiej przyczepności oraz wysokim współczynniku tarcia. Dzięki tej modyfikacji czujniki światłowodowe tego typu nie ślizgają się w miejscach montażu, a w rezultacie odkształcają się wraz z monitorowaną konstrukcją.

Wśród czujników światłowodowych wyróżniamy 4 główne typy, obecnie stosowane do monitorowania konstrukcji:

- czujniki siatkowe Bragga (FBG – Fiber Bragg Grating),
- czujniki interferometryczne Fabry–Perot (EFPI – Extrinsic Fabry–Perot Interferometer),
- czujniki SOFO (Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques),
- czujniki wykorzystujące rozproszenie Brillouina światła w światłowodzie (np. DiTeST – firmy SMARTTEC, DTSS – firmy Sensornet).

Dwa pierwsze typy czujników, czujniki FBG i EFPI, ze względu na swoją zasadę działania oraz krótką bazę pomiarową, są stosowane do pomiarów lokalnych wartości odkształceń np. do elementów kratownic czy też lin [118].

Pod względem budowy czujniki światłowodowe wykazują różnice pomiędzy sobą. W odniesieniu do czujników FBG w ich rdzeniu światłowodu znajduje się siatka Bragga. Na rysunku 3.2 przedstawiono zasadę działania czujnika Bragga.

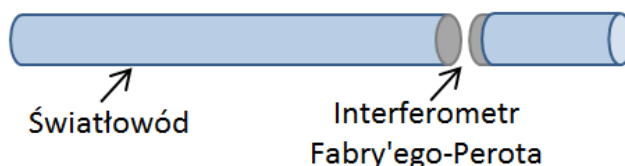


Rys. 3.2. Schemat działania czujnika Bragga [61].

W wyniku odkształcenia czujnika FBG zostaje odkształcona siatka Bragga co wpływa na zmianę jej okresu, a zatem odbijanie innej długości fali światła. Pomiar odkształcenia w tego typu czujnikach polega na pomiarze zmiany długości fali świetlnej odbitej od filtra – siatki Bragga. Pewną wadą tych czujników jest to, że na wskazanie, oprócz odkształceń

mechanicznych, wpływa również odkształcenie cieplne, a zatem temperatura może zaburzyć pomiary.

Natomiast w czujnikach EFPI w rurce są umieszczone, współosiowo względem siebie, dwa odcinki światłowodu. Na rysunku 3.3 przedstawiono budowę czujnika EFPI.

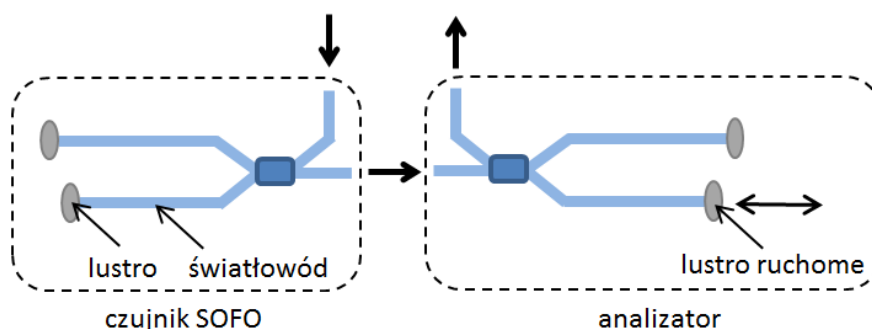


Rys. 3.3. Schemat działania czujnika EFPI [95].

W czujnikach światłowodowych do oświetlania stosowane jest źródło światła białego. Na końcach światłowodów wytwarzane jest pokrycie w postaci warstwy lustrzanej. Taki układ współosiowych światłowodów z pokryciem lustrzanym odbija światło o długości fali zależnej od odległości końców – luster. Jest to miniaturowy interferometr Fabry–Perota [95]. W wyniku odkształcenia światłowodu ulega zmianie odległość luster na końcówkach światłowodów, a zatem zmienia się długość fali odbitej. Również w tym typie czujników występuje zaburzenie pomiaru odkształcenia na skutek odkształceń termicznych.

Czujniki typu SOFO charakteryzują się długą bazą pomiarową. Dla tego typu czujników jest to zazwyczaj od 2 m do 30 m. Czujniki tego typu, z racji swojej budowy, uśredniają wartość mierzonego odkształcenia elementów np. przęseł, filarów czy kotew [35].

Do budowy czujników SOFO stosuje się dwa równoległe światłowody o bardzo zbliżonych długościach. Przy czym jeden jest poddany niewielkiemu naprężeniu, natomiast drugi jest umieszczony swobodnie. Podobnie jak w czujnikach EFPI, na końcach światłowodów wytworzone jest pokrycie lustrzane odbijające światło. Drugimi końcami światłowody przyłączone są do wspólnego światłowodu, w ten sposób tworzone są dwa ramiona interferometru Michelsona. Fala świetlna wysłana do czujnika jest rozdzielana na dwie fale biegnące w światłowodzie napiętym i swobodnym. Po dotarciu do końców światłowodów fale zostają odbite od luster i wracają z przesunięciem wynikającym z różnicy długości światłowodów. W tym typie czujnika odkształcenie wpływa na różnicę długości dróg optycznych, co obserwowane jest w postaci przesunięcia fal. Pomiar tych przesunięć wykonywany jest przy zastosowaniu drugiego interferometru Michelsona umieszczonego w analizatorze sygnału [95]. Schematyczną budowę przedstawiono na rysunku 3.4.



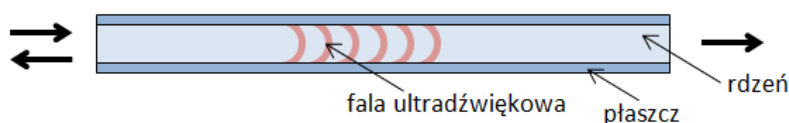
Rys. 3.4. Schemat systemu SOFO [95].

Różnice długości dróg optycznych powstałych w czujniku można skompensować poprzez przesunięcie lustra analizatora. Odształcenie mechaniczne czujnika wpływa na zmianę długości światłowodu poddanego naprężeniu i ta zmiana jest mierzona. Natomiast drugi światłowód swobodny jest zastosowany w celu kompensacji wpływu termicznego na wskazania czujnika.

Ostatnim typem czujników światłowodowych są czujniki DiTeST i DTSS, określane często mianem czujników rozłożonych. Nie mają określonego konkretnie zakresu pomiarowego, jak miało to miejsce w czujnikach FBG i EFPI oraz SOFO. W tym typie czujników jeden światłowód jest w stanie zastąpić nawet 30 000 pojedynczych czujników. Głównym ich zakresem stosowania jest monitoring dużych konstrukcji budowlanych takich jak zapory wodne, rurociągi, drogi, mosty czy też zbiorniki paliw płynnych [56] [63].

Spośród wszystkich typów czujników, czujniki DiTeST i DTSS charakteryzują się najbardziej złożoną zasadą działania. W wyniku zadania do światłowodu impulsu laserowego o dużej mocy, w rdzeniu światłowodu generowana jest fala ultradźwiękowa. Fala ultradźwiękowa rozchodząc się po światłowodzie wywołuje lokalne zmiany naprężeń rdzenia światłowodu, a w konsekwencji zmianę współczynnika załamania światła. Taka lokalna zmiana współczynnika załamania może być traktowana jako siatka Bragga przesuwająca się w światłowodzie wraz z falą ultradźwiękową. Prędkość z jaką się przesuwa jest zależna od własności mechanicznych materiału, z którego wykonany jest rdzeń światłowodu, od odkształceń wynikających z naprężeń od sił zewnętrznych oraz od odkształceń termicznych. Do pomiaru prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej zastosowano zjawisko Dopplera. Do rdzenia światłowodu wprowadzana jest druga fala świetlna, generowana przez analizator, która odbija się od przesuwającej się z falą ultradźwiękową „siatki Bragga” i wraca do analizatora jako fala o częstotliwości przesuniętej względem częstotliwości generowanej

przez analizator. Na rysunku 3.5 przedstawiono schematycznie zasadę działania tego typu czujnika.



Rys. 3.5. Schemat działania czujnika DiTeST [95].

Na wskazanie czujnika DiTeST ma wpływ odkształcenie powstałe w wyniku sił mechanicznych jak również odkształcenie powstałe na skutek oddziaływania termicznego.

Czujniki światłowodowe w zastosowaniach do monitorowania konstrukcji budynków mają szereg zalet [31] [35] [63] [118]. Umożliwiają pomiar odkształceń konstrukcji lokalnie jak również na dużym obszarze w całości konstrukcji. Ich pewnym mankamentem jest konieczność wykonania mocowań poprzez klejenie, zgrzewanie czy też mocowania przez śruby. Takie mocowanie musi być bardzo staranne, gdyż od niego zależy niezawodność pomiarów. Drugą niedogodnością jest wpływ temperatury na wskazania czujników. Jest to kłopotliwe w przypadku czujników wystawionych na działanie zmiennych warunków atmosferycznych często występujących w trakcie monitorowania konstrukcji.

3.2.2. Metoda triangulacyjna

Wśród metod stosowanych do monitorowania konstrukcji budynku należy wymienić metodę skanowania 3D [75]. Metoda ta jest związana z pomiarami odległości charakterystycznych punktów konstrukcji od założonych punktów bazowych. Punkty charakterystyczne, często zwane krytycznymi, wyznaczone są w wyniku analizy wytrzymałościowej konstrukcji budynku. Pomiary mogą być wykonywane metodami stykowymi lub bezstykowymi.

Metody pomiarów stykowych mają bardzo ograniczone zastosowanie ze względu na możliwość pomiaru tylko małych odległości. Natomiast metody bezstykowe mają znaczącą przewagę ze względu na możliwość pomiaru nawet znacznych odległości. Głównymi metodami stosowanymi w tego typu pomiarach są metody optyczne. Do tych metod jest zaliczana metoda triangulacyjna polegająca na odbiciu światła od badanego obiektu i precyzyjnym pomiarze jego geometrii przy pomocy detektora.

Triangulacja jest metodą pomiaru odległości przy użyciu dalmierza optycznego. Obecnie jest to najczęściej dalmierz laserowy. Budowa takiego dalmierza jest złożona ze źródła światła, lasera będącego nadajnikiem oraz odbiornika, najczęściej matrycy CCD lub linijki CCD wyposażonej w obiektyw. Zarówno położenie nadajnika jak i obiektywu są dokładnie wyznaczone względem siebie oraz ich osie optyczne są równoległe. W stałej odległości od nadajnika znajduje się odbiornik, odległość ta jest nazywana odległością bazową lub bazą. Wiązka światła laserowego pada na przedmiot oddalony od nadajnika i po odbiciu pada na obiektyw odbiornika z detektorem CCD. Odległość nadajnika od obiektu wyznaczana jest z zależności (3.2):

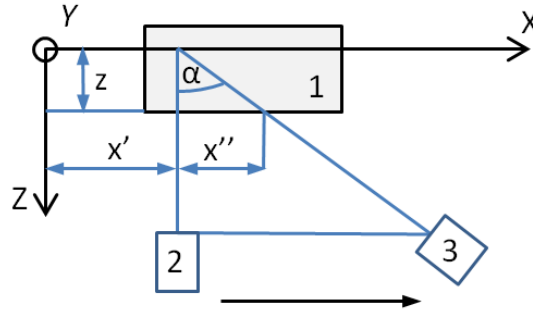
$$x = \frac{a}{\frac{dx}{f} + \frac{1}{\tan \alpha}} \quad (3.2)$$

gdzie x – odległość od przedmiotu, a – baza dalmierza, f – ogniskowa obiektywu matrycy CCD, α – kąt nachylenia nadajnika, dx – miejsce padania wiązki światła na detektor CCD.

Pomiary mogą być wykonywane w dwóch wariantach: pierwszy – nieruchome źródło światła i nieruchoma kamera, drugi – źródło światła przemieszczane wraz z kamerą. Pierwszy wariant występuje gdy źródło światła laserowego jest w ustalonym miejscu i skanowanie następuje w wyniku przesuwania wiązki po obiekcie. Wymagane jest dokładne określenie położenia źródła światła laserowego i położenie kamery. Podczas pomiaru rejestrowana jest zmiana położenia plamki lub linii światła laserowego oraz następuje precyzyjny pomiar kątów pod jakimi wysyłana jest wiązka laserowa. Jednym z rozwiązań jest platforma obrotowa ze źródłem światła w postaci linii i kamerą ustawioną obok. W wyniku obrotu platformy oświetlany jest cały obszar i rejestrowane są punkty pomiarowe.

Innym rozwiązaniem jest zastosowanie dalmierza laserowego umieszczonego na głowicy skanującej. Głowica jest umieszczona na platformie nieruchomej względem obiektu. Natomiast sama głowica wykonuje ruch obrotowy w dwu osiach: pionowej i poziomej. Poprzez pomiar kątów obrotu oraz pomiar odległości, pomiędzy głowicą i punktami pomiarowymi, uzyskuje się pomiar położenia tych punktów. Wykonując pomiary w określonych odstępach czasu można mierzyć odkształcenia konstrukcji.

Alternatywna metoda polega na przesuwaniu układu pomiarowego – źródła światła i kamery wzdłuż całej konstrukcji oraz na rejestrowaniu dokładnego położenia układu. Wynikiem pomiarów jest położenie punktów w przestrzeni. Metoda ta jest stosowana sporadycznie w monitorowaniu konstrukcji ze względu na występowanie elementów ruchomych. Na rysunku 3.6 przedstawiono schematycznie jej działanie.



Rys. 3.6. Schemat skanera trójwymiarowego mierzącego obiekt [75].

Metody monitorowania konstrukcji z zastosowaniem skanowania 3D triangulacyjnego mają szereg zalet takich jak precyzja pomiaru oraz pomiar realizowany bezstykowo. Jednak ich zastosowanie jest ograniczone do konstrukcji, gdzie możliwy jest bezpośredni dostęp do obszaru pomiarowego. W przypadku bardziej skomplikowanych konstrukcji, gdzie elementy mogą się nawzajem zasłaniać bądź też są całkowicie zabudowane, tego typu metody są utrudnione.

3.3. Metoda wibrotermograficzna

W metodzie wibrotermograficznej na skutek wymuszenia naprężeń poprzez rozchodzącą się falę ultradźwiękową, w miejscach defektów, które są zarodkiem poważniejszych uszkodzeń konstrukcji, następuje podniesienie temperatury [114]. Taki lokalny wzrost temperatury może być mierzony przy pomocy kamery termowizyjnej. W wyniku analizy rozkładu temperatury na powierzchni konstrukcji można wnioskować o ewentualnych uszkodzeniach lub źródłach uszkodzenia. Metoda ta zakłada, że wzrost temperatury jest dynamiczny i opisuje go zależność (3.3):

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho C_p} T \Delta \sigma = K_m T \Delta \sigma \quad (3.3)$$

gdzie α – współczynnik rozszerzalności cieplnej, ρ – gęstość, C_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, T – temperatura badanego ciała, $\Delta \sigma$ – zmiana naprężeń głównych, K_m – współczynnik termosprężystości.

Przedstawiona metoda bazuje na zmianach gradientowych temperatury i po wykonaniu szeregu pomiarów i procesie analizy zmian temperatury, następuje ocena występowania defektów [85].

Zaletą tej metody jest uzyskiwanie informacji o defektach obiektu na poziomie zmian mikrostruktury, czyli na poziomie bardzo wczesnych zmian [2]. W efekcie można przewidzieć ewentualne uszkodzenie i jemu zapobiec. Główną wadą tej metody jest jej okresowość czyli wykonywanie badań, a następnie proces analizy i wnioskowania. Drugą wadą jest konieczność wprowadzania dodatkowych naprężeń do konstrukcji w celu wymuszenia zmian termicznych.

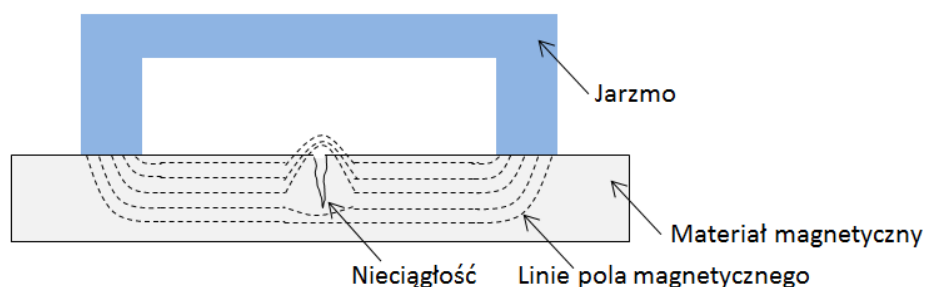
3.4. Metody magnetyczne

3.4.1. Metoda magnetyczno–proszkowa

Metoda magnetyczno–proszkowa jest jedną z metod magnetycznych i jedną z bardziej znanych i powszechnie stosowanych metod wykrywania nieciągłości w badaniach nieniszczących [71], [83]. Polega ona na poddaniu badanego elementu ferromagnetycznego działaniu pola magnetycznego, powodującego gromadzenie się aplikowanych drobinek materiału magnetycznego w miejscach występowania nieciągłości materiału. Strumień magnetyczny w elemencie natrafiając na nieciągłość, ma tendencję do wypływania na zewnątrz materiału, co zaburza pole magnetyczne na jego powierzchni.

Istnieje wiele metod wprowadzania pola (strumienia) magnetycznego do badanego elementu. Strumień magnetyczny można wprowadzić poprzez przyłożenie do elementu magnesów stałych. Zapewnia to na dużą mobilność badań tą metodą.

Kolejną metodą wprowadzenia pola magnetycznego do elementu jest przyłożenie do niego jarzma magnetycznego. Jarzma to najczęściej elementy wykonane z materiałów magnetycznie miękkich z uzwojeniem. Prąd płynący przez uzwojenie generuje strumień magnetyczny w elementach. W zależności od rodzaju prądu możemy uzyskać strumień stały, zmienny lub przemienny. Jarzma zamknięte dają znacznie większą gęstość strumienia magnetycznego przy tym samym uzwojeniu i prądzie niż jarzma otwarte. Daje to większe możliwości wykrywania nieciągłości w przeciwieństwie do strumienia stałego uzyskiwanego z magnesów stałych. Przykładowe stanowisko do badań metodą magnetyczno–proszkową z wykorzystaniem jarzma zostało przedstawione na rysunku 3.7.



Rys. 3.7. Schemat pomiaru metodą magnetyczno-proszkową przy wykorzystaniu jarzma [70].

Następną metodą wprowadzania strumienia magnetycznego do elementu jest wymuszenie przepływu prądu przez element i wytworzenie w ten sposób pola magnetycznego. W zależności od rodzaju prądu uzyskujemy strumień magnetyczny stały, zmienny lub przemienny. Zaletą tej metody jest wykrywanie nieciągłości usytuowanych wzdłuż kierunku przepływu prądu. Wadą jest wartość natężenia prądu jaki musi przepłynąć przez element, aby wytworzyć odpowiednią wartość strumienia magnetycznego wynoszącą kilka lub kilkanaście tysięcy amperów. Ta cecha powoduje, że jest to metoda stacjonarna.

Ostatnią z metod jest metoda indukowania prądu lub strumienia pola magnetycznego w badanym elemencie przez cewki zewnętrzne, stałe lub formowane. Takie rozwiązanie ma wiele zalet, ponieważ w zależności od potrzeb, możemy dowolnie uformować cewki.

Kolejnym etapem badania jest wykrycie nieciągłości poprzez aplikację drobin proszku ferromagnetycznego. Proszek może być aplikowany w postaci suchej (pył) lub mokrej (zawiesina). Obie metody mają swoje zalety i wady w zależności od metody wprowadzania pola magnetycznego oraz wymaganej czułości wykrywania nieciągłości.

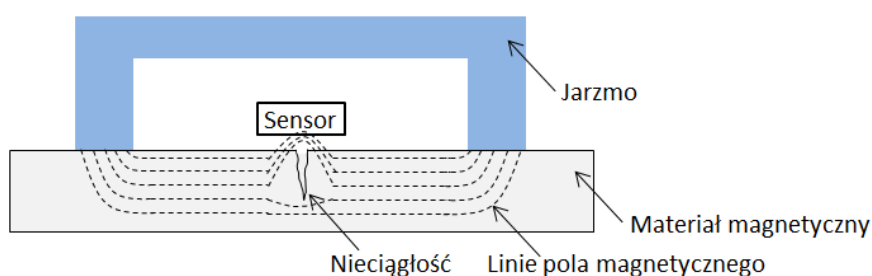
Metoda magnetyczno-proszkowa ma kilka ograniczeń. Pierwszym jest usytuowanie nieciągłości względem kierunku przepływu strumienia magnetycznego. Tylko nieciągłości usytuowane poprzecznie do tego kierunku są wykrywane. Najkorzystniejsze usytuowanie jest prostopadłe do kierunku strumienia. Za graniczne usytuowanie przyjmuje się kąt 45 stopni.

Istotnym ograniczeniem tej metody w wykrywaniu nieciągłości jest głębokość położenia nieciągłości. Maksymalna głębokość wykrywania nieciągłości dla strumienia stałego to 3 mm a dla zmiennego lub przemiennego to 2 mm.

3.4.2. Metoda rozproszenia strumienia magnetycznego

Metoda rozproszenia strumienia magnetycznego (ang. Magnetic flux leakage – MFL) jest wariantem metody magnetycznej [26], [77]. Tak samo jak w metodzie magnetyczno-

proszkowej wytwarzany jest strumień magnetyczny płynący przez badany element. Różnicą jest metoda wykrywania rozproszenia strumienia magnetycznego. W metodzie magnetyczno–proszkowej jest to proszek ferromagnetyczny a w metodzie rozproszenia strumienia magnetycznego są to przetworniki do pomiaru pola magnetycznego. Najczęściej stosowane są czujniki o niewielkich rozmiarach np. halotronowe, czujniki indukcyjne oraz magnetorezystancyjne. W tej metodzie czujnik jest przytwierdzony do jarzma z zamkniętym magnetowodem przedstawionym na rysunku 3.8.

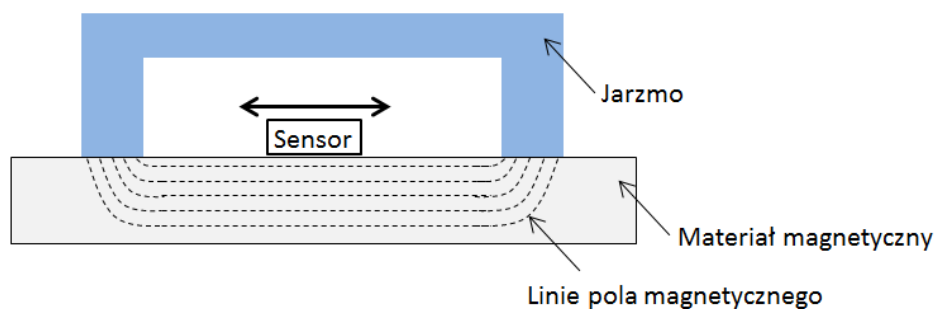


Rys. 3.8. Schemat pomiaru metodą rozproszenia strumienia magnetycznego [26].

3.4.3. Magnetowizja

Magnetowizja jest to pomiar indukcji na powierzchni elementu w wielu punktach, czyli skanowanie i tworzenie mapy rozkładu indukcji na powierzchni elementu [80], [112]. Schemat metody pomiaru przedstawiono na rysunku 3.9. Metoda ta jest stosowana wyłącznie do badania materiałów ferromagnetycznych. Główne zastosowanie magnetowizji to wykrywanie nieciągłości poprzez lokalizację obszaru, w którym wartość indukcji wzrasta na skutek wpływu strumienia. Drugim zastosowaniem metody jest detekcja elementów lub obszarów ferromagnetycznych w obrębie nieferromagnetycznego tła np. wykrywanie min czy wykrywanie zmian struktury i składu materiału badanego elementu. Poszczególne odmiany metody różnią się metodą skanowania powierzchni oraz metodą pomiaru indukcji. Do pomiarów mogą być zastosowane różnego rodzaju czujniki np. hallotronowy czy magnetorezystancyjny o czułości umożliwiającej uzyskanie zakładanego efektu. Pomiar może być wykonywany w trakcie magnesowania elementu (w polu pełnym) albo po magnesowaniu (w polu resztkowym). Pomiar w pełnym polu jest zazwyczaj stosowany w wykrywaniu nieciągłości elementów, ponieważ w tym wypadku pole wyciekające z materiału daje silne i dobrze widoczne wskazania [112]. Natomiast pomiar w polu resztkowym jest

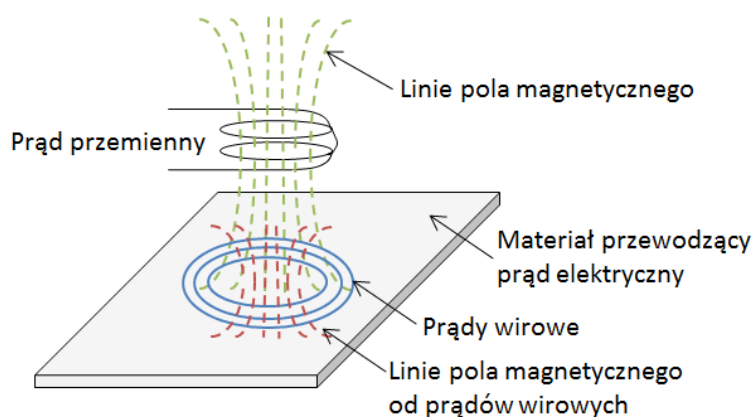
charakterystyczny dla wykrywania elementów ferromagnetycznych i obszarów o odmiennym stanie namagnesowania [80].



Rys. 3.9. Schemat pomiaru metodą magnetowizji [112].

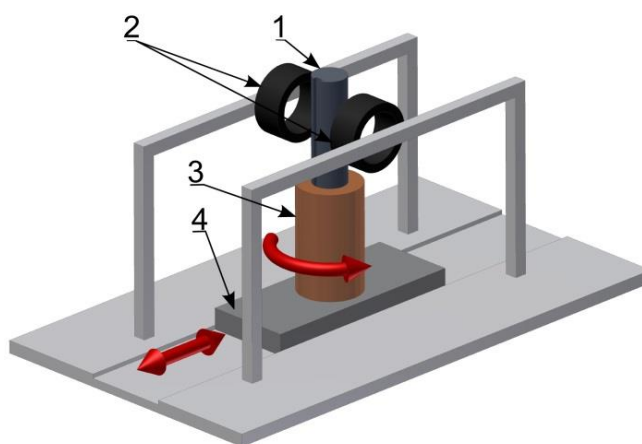
3.4.4. Metoda prądów wirowych i tomografia wiroprowodowa

Metoda prądów wirowych jest jedną z metod badań nieniszczących stosowanych do wykrywania nieciągłości powierzchniowych [28], [71], [72]. Umożliwia wykrywanie nawet dość drobnych defektów na powierzchni materiałów, jak również stosunkowo dużych defektów podpowierzchniowych. Prądy wirowe mogą być generowane jedynie w materiałach przewodzących prąd elektryczny. Indukowane są poprzez zewnętrzne pole magnetyczne i tworzą okręgi rozchodzące się od punktu przyłożenia cewki generującej zewnętrzne pole magnetyczne. Sygnałem zwrotnym jest pole magnetyczne generowane przez prądy wirowe. Metoda ta jest stosowana w badaniach nieniszczących, głównie do wykrywania nieciągłości, ale również może być stosowana do pomiaru przewodności oraz do pomiaru naprężeń, ponieważ każda nieciągłość, zmiana struktury czy naprężeń wpływa na sygnał. Analiza parametrów sygnału daje szereg informacji o badanej powierzchni. Na rysunku 3.10 przedstawiono ideę badania metodą prądów wirowych [28].



Rys. 3.10. Schemat metody prądów wirowych [28].

Pewną odmianą badań wiroprowodowych jest tomografia wiroprowodowa [79], [84], [93], [96] przedstawiona na rysunku 3.11. Łączy ona zalety tomografii rentgenowskiej z bezpieczeństwem jakie zapewniają badania wiroprowodowe. Tomografia wiroprowodowa wykorzystuje zmiany parametrów strumienia magnetycznego przy przejściu przez badany element. W zależności od kształtu i materiału z jakiego wykonany jest dany element następuje zmiana amplitudy oraz fazy strumienia magnetycznego w wyniku strat i oddziaływania z materiałem elementu. W trakcie badania element jest obracany wokół własnej osi i przesuwany między dwoma cewkami, nadawczą i odbiorczą. Metoda ta ma zastosowanie jedynie do materiałów ferromagnetycznych oraz przewodzących materiałów niemagnetycznych.



Rys. 3.11. Schemat pomiaru z wykorzystaniem tomografii wiroprowodowej: 1 – element, 2 – cewki, 3 – moduł obrotu elementu, 4 – moduł przesuwu elementu [93].

3.4.5. Metoda magnetostrykcyjna

Metoda magnetostrykcyjna umożliwia badania materiałów w wyniku analizy rozchodzenia się fal sprężystych [51], [114]. W tej metodzie fala mechaniczna generowana jest w wyniku działania efektu magnetostrykcyjnego. W metodzie magnetostrykcyjnej badania prowadzone są w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych. W wyniku natrafienia na defekt fala ulega osłabieniu, odbiciu oraz załamaniu. W wyniku analizy otrzymanych sygnałów można wnioskować o defektach [1].

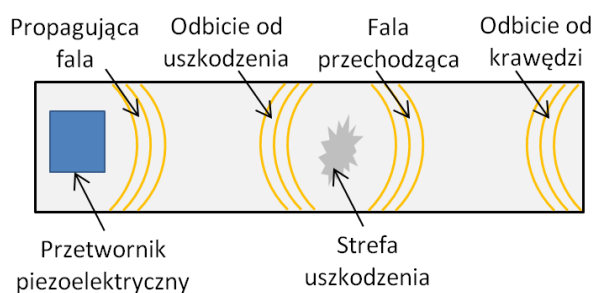
W metodzie magnetostrykcyjnej rozróżniamy kilka trybów pomiaru rozchodzenia się fal sprężystych. Tryb echa realizowany jest gdy nadajnik i odbiornik znajdują się na tej samej powierzchni. Rozchodząca się fala po dotarciu do defektu ulega odbiciu. Natomiast w trybie przelotowym mierzona jest amplituda rozchodzącej się fali, która po natrafieniu na defekt ulega osłabieniu.

Długość fali sprężystej stosowanej w badaniach opisana jest zależnością (3.4), [114]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.4)$$

gdzie λ – długość fali, c – prędkość rozchodzenia się fali, f – częstotliwość generowanej fali.

Na rysunku poniżej 3.12 przedstawiono schemat pomiaru metodą magnetostrykcyjną.



Rys. 3.12. Schemat pomiaru metodą magnetostrykcyjną [114].

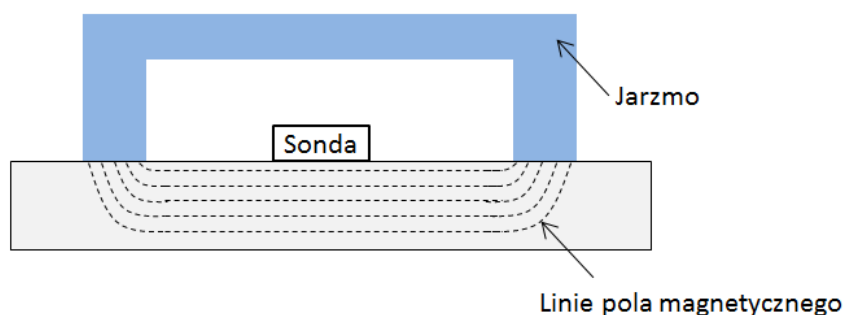
Metoda magnetostrykcyjna umożliwia wykrycie defektów powstałych w badanej konstrukcji. Jednak ma pewne ograniczenia wynikające z faktu, że fala sprężysta ulega tłumieniu w funkcji odległości od nadajnika. Ograniczenie to jest dość uciążliwe, ponieważ nie można badać większych obiektów z dużą dokładnością, zaś same przetworniki muszą mieć znaczną moc, aby móc wygenerować odpowiednio silny sygnał. Praktyczne

zastosowanie metody ograniczone jest do obiektów o wymiarach do kilku metrów. Ponadto interpolacja wyników jest często niejednoznaczna.

3.5. Metoda oceny stanu naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkausena

Kolejną metodą pomiarów naprężeń w materiałach magnetycznych jest metoda bazująca na efekcie Barkhausena [18], [33], [36], [66]. W metodzie tej w wyniku magnesowania powierzchniowego materiału przy pomocy jarzma elektromagnetycznego z sondą umieszczoną między jego biegunami, wykrywany jest kierunek oraz wartość naprężeń. Jarzmo magnesuje materiał przebiegiem sinusoidalnym generując w warstwie powierzchniowej przepływ strumienia indukcji. Wartość strumienia jest zależna od przenikalności magnetycznej badanego materiału. Na wartość przenikalności wpływają naprężenia jakim jest poddany materiał. Stanowisko pomiarowe zostało przedstawione na rysunku poniżej 3.13.

W celu skrócenia procesu pomiarowego została opracowana specjalna głowica generująca wirujące pole magnetyczne i umożliwiającą szybkie wyznaczanie kierunku i wartości naprężeń na podstawie pomiaru pola magnetycznego w badanym materiale.

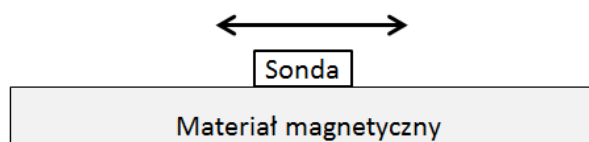


Rys. 3.13. Schemat pomiaru metodą oceny stanu naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkausena [33].

Metoda umożliwia wyznaczanie kierunku działania naprężeń oraz ich wielkości. Zaletą tej metody jest szybkość pomiaru, jednak w tej metodzie konieczne jest odpowiednie skalibrowanie przyrządu pomiarowego dla konkretnego materiału i zapewnienie bezpośredniego dostępu do badanej powierzchni.

3.6. Metoda magnetycznej pamięci metalu

Metoda magnetycznej pamięci metalu może być stosowana do detekcji defektów oraz naprężeń w konstrukcjach stalowych [24], [62]. Istotą tej metody jest badanie sygnatury magnetycznej powierzchni badanego elementu. W wyniku koncentracji naprężeń oraz odkształceń plastycznych pojawiają się obszary o podwyższonej wartości pola magnetycznego na powierzchni elementu. Jest to związane z efektem Villarięgo (efekt magnetosprężysty), czyli zmianą stanu magnetycznego pod wpływem naprężeń. Również w przypadku pojawienia się w materiale nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych następuje wzrost wartości pola magnetycznego na powierzchni badanego elementu. Pomiar wykonywany jest poprzez skanowanie powierzchni badanego elementu i rejestrację wartości indukcji mierzonej na powierzchni badanego elementu. Schemat pomiaru przedstawiono na rysunku 3.14.



Rys. 3.14. Schemat pomiaru metodą magnetycznej pamięci metalu [24].

Metoda magnetycznej pamięci metalu ma zastosowanie jedynie do badania materiałów ferromagnetycznych i jest powiązana z metodą rozproszenia strumienia magnetycznego (MFL). Różny jest jednak sposób zadawania pola magnesującego. W metodzie MFL pole magnetyczne generowane jest sztucznie przez różnego typu jarzma. W metodzie magnetycznej pamięci metalu pole magnetyczne jest to pole własne elementu, pole resztkowe po magnesowaniu lub namagnesowanie w wyniku odkształceń sprężysty i plastycznych oraz pole magnetyczne ziemi.

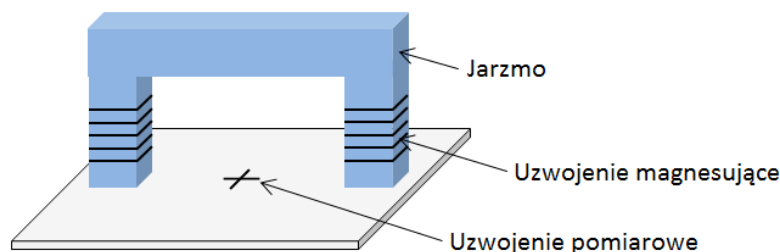
Zaletą metody jest wskazanie punktów koncentracji naprężeń oraz pęknięć. Jednak wymaga to skanowania powierzchni przy pomocy sondy pomiarowej. Ponadto mogą pojawić się błędy w wyniku niedokładnego prowadzenia sondy.

3.7. Metoda pomiarów magnetosprężystych

W metodach tych wykorzystuje się właściwości magnetyczne badanego materiału. Badany element poddawany jest naprężeniom i obserwuje się wpływ tych naprężeń na charakterystyki magnetyczne.

3.7.1. Metoda jarzmowa

W metodzie tej wykorzystuje się ferromagnetyczne właściwości stali konstrukcyjnych. Do badanego obiektu przykładana jest jarzmo z nawiniętymi uzwojeniami magnesującymi, a na powierzchni obiektu poprzez otwory uzwaja się cewki pomiarowe [68], [69]. Droga magnetyczna zamyka się przez jarzmo oraz badany fragment materiału. Schemat metody przedstawiono na rysunku 3.15. W wyniku płynięcia prądu przez uzwojenie magnesujące, wytwarzane jest pole magnesujące, zaś w cewkach indukują się strumień magnetyczny. Na podstawie wyników pomiaru można wyznaczyć pętle histerezy magnetycznej badanego elementu.

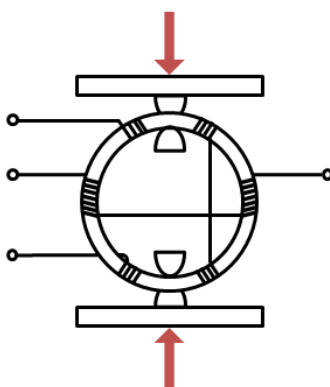


Rys. 3.15. Schemat pomiaru metodą jarzmową z wykorzystaniem efektu magnetosprężystego [68].

Zaletą tej metody jest szybki i bezpośredni pomiar wpływu naprężeń na indukcję magnetyczną. Jednak do wad tej metody możemy zaliczyć wykonywanie pomiarów lokalnie, konieczność przykładania jarzma do badanej powierzchni i wykonywania otworów, możliwość niezamknięcia się drogi magnetycznej poprzez powłoki znajdujące się na badanej konstrukcji oraz wykonywanie jedynie pomiarów przypowierzchniowych.

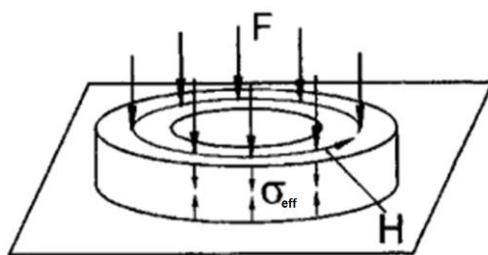
3.7.2. Metody wykorzystujące zamknięty obwód magnetyczny badanej konstrukcji

Następną grupę metod pomiarów magnetosprężystych stanowią metody, w których obwód magnetyczny zamyka się w danym elemencie. Na podstawie danych literaturowych można wyróżnić w tym zakresie dwie zarysowujące się koncepcje realizacji. W jednej z nich badania są realizowane na próbkach pierścieniowych do których siła ściskająca lub rozciągająca przykładana była do próbki wzdłuż średnicy co przedstawiono na rysunku 3.16 [76]. W metodzie tej nie jest jednak zapewniony jednorodny rozkład naprężeń wzdłuż całego magnetowodu. Zaletą tego rozwiązania jest natomiast zamknięty magnetowód oraz możliwość uzwojenia próbki.

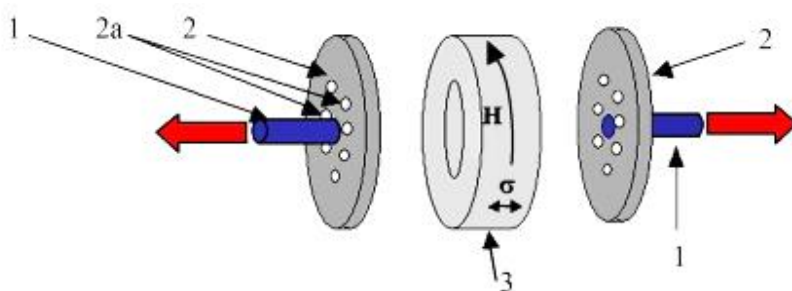


Rys. 3.16. Schemat ściskania próbki pierścieniowej wzdłuż średnicy [76].

Odmienną koncepcję zrealizowano w pracy [8], [9]. W koncepcji tej do badań stosowano również próbki pierścieniowe, ale siłę zewnętrzną do próbki przyłożono wzdłuż jej osi. Zaletami tej metody jest zamknięty magnetowód, możliwość uzwojenia próbki oraz jednorodny rozkład naprężeń, zdefiniowany prostopadle do kierunku działania pola magnesującego. Metoda ta może być stosowana głównie w odniesieniu do naprężeń ściskających. Natomiast w odniesieniu do rozciągania można ją stosować tylko w ograniczonym zakresie naprężeń. Schemat ściskania próbki pierścieniowej pokazano na rysunku 3.17, a rozciągania próbki pierścieniowej na rysunku 3.18.



Rys. 3.17. Schemat ściskania próbki pierścieniowej wzdłuż osi [8].



Rys. 3.18. Schemat rozciągania próbki pierścieniowej: 1 – wałek, 2 – niemagnetyczne podkładki, 2a – otwory na uzwojenie, 3 – ferromagnetyczna próbka pierścieniowa [92].

W przypadku, w którym kierunek działania naprężeń nie jest zgodny z kierunkiem działania pola magnesującego, ale jest jednoznacznie zdefiniowany, naprężenia efektywne w próbce można wyznaczyć z poniższej zależności [67]:

$$\sigma_e = \sigma(\cos\varphi - \nu \cdot \sin\varphi) \quad (3.5)$$

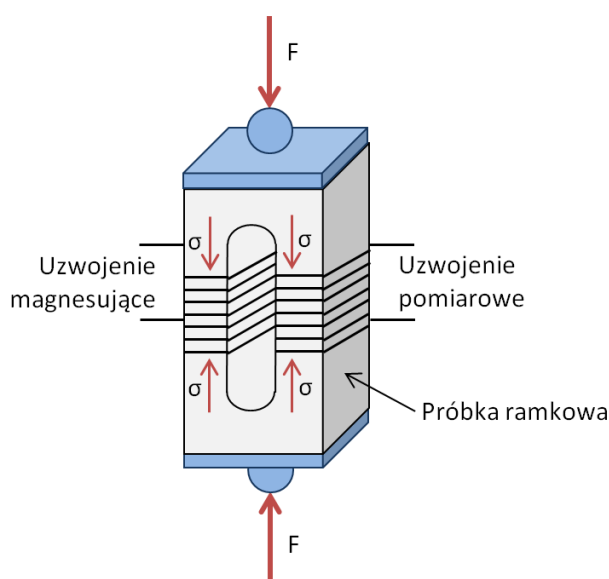
przy czym: σ – naprężenia równoległe do przyłożonej siły zewnętrznej, φ – kąt między kierunkiem działania naprężeń σ a kierunkiem pola magnesującego H , σ_e – naprężenie efektywne w próbce, ν – moduł Poissona.

W przypadku próbki pierścieniowej ściskanej lub rozciąganej wzdłuż osi kierunek naprężeń efektywnych σ_e jest prostopadły do kierunku pola magnesującego ($\varphi = 90^\circ$) i zależność (3.5) przyjmuje poniższą postać [103]:

$$\sigma_e = -\nu\sigma \quad (3.6)$$

W badaniach magnetosprężystych w odniesieniu do magnetyków ceramicznych – ferrytów w pracy [7], [10] stosowano próbki okienne pokazaną na rysunku 3.19. Taki kształt próbki spełnia wszystkie założone wymagania: ma zamknięty magnetowód, zapewnia możliwość uzwojenia próbki, jednorodny rozkład naprężeń, równoległy kierunek działania naprężeń do kierunku pola magnesującego w dominującej części magnetowodu. Aby można

było wprowadzić naprężenia od sił ściskających do próbki ferrytowej, próbka musiała się charakteryzować odpowiednim przekrojem poprzecznym.

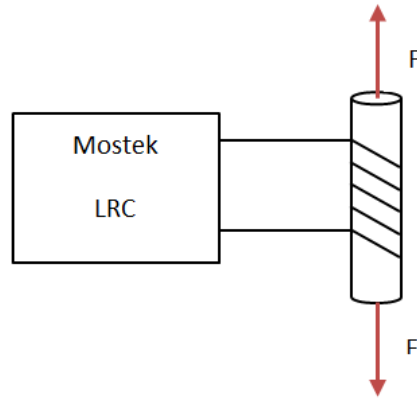


Rys. 3.19. Próbka ramkowa ferrytowa w trakcie obciążania siłą ściskającą [7].

3.8. Metoda elektromagnetyczna

Jedną z metod umożliwiających pomiar naprężeń jest metoda elektromagnetyczna [25], [120]. W wyniku pojawiających się naprężeń w materiale i degradacji zmienia się jego mikrostruktura. Pojawiają się mikropęknięcia oraz odkształcenia materiału. Z powodu korelacji parametrów mikrostruktury z właściwościami elektromagnetycznymi zmieniają się jej właściwości. Pierwszym z nich jest przewodność właściwa. Drugim jest podatność elektryczna czyli zdolność do polaryzacji materiału pod wpływem pola elektrycznego. Trzecim najważniejszym jest przenikalność magnetyczna. Siły zewnętrzne oddziałujące na dany element generują naprężenia oraz opisane powyżej zmiany. Najprostszą metodą wykrywania tych zmian jest pomiar impedancji cewki nawiniętej na badany element. Taki pomiar najłatwiej zrealizować poprzez pomiar indukcyjności i rezystancji przy pomocy mostka LRC przedstawiono na rysunku 3.20.

Dużą zaletą tej metody jest prostota realizacji pomiaru. Wadą tej metody jest badanie niewielkich zmian indukcyjności, co może być trudne do zrealizowania przy niesprzyjających warunkach środowiskowych. Metoda ta ma również dużą podatność na zmiany temperatury.



Rys. 3.20. Schemat pomiaru parametrów cewki w metodzie elektromagnetycznej [120].

3.9. Podsumowanie

Opisane powyżej metody można podzielić na następujące grupy. Pierwszą grupę stanowią metody: tensometryczna, światłowodowa i triangulacyjna, które bazują na pomiarze odkształceń. Do drugiej grupy można zaliczyć metodę magnetyczno-proszkową i strumienia rozproszenia, które wykrywają tylko nieciągłości. Trzecią grupę stanowią metody: wibrotermograficzna, magnetowizji, prądów wirowych, tomografii wiroprowodowej, magnetostrykcyjna, efektu Barkausena, magnetycznej pamięci metalu, magnetosprężysta jarzmowa i zamkniętego magnetowodu, które wykrywają naprężenia. Metody wraz z ich najważniejszymi właściwościami zebrano w tabeli 3.1.

Nie istnieje jedna uniwersalna metoda pomiaru naprężeń, co wynika z mnogości materiałów, różnego kształtu konstrukcji oraz wymagań stawianych pod względem czułości i dokładności. Poszczególne metody ze względu na swoje wady nie zawsze spełniają stawiane im wymagania. Zaistniała potrzeba opracowania nowej metody oceny stanu konstrukcji. Tę lukę może uzupełnić metoda wykorzystująca zjawisko magnetosprężyste.

Tab. 3.1. Zestawienie metod pomiarowych.

Metoda	Zjawisko	Wykorzystywane mechanizmy pomiaru	Zalety	Wady
tensometryczna	elektryczne	rezystancja → odkształcenia → naprężenia	- wysoka powtarzalność - łatwość montażu - prosta konstrukcja	- wpływ temperatury - płynięcie kleju
światłowodowa	optyczne	parametry fali świetlnej → odkształcenia → naprężenia	- możliwość badania zarówno małych, jak i dużych obszarów	- mocowanie - wpływ temperatury - możliwość niewykrycia naprężeń zlokalizowanych wewnątrz elementu
triangulacyjna	optyczne	położenie → odkształcenia → naprężenia	- możliwy duży obszar pomiarowy - możliwość wykonywania pomiarów bezstykowych	- wysoki koszt - konieczność zapewnienia odsonionych obszarów pomiaru - wymagana separacja urządzenia pomiarowego od badanego elementu
wibrotermograficzna	termodynamiczne	temperatura → nieciągłości i naprężenia	- bezpośrednie wskazanie miejsca nieciągłości lub naprężeń	- okresowość badań - potrzeba wprowadzenia fali ultradźwiękowej
magnetyczno-proszkowa	magnetyczne	rozproszenie pola magnetycznego → nieciągłości	- nieskomplikowany pomiar - łatwość interpretacji wyników - bezpośrednie wskazanie miejsca nieciągłości	- pomiar lokalny - okresowość badań - wymagane sprzyjające warunki atmosferyczne
strumienia rozproszenia	magnetyczne	rozproszenie pola magnetycznego → nieciągłości	- nieskomplikowany pomiar - łatwość interpretacji wyników - bezpośrednie wskazanie miejsca nieciągłości	- pomiar lokalny - okresowość badań - wymagane sprzyjające warunki atmosferyczne

prądów wirowych i tomografii wirowej	elektromagnetyczne	pole magnetyczne wytwarzane przez prądów wirowych → nieciągłości i naprężenia	- możliwość badania metali ferromagnetycznych jak i nieferromagnetycznych	- trudna interpretacja wyników - duży wpływ zakłóceń
magnetostrykcyjna	magnetostrykcyjne	- parametry fali ultradźwiękowej → nieciągłości i naprężenia	- możliwość wykrycia naprężeń zlokalizowanych wewnątrz elementu	- potrzeba wprowadzenia fali ultradźwiękowej - możliwe zakłócenia elektromagnetyczne - duży wpływ tłumienia materiału
wykorzystująca efekt Barkausena	magnetyczne	pole magnetyczne → naprężenia	- możliwość wykrywania kierunku naprężeń oraz pomiar ich wartości	- duża podatność na zakłócenia pola magnetycznego
magnetycznej pamięci metalu	magnetyczne	indukcja magnetyczna → nieciągłości i naprężenia	- bezpośrednio wskazanie miejsca nieciągłości lub naprężenia	- duża podatność na zakłócenia pola magnetycznego - okresowość badania
magnetosprężysta - jarzmowa	magnetyczne	indukcja magnetyczna → naprężenia	- możliwość wykrycia naprężeń zlokalizowanych wewnątrz elementu	- wykonywanie otworów w badanym elemencie
magnetosprężysta - zamkniętego magnetowodu	magnetyczne	indukcja magnetyczna → naprężenia	- możliwość wykrycia naprężeń zlokalizowanych wewnątrz elementu	- możliwość uzwojenia elementu
elektromagnetyczna	elektromagnetyczne	indukcyjność i rezystancja → impedancja → naprężenia	- łatwość pomiarów	- wpływ temperatury

4. Zjawisko magnetosprężyste

Ferromagnetykiem nazywamy materiał, który wykazuje lokalne uporządkowanie magnetyczne w obszarach nazywanych domenami [11], [17]. Główne ferromagnetyki to żelazo, kobalt, nikiel oraz niektóre metale ziem rzadkich. Ferromagnetyki tracą swoje właściwości magnetyczne powyżej temperatury Curie zróżnicowanej ze względu na skład ferromagnetyka. Główny podział ferromagnetyków to ferromagnetyki twarde, półtwarde i miękkie. Magnetyki twarde zachowują trwale swój stan namagnesowania, charakteryzują się szeroką pętlą histerezy – pole koercji powyżej 10 kA/m. Są to materiały stosowane do wytwarzania magnesów trwałych. Magnetyki półtwarde zachowują swój stan namagnesowania, ale jest on łatwy do usunięcia. Jest to umowna nazwa grupy materiałów ferromagnetycznych o polu koercji z zakresu 1–10 kA/m. Magnetyki miękkie, są to materiały które tracą swoje namagnesowanie po zaniknięciu magnetycznego pola zewnętrznego. Pozostaje jedynie namagnesowanie resztkowe o niewielkiej wartości w stosunku do namagnesowania maksymalnego. Ferromagnetyki miękkie charakteryzują się wąską pętlą histerezy – pole koercji poniżej 1 kA/m. Materiały te ze względu na właściwości magnetyczne stosuje się głównie na podzespoły indukcyjne takie jak transformatory, dławiki oraz do maszyn elektrycznych takich jak: generatory, alternatory, silniki elektryczne. Są to głównie stopy żelaza i żelaza–niklu. Do grupy materiałów magnetycznie miękkich należą też stale konstrukcyjne. Jednak są one głównie wykorzystywane ze względu na swoje właściwości mechaniczne.

W materiałach magnetycznych w wyniku działania pola magnetycznego następuje uporządkowanie kierunków domen magnetycznych, które wpływa na zmianę wymiarów zewnętrznych magnetyka. Zjawisko to nazywane jest zjawiskiem magnetostrykcji. Magnetostrykcja może także pojawić się samoistnie w wyniku pojawiania się domen magnetycznych. Jest to wtedy magnetostrykcja spontaniczna. Magnetostrykcja pojawiająca się w wyniku działania zewnętrznego pola magnetycznego to magnetostrykcja wymuszona.

Magnetostrykcja spontaniczna występuje podczas schładzania materiału poniżej temperatury Curie T_c . W przypadku żelaza temperatura Curie wynosi 761 °C. W wyniku spadku temperatury poniżej temperatury Curie następuje uporządkowanie spinów magnetycznych w sieci krystalicznej w wyniku energii wymiany E_w , którą dla pary sąsiadujących spinów przedstawia poniższa zależność [17]:

$$E_w = -2JS_iS_j \quad (4.1)$$

gdzie J – całka wymiany, opisująca oddziaływanie wzajemne atomów i -tego i j -tego, S_i i S_j – spiny atomów, które są w bezpośrednim sąsiedztwie przez co na siebie oddziałują.

Magnetostrykcja wymuszona z kolei pojawia się pod wpływem zewnętrznego pola magnesującego. Zmiana wymiarów magnetyka może być liniowa lub objętościowa. Magnetostrykcja liniowa zwana również zjawiskiem Joule’a polega na wydłużeniu się magnetyka lub skróceniu i jednoczesnym jego zwężeniu lub poszerzeniu, w taki sposób, że nie zmienia się jego objętość [60]. Magnetyzacja objętościowa występuje podczas działania zewnętrznego pola magnesującego i wiąże się ze zmianą wymiarów magnetyka we wszystkich trzech osiach, z jednakowym znakiem.

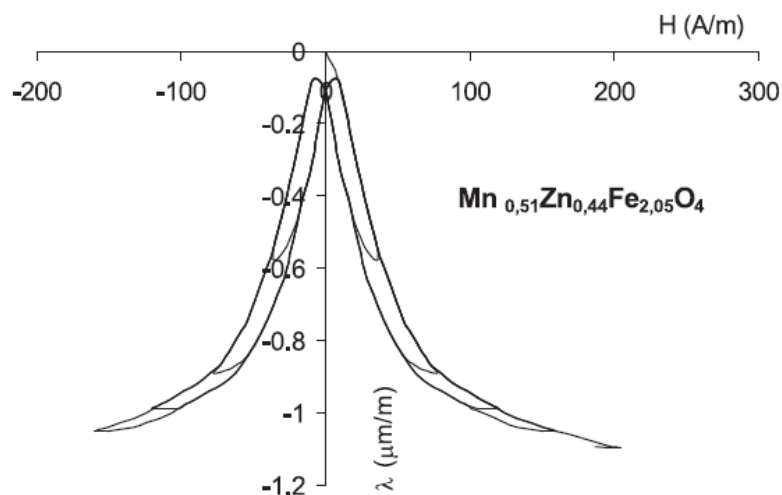
Magnetostrykcja może być dodatnia lub ujemna. Magnetostrykcja dodatnia występuje jeśli sieć krystaliczna wydłuża się zgodnie z kierunkiem działania pola magnesującego. Jeśli sieć krystaliczna skraca się zgodnie z kierunkiem działania pola magnesującego, wtedy ma miejsce magnetostrykcja ujemna.

Parametrem charakterystycznym magnetostrykcji jest współczynnik magnetostrykcji λ opisany poniższą zależnością [22]:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} = \frac{3}{2} \lambda_s (\cos^2 \theta - \frac{1}{3}) \quad (4.2)$$

gdzie Δl – zmiana wydłużenia próbki pod wpływem pola magnesującego, l – długość początkowa próbki, λ_s – magnetostrykcja nasycenia, θ – kąt między kierunkiem pola magnesującego H a kierunkiem pomiaru magnetostrykcji λ . Współczynnik magnetostrykcji nasycenia λ_s jest to zmiana względna wydłużenia $\Delta l/l$ próbki pod wpływem pola magnesującego od stanu rozmagnesowania do namagnesowania nasycenia.

Zmiany magnetostrykcji λ od pola magnesującego H można zobrazować przy pomocy tak zwanych pętli motylnych przedstawionych na rysunku 4.1 [10]. Są to charakterystyki $\lambda(H)$ przedstawiające krzywą pierwotną oraz pętle histerezy magnetostrykcji. Zmiana znaku pola magnesującego H nie zmienia znaku magnetostrykcji λ .



Rys. 4.1. Przykładowe pętle motylkowe dla ferrytu manganowo–cynkowego [10].

Zjawiskiem termodynamicznie odwrotnym do magnetostrykcji jest zjawisko Villariego. Polega ono na zmianie parametrów magnetycznych materiału magnetycznego pod wpływem naprężeń σ od działających na niego sił zewnętrznych. Zjawisko to zostało odkryte w roku 1865 przez Villariego i jest nazywane także zjawiskiem magnetosprężystym [11].

Materiał o dodatnim współczynniku magnetostrykcji nasycenia λ_s , zgodnie z zasadą Le Chateliera, w wyniku działania pola magnesującego H wydłuży swoje wymiary w kierunku działania tego pola. Analogicznie naprężenia rozciągające $+\sigma$ spowodują wzrost indukcji magnetycznej B materiału o dodatnim współczynniku magnetostrykcji nasycenia λ_s , a naprężenia ściskające $-\sigma$ spowodują spadek indukcji magnetycznej B . Z kolei naprężenia rozciągające $+\sigma$ spowodują spadek indukcji magnetycznej B materiału o ujemnym współczynniku magnetostrykcji nasycenia λ_s , a naprężenia ściskające $-\sigma$ spowodują wzrost indukcji magnetycznej B . Zależności cząstkowych zmian tych wielkości można zapisać zależnością:

$$\left(\frac{d\lambda}{dH} \right)_{\sigma} = \left(\frac{dB}{d\sigma} \right)_H = d \quad (4.3)$$

gdzie $(d\lambda/dH)_{\sigma}$ – zmiana odkształcenie magnetostrykcyjne λ pod wpływem pola H , przy ustalonej wartości naprężeń σ , $(dB/d\sigma)_H$ – zmiana indukcji magnetycznej B , pod wpływem naprężeń σ , przy ustalonej wartości pola magnesującego H , zaś d – czułość piezomagnetyczna.

W materiale magnetycznym znajdującym się w polu magnesującym H całkowitą energię swobodną można zapisać jako sumę następujących energii składowych:

$$E_C = E_H + E_D + E_K + E_\sigma + E_W \quad (4.4)$$

gdzie E_C – całkowita energia swobodna, E_H – energia potencjalna momentów magnetycznych, E_D – energia od magnesowania próbki, E_K – energia anizotropii magnetokrystalicznej, E_σ – energia magnetosprężysta, E_W – energia wymiany.

Pierwszą składową E_H , energię potencjalną momentów magnetycznych w materiale magnetycznym znajdującym się w polu magnesującym H (energia Zeemana) można zapisać poniższą zależnością:

$$E_H = - \int_V m_s H \cos \theta \cdot dV \quad (4.5)$$

gdzie dV – elementarna objętość, m_s – wartość momentu magnetycznego dla dV , H – wartość natężenia pola magnesującego, θ – kąt pomiędzy kierunkiem pola magnesującego H a kierunkiem momentu magnetycznego dla objętości elementarnej dV .

Energia potencjalna momentów magnetycznych przyjmuje wartość maksymalną, kiedy momenty magnetyczne są prostopadłe do kierunku pola magnesującego ($\theta = 90^\circ$). Z kolei wartość minimalną przyjmuje, kiedy momenty magnetyczne są równoległe do kierunku pola magnesującego ($\theta = 0^\circ$).

Energia od magnesowania E_D powstająca poprzez indukowanie się pozornych ładunków magnetycznych na powierzchni magnesowanego materiału może być określona poniższą zależnością:

$$E_d = - \frac{1}{2} \mu_0 \int_V M H_d \cdot dV \quad (4.6)$$

gdzie dV – elementarna objętość, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, M – magnetyzacja dla dV , H_d – pole od magnesowania.

Pole od magnesowania H_d jest zależne od magnetyzacji M . Aby wyznaczyć wartość pola od magnesowania, należy wykonać całkowanie po całym materiale magnetycznym. Jednak wykorzystując podejście energetyczne (pole od magnesowania jest polem bezwirowym) można w przybliżeniu wyznaczyć wartość pola od magnesowania jako:

$$H_d = -N \cdot M \quad (4.7)$$

gdzie N – współczynnik od magnesowania dla materiału magnetycznego zależny od wymiarów i kształtu, M – magnetyzacja próbki.

Pole odmagnesowania H_d przyjmuje zerową wartość, jeśli magnesowany materiał ma zamknięty magnetowód, co ma miejsce w przypadku próbek pierścieniowych lub ramkowych.

Energia anizotropii magnetokrystalicznej E_K dla materiałów krystalicznych przyjmuje poniższą postać:

$$E_K = K f(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \quad (4.8)$$

gdzie K – stałe anizotropii magnetokrystalicznej, f – funkcja orientacji magnetyzacji M , $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – cosinusy kątów między kierunkiem wektora magnetyzacji M a kierunkami osi krystalograficznych kryształu. Kierunki magnesowania dla których energia anizotropii osiąga maksima nazywane są trudnymi, a kierunki magnesowania dla których energia anizotropii osiąga minima nazywane kierunkami łatwego magnesowania.

Energia magnetosprężysta E_σ to energia powstała w materiale magnetycznym jako wynik interakcji odkształcenia magnetostrykcyjnego i odkształcenia sprężystego od sił zewnętrznych:

$$\int_0^{E_\sigma} dE_\sigma = -\sigma \int_{\lambda_s}^{\lambda_\phi} d\lambda \quad (4.9)$$

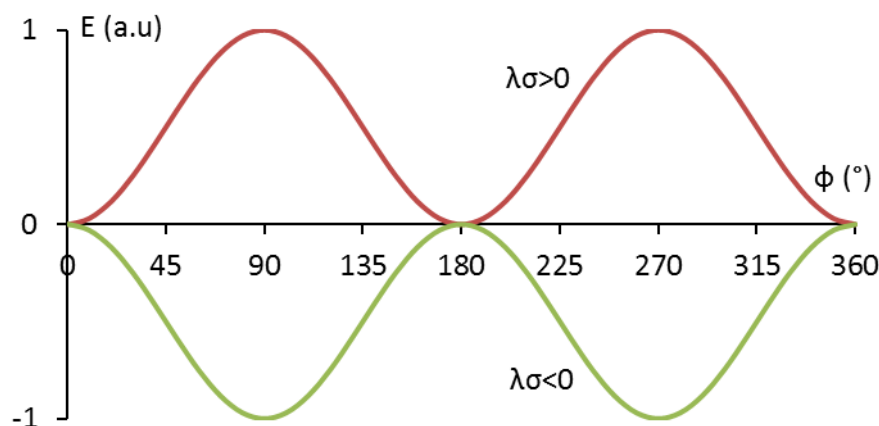
gdzie σ – naprężenia, λ_s – magnetostrykcja nasycenia materiału magnetycznego.

Energia magnetosprężysta E_σ wyznaczona z zależności (4.9) przyjmie poniższą postać:

$$E_\sigma = -\sigma \left[\frac{3}{2} \lambda_s \left(\cos^2 \phi - \frac{1}{3} \right) - \lambda_s \right] = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \phi \quad (4.10)$$

gdzie σ – naprężenia, λ_s – magnetostrykcja nasycenia materiału magnetycznego, ϕ kąt pomiędzy kierunkiem działania naprężeń σ a kierunkiem odkształcenia magnetostrykcyjnego λ_s .

Na rysunku 4.2 przedstawiono zależność energii magnetosprężystej E_σ od wartości kąta ϕ pomiędzy kierunkiem działania naprężeń σ a kierunkiem odkształcenia magnetostrykcyjnego λ_s .

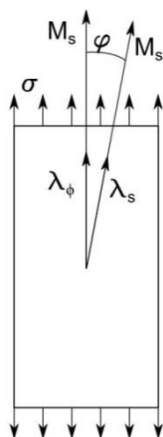


Rys. 4.2. Zależność energii magnetosprężystej E_σ od wartości kąta ϕ pomiędzy kierunkiem działania naprężeń σ a kierunkiem odkształcenia magnetostrykcyjnego λ_s [105].

Stan $\lambda_s \sigma > 0$ występuje, kiedy na materiał o dodatniej magnetostrykcji działają naprężenia rozciągające lub na materiał o ujemnej magnetostrykcji działają naprężenia ściskające. Analogicznie stan $\lambda_s \sigma < 0$ występuje, kiedy na materiał o dodatniej magnetostrykcji działają naprężenia ściskające lub na materiał o ujemnej magnetostrykcji działają naprężenia rozciągające.

Wartość energii magnetosprężystej E_σ osiąga minimum dla stanu $\lambda_s \sigma > 0$, kiedy wektor naprężeń σ i wektor magnetyzacji M_s są równoległe i mają ten sam zwrot. Z tego wynika, że kierunek działania naprężeń staje się osią łatwego magnesowania.

Na rysunku 4.3 przedstawiono schemat zmiany kierunku działania wektora magnetyzacji M_s o kąt ϕ pod wpływem naprężeń rozciągających σ .



Rys. 4.3. Schemat zmiany kierunku działania wektora magnetyzacji M_s o kąt ϕ pod wpływem naprężeń rozciągających σ [91].

Z kolei dla stanu λ_s $\sigma < 0$ wartość energii magnetosprężystej E_σ osiąga minimum, kiedy wektor naprężeń σ i wektor magnetyzacji M_s są równoległe i mają przeciwny zwrot. W tym przypadku oś łatwego magnesowania będzie prostopadła do kierunku działania naprężeń.

Podsumowując, wpływ naprężeń na właściwości magnetyczne materiału będzie zależeć od:

- E_D – energii od magnesowania próbki,
- E_K – energii anizotropii magnetokrystalicznej,
- E_σ – energii magnetosprężystej.

Największy wpływ naprężeń uzyskuje się poprzez uzyskanie jak największej energii magnetosprężystej, a jak najmniejszej energii od magnesowania próbki i energii anizotropii magnetokrystalicznej. Czyli największy wpływ naprężeń uzyskamy dla próbki o zamkniętym magnetowodzie (minimalizacja energii od magnesowania) wykonanej z materiału bez sieci krystalicznej lub magnesowanej w kierunkach łatwego magnesowania (minimalizacja energii swobodnej w próbce).

Powyższe założenia dają wskazówki do zaplanowania eksperymentu. Próbka wykorzystywana do badań powinna mieć zamknięty magnetowód i być magnesowana w kierunku łatwego magnesowania.

Aby móc dogłębniej zrozumieć proces magnesowania materiału w warunkach działania naprężeń należy dokonać modelowania eksperymentalnie wyznaczonych charakterystyk magnetycznych.

5. Modele procesu magnesowania

5.1. Model Jilesa–Athertona

Model Jilesa–Athertona stosowany jest do modelowania procesów magnesowania [101], [53]. Modelowanie to może uwzględniać działanie naprężeń od sił zewnętrznych jak również być bez wpływu naprężeń. Model Jilesa–Atherton opiera się na analizie potencjałów termodynamicznych [90]. Z fizycznego punktu widzenia potencjały te opisują przemiany termodynamiczne zachodzące w materiale magnetycznym w trakcie magnesowania i są opisane przez zależności (5.1), (5.2) oraz (5.3), [46]:

$$A = G + \mu_0 \cdot H \cdot M \quad (5.1)$$

$$G = U - T \cdot S + \frac{3}{2} \sigma \cdot \lambda \quad (5.2)$$

$$U = \frac{1}{2} \alpha \cdot \mu_0 \cdot M^2 \quad (5.3)$$

gdzie A – energia swobodna Helmholtza, G – wolna energia Gibbsa, U – energia wewnętrzna materiałów, S – entropia materiału, M – magnetyzacja materiału, H – natężenia pola magnesującego, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m – przenikalność magnetyczna próżni, T – temperatura materiału, σ – naprężenia w materiale, λ – wartość odkształcenia magnetostrykcyjnego, α – współczynnik opisujący sprzężenie międzydomenowe (według modelu Blocha) [73].

Natomiast w oryginalnym modelu magnesowania Jilesa–Athertona stosuje się siedem parametrów takich jak: a – parametr związany z gęstością ścian domen, k – parametr związany ze średnią energią potrzebną do przesunięcia ściany domenowej przez punkt zaczepienia, c – współczynnik odwracalności procesu magnesowania, α – jest sprzężeniem między domenami, K_{an} – gęstość energii anizotropii, t – udział fazy anizotropowej, M_s – magnetyzacja nasycenia.

Model Jiles–Athertona powinien uwzględniać anizotropię materiału [99]. Anizotropia ta, może być wynikiem powstania w materiale naprężeń, zarówno wewnętrznych jak i od działania sił zewnętrznych lub od zmiany temperatury. Całkowita magnetyzacja M jest opisana jako suma magnetyzacji odwracalnej M_{rev} i magnetyzacji nieodwracalnej M_{irr} . Magnetyzacja odwracalna M_{rev} opisana jest poniższym równaniem [54]:

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (5.4)$$

gdzie M_{an} jest magnetyzacją bezhisterezową i powinna być obliczana jako ważona suma magnetyzacji anizotropowej M_{aniso} i magnetyzacji izotropowej M_{iso} [55]:

$$M_{an} = tM_{aniso} + (1-t)M_{iso} \quad (5.5)$$

gdzie t – współczynnik wagowy, opisujący udział fazy anizotropowej w materiale.

Magnetyzacja izotropowa M_{iso} w materiale jest opisana poniższym równaniem [29]:

$$M_{iso} = M_s \left[\cath\left(\frac{H_{eff}}{a}\right) - \left(\frac{a}{H_{eff}}\right) \right] \quad (5.6)$$

gdzie $H_{eff} = H + \alpha M$ – skuteczne pole magnetyzujące, α oznacza sprzężenie między domenami.

Magnetyzacja anizotropowa M_{aniso} w materiale jest podana za pomocą równania [86], [103]:

$$M_{aniso} = M_s \left[\frac{\int_0^\pi e^{\frac{E(1)+E(2)}{2}} \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta}{\int_0^\pi e^{\frac{E(1)+E(2)}{2}} \sin \theta \cdot d\theta} \right] \quad (5.7)$$

gdzie $E(1)$ i $E(2)$ są energiami opisanymi następującymi zależnościami:

$$E(1) = \frac{H_{eff}}{a} \cos \theta - \frac{K_{an}}{M_s \mu_0 a} \sin^2(\psi - \theta) \quad (5.8)$$

$$E(2) = \frac{H_{eff}}{a} \cos \theta - \frac{K_{an}}{M_s \mu_0 a} \sin^2(\psi + \theta) \quad (5.9)$$

gdzie K_{an} – gęstość energii anizotropowej, ψ – kąt pomiędzy osią łatwego magnesowania a kierunkiem pola magnesującego.

Równanie dla magnetyzacji anizotropowej można rozwiązać tylko metodami numerycznymi, ponieważ pierwotne funkcje całkowych nie są znane.

Oryginalny model umożliwia modelowanie pętli histerezy tylko dla jednej wartości pola magnesującego. Z kolei model rozszerzony może być stosowany do modelowania pętli histerezy dla różnych wartości pola magnesującego. Jest to możliwe, ponieważ parametry modelu zależą od zmiany wartości magnetyzacji.

Należy podkreślić, że w przypadku materiałów izotropowych (gdzie średnia gęstość energii anizotropii $K_{an} = 0 \text{ J/m}^3$) równanie (5.7) redukuje się do zmodyfikowanego równania Langevina [99]:

$$M_{ah}^{iso} = M_s \left[\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \left(\frac{a}{H_e}\right) \right] \quad (5.10)$$

Jednak w praktyce spotykane są materiały, wśród których znajdują się stale konstrukcyjne, gdzie fazy izotropowe i anizotropowe są ze sobą wymieszane. W takim przypadku całkowitą magnetyzację bezhisteryzową oblicza się jako sumę ważoną M_{ah}^{aniso} i M_{ah}^{iso} z następującego równania [55]:

$$M_{ah} = tM_{ah}^{aniso} + (1 - t)M_{ah}^{iso} \quad (5.11)$$

gdzie $t \in <0,1>$ opisuje udział fazy anizotropowej w materiale.

Histeresa magnetyczna jest wprowadzana do modelu Jilesa–Athertona za pomocą równania różniczkowego [102]:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{\delta_M}{1+c} \frac{M_{ah} - M}{\delta \cdot k - \alpha(M_{ah} - M)} + \frac{c}{1+c} \frac{dM_{ah}}{dH} \quad (5.12)$$

gdzie $c \in <0,1>$ opisuje odwracalność procesu magnesowania, podczas gdy parametr k opisuje średnią energię konieczną do przesunięcia ściany domenowej przez punkt zaczepienia. Ponadto w równaniu (5.12) parametr δ określa magnetyzację histerezową z uwagi na fakt, że jest on równy 1 podczas wzrostu H i -1 podczas jego spadku. Należy podkreślić, że parametr δM gwarantuje, że przenikalność różnicowa magnetyka jest fizycznie uzasadniona (nie mniejsza niż 0).

Należy podkreślić, że dla zróżnicowanych wartości amplitudy pola magnesującego, oryginalny model Jilesa–Athertona zapewnia dobrą zgodność między eksperymentalną pętlą histerezy a wynikami modelowania dla pojedynczej pętli histerezy. Dla innych wartości amplitudy pola magnesującego należy określić inny zestaw parametrów modelu. Wcześniej udowodniono, że w celu rozwiązania tego problemu parametr k powinien zmieniać się podczas każdego procesu magnesowania [100].

Z uwagi na fakt, że stan magnetyczny materiału jest determinowany wartością magnetyzacji M , zmiany parametru k można opisać następującym równaniem [100]:

$$k = k_0 + \frac{e^{k_2 \cdot (1 - |M|/M_s)} - 1}{e^{k_2} - 1} \cdot (k_1 - k_0) \quad (5.13)$$

gdzie parametry k_0 , k_1 i k_2 opisują kształt funkcji określającej k w następujący sposób: k_0 jest wartością maksymalną k , k_1 jest wartością minimalną, a k_2 jest parametrem kształtu funkcji $k(M)$.

W modelu Jilesa–Athertona–Sablika zmodyfikowany parametr k jest związany z magnetyzacją M w materiale zależnością [101]:

$$k(|M|/M_s) = g_0 + \frac{e^{g_2 \cdot (1 - |M|/M_s)} - 1}{e^{g_2} - 1} \cdot (g_1 - g_0) \quad (5.14)$$

gdzie: g_0 – określa wartość k w stanie rozmagnesowania, g_1 – definiuje wartość k nasycenia magnetycznego, g_2 – współczynnik funkcji falowych $k(|M|/M_s)$, gdzie M_s jest magnetyzacją nasycenia.

5.2. Model Takacsa

Model Takacsa opiera się na założeniu, że większość pętli histerezy można opisać funkcjami hiperbolicznymi [20], [107], [108]. Matematycznie gałęzie pętli histerezy zostały opisane następująco.

Dla rosnącej gałęzi pętli histerezy $dx/dt > 0$:

$$f_+ = \tanh(x - a_0) + b_1 \quad (5.15)$$

Dla opadającej gałęzi pętli histerezy $dx/dt < 0$:

$$f_- = \tanh(x + a_0) - b_1 \quad (5.16)$$

gdzie: a_0 – wartość koercji, a b_1 jest zapisane jako:

$$b_1 = (\tanh(x_m + a_0) - \tanh(x_m - a_0)) / 2 \quad (5.17)$$

gdzie x_m – maksymalna wartość zmiennej x , gdy gałęzie pętli histerezy f_+ i f_- zbiegają się.

Przy pomocy modelu Takacsa oprócz zmiennego pola magnetycznego można uwzględniać działanie stałego pola magnetycznego. Aby to osiągnąć do równań została wprowadzona zmienna d . Równania na f_+ i f_- przyjmą postać [107]:

$$f_+ = \tanh(x - a_0) + b_2(x) \quad (5.18)$$

$$f_- = \tanh(x + a_0) - b_3(x) \quad (5.19)$$

Dla wierzchołków pętli histerezy wartości funkcji f_+ i f_- będą sobie równe co daje możliwość wyliczenia b_2 dla maksymalnych wartości funkcji f_+ i f_- dla minimalnych wartości funkcji f_+ i f_- [107]:

$$b_2 = 0,5(\tanh(x_m + d_0 + a_0) + \tanh(x_m + d_0 - a_0)) \quad (5.20)$$

$$b_3 = 0,5(\tanh(-x_m + d_0 + a_0) - \tanh(-x_m + d_0 - a_0)) \quad (5.21)$$

gdzie d_0 jest przesunięciem na osi odciętych wynikającym ze stałego pola magnesującego.

Po dokonaniu przekształceń w modelu Takacsa otrzymujemy stałe dla procesu magnesowania i odmagnesowania [107].

$$C_m = b_2 \frac{\tanh(-x_m + d_0 - a_0) - \tanh(x - a_0)}{\tanh(-x_m + d_0 - a_0) - \tanh(x_m + d_0 - a_0)} + \\ + b_3 \frac{\tanh(x_m + d_0 - a_0) - \tanh(x - a_0)}{\tanh(x_m + d_0 - a_0) - \tanh(-x_m + d_0 - a_0)} \quad (5.22)$$

$$C_d = b_2 \frac{\tanh(-x_m + d_0 - a_0) - \tanh(x + a_0)}{\tanh(-x_m + d_0 + a_0) - \tanh(x_m + d_0 + a_0)} + \\ + b_3 \frac{\tanh(x_m + d_0 + a_0) - \tanh(x + a_0)}{\tanh(x_m + d_0 + a_0) - \tanh(-x_m + d_0 + a_0)} \quad (5.23)$$

Model ten odwzorowuje pętle histerezy, ale nie jest powiązany z właściwościami fizycznymi materiału.

5.3. Wpływ naprężeń mechanicznych na tensor względnej przenikalności magnetycznej

Naprężenia mechaniczne powodują zmiany w całkowitej energii swobodnej materiału magnetycznego [103]. Zmiany te związane są z pojawieniem się energii magnetoelastycznej E opisanej poniższą zależnością [21]:

$$E_{\sigma} = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \quad (5.24)$$

gdzie λ_s – magnetostrykcja nasycenia, σ – naprężenia normalne.

Przy wyliczaniu energii magnetoelastycznej należy uwzględnić anizotropię materiału magnetycznego, zależność magnetostrykcji nasycenia od naprężeń przy większych wartościach naprężeń mechanicznych i warunki brzegowe.

Zależność magnetyzacji bezhisterezowej $M(H)$ od naprężeń mechanicznych można przedstawić poniższymi równaniami [86].

$$M(H) = M_s \left[\frac{\int_0^{\pi} e^{\frac{E(1)+E(2)}{2}} \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta}{\int_0^{\pi} e^{\frac{E(1)+E(2)}{2}} \sin \theta \cdot d\theta} \right] \quad (5.25)$$

gdzie $E(1)$ i $E(2)$ są energiami opisanymi następującymi zależnościami:

$$E(1) = \frac{H_{eff}}{a} \cos \theta - \frac{E_{\sigma}}{M_s \mu_0 a} \sin^2(\psi - \theta) \quad (5.26)$$

$$E(2) = \frac{H_{eff}}{a} \cos \theta - \frac{E_{\sigma}}{M_s \mu_0 a} \sin^2(\psi + \theta) \quad (5.27)$$

gdzie M_s – magnetyzacja nasycenia, H_{eff} – skuteczne pole magnetyzujące, a – parametr opisujący gęstość ścian domenowych, ψ – kąt pomiędzy kierunkiem naprężeń normalnych a kierunkiem pola magnesującego.

Skuteczne pole magnesujące H_{eff} dane jest równaniem (5.28), a parametr opisujący gęstość ścian domenowych a równaniem (5.29) [101]:

$$H_{eff} = H + \alpha M \quad (5.28)$$

$$a = \frac{N k_B T}{\mu_0 M_s} \quad (5.29)$$

gdzie H – natężenia pola magnesującego, α – współczynnik opisujący sprzężenie międzydomenowe (według modelu Blocha), N – gęstość domeny magnetycznej, k_B – stała Boltzmanna, T – temperatura, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni.

Względną przenikalność magnetyczną $\mu_r(H)$ można zapisać następująco:

$$\mu_r(H) = \frac{M(H)}{H} \quad (5.30)$$

gdzie $M(H)$ – magnetyzacja materiału wyrażona w A/m.

Analizując równanie na bezhisterezową magnetyzację $M(H)$ (5.25) zauważalne jest, że użyte całki nie mają funkcji pierwotnych. Wykorzystując analizę numeryczną, zależność na naprężenia normalne σ od względnej przenikalności magnetycznej μ_r , można zapisać przybliżeniem liniowym:

$$\mu_r(\sigma) = \mu_u + k_m \sigma \quad (5.31)$$

gdzie μ_u – względna przenikalność magnetyczna dla próbki nieobciążonej, k_m – czułość magnetosprężysta.

Parametr k_m może być dodatni lub ujemny w zależności od dodatniej lub ujemnej wartości magnetostrykcji nasycenia materiału. Zależność (5.31) jest prawdziwa dla małych wartości naprężeń i dla początku krzywej magnesowania, gdzie względna przenikalność magnetyczna może być aproksymowana jako wartość stała.

W rzeczywistości naprężenia mechaniczne często nie są równoległe do kierunku pola magnesującego. Wyniki analizy szumów Barkhausena potwierdzają, że efektywne naprężenia normalne σ_{eff} wpływające na właściwości magnetyczne materiałów można wyznaczyć z zależności (3.5) [67].

Naprężenia efektywne σ_e wpływające na właściwości mechaniczne w przypadku naprężeń prostopadłych do pola magnesującego można zapisać zależnością (3.6).

Względną przenikalność magnetyczną dla izotropowego materiału magnetycznego można przedstawić następującym tensorem:

$$\mu_r = \begin{bmatrix} \mu_{ux} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{uy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{uz} \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

gdzie $\mu_r = \mu_{ux} = \mu_{uy} = \mu_{uz}$ – względna przenikalność magnetyczna materiału izotropowego magnetycznego nie obciążonego.

Zakładając analizę wyłącznie dla materiałów magnetycznych izotropowych poddanych naprężeniom normalnym można zapisać zależność wyrazów tensora względnej przenikalności magnetycznej od naprężeń:

$$\mu_{xx}(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}) = \mu_u + k\sigma_{xx} - vk\sigma_{yy} - vk\sigma_{zz} \quad (5.33)$$

$$\mu_{yy}(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}) = \mu_u + k\sigma_{yy} - vk\sigma_{xx} - vk\sigma_{zz} \quad (5.34)$$

$$\mu_{zz}(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}) = \mu_u + k\sigma_{zz} - vk\sigma_{xx} - vk\sigma_{yy} \quad (5.35)$$

Rzeczywiste naprężenia mechaniczne: naprężenia normalne σ i styczne τ [64] opisuje poniższy tensor.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Do tej pory nie został sformułowany model fizyczny, który by umożliwił rozpatrywanie jednocześnie wpływu zarówno naprężeń normalnych σ i naprężeń stycznych τ . Korzystając z wcześniejszych prac [88] można każdy tensor naprężeń przekształcić w tensor naprężeń normalnych σ' w obrocony układzie współrzędnych $X'Y'Z'$:

$$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma'_{X'} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma'_{Y'} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma'_{Z'} \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

gdzie X', Y', Z' są kierunkami głównymi, $\sigma'_{X'}$, $\sigma'_{Y'}$, $\sigma'_{Z'}$ naprężenia główne, czyli naprężenia normalne w obroconym układzie współrzędnych.

O tym jak układ współrzędnych $X'Y'Z'$ jest obrocony względem układu współrzędnych XYZ pokazuje macierz rotacji R złożona z cosinusów kąta między tymi układami:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(X', X) & \cos(X', Y) & \cos(X', Z) \\ \cos(Y', X) & \cos(Y', Y) & \cos(Y', Z) \\ \cos(Z', X) & \cos(Z', Y) & \cos(Z', Z) \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

W takim przypadku tensor przenikalności względnej obroconej μ'_r zależnej od naprężeń głównych σ' można zapisać następująco:

$$\mu'_r = \begin{bmatrix} \mu'(\sigma')_{X'} & 0 & 0 \\ 0 & \mu'(\sigma')_{Y'} & 0 \\ 0 & 0 & \mu'(\sigma')_{Z'} \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

gdzie:

$$\mu'(\sigma')_{X'} = \mu_u + k\sigma'_{X'} - vk\sigma'_{Y'} - vk\sigma'_{Z'} \quad (5.40)$$

$$\mu'(\sigma')_{Y'} = \mu_u + k\sigma'_{Y'} - vk\sigma'_{X'} - vk\sigma'_{Z'} \quad (5.41)$$

$$\mu'(\sigma')_{Z'} = \mu_u + k\sigma'_{Z'} - vk\sigma'_{X'} - vk\sigma'_{Y'} \quad (5.42)$$

Aby powiązać tensor przenikalności względnej obróconej $\mu'_r(\sigma')$ z tensorem przenikalności względnej $\mu_r(\sigma)$ należy obrócić go za pomocą macierzy rotacji R :

$$\mu_r(\sigma) = R\mu'_r(\sigma')R^T \quad (5.43)$$

Powyższy model umożliwia opis tensora przenikalności względnej oraz liniowe przybliżenie zależności naprężeń mechanicznych i względnej przenikalności magnetycznej. W modelu tym nie jest uwzględniona anizotropia materiałów magnetycznych.

Z wyżej przedstawionych modeli najbardziej odpowiednim do modelowania wpływu naprężeń na charakterystyki magnetyczne jest model Jalesa–Athertona. Ze względu na możliwość powiązania parametrów modelu z właściwościami fizycznymi i uwzględnienie anizotropii.

6. Metody identyfikacji parametrów modelu procesu magnesowania

W modelu Jilesa–Athertona, od momentu jego wprowadzenia, najbardziej kłopotliwą częścią jest metoda określania jego parametrów [99]. Najczęściej stosowane metody określenia parametrów modelu [3] polegają na różnych rodzajach optymalizacyjnej minimalizacji funkcji celu G , opisanej poniższą zależnością:

$$G = \sum_{n=1}^n (M_{calcJ-A}(H_i) - M_{meas}(H_i))^2 \quad (6.1)$$

gdzie $M_{calcJ-A}$ jest wynikiem modelowania, a M_{meas} są wynikami eksperymentalnych pomiarów magnetyzacji uzyskanych w polu magnesującym H_i . Wszystkie parametry modelu Jilesa–Athertona określone są dla ustalonej liczby pętli histerezy $B(H)$ zmierzonej dla różnych wartości amplitudy pola magnesującego H .

Wśród stosowanych metod minimalizacji funkcji celu należy wyróżnić takie jak optymalizację gradientową oraz różne odmiany strategii ewolucyjnych.

Algorytmy z rodziny metod optymalizacji gradientowych obejmują metody gradientu prostego [110], algorytm Newtona zwany również metodą optymalizacji Newtona–Raphsona oraz metodę gradientów sprzężonych. Metody te są znane jako efektywne przy poszukiwaniu minimum lokalnego. Wadą tych metod optymalizacji jest dochodzenie do lokalnego minimum, czego rezultatem są niesatysfakcjonujące rozwiązania parametrów modelu Jilesa–Athertona. Ponieważ funkcja G posiada liczne minima lokalne, optymalizacja gradientowa może być wykorzystana w fazie precyzyjnego wyznaczania parametrów modelu Jilesa–Athertona wokół lokalnych minimów funkcji docelowej G określonej innymi metodami.

Kolejną rodziną metod minimalizacji funkcji celu są strategie ewolucyjne. Strategie ewolucyjne to zestaw stochastycznych algorytmów stosowanych do optymalizacji funkcji ciągłych z lokalnymi minimami [4]. Takie strategie opierają się na uproszczonym modelu ewolucji. W przypadku strategii ewolucyjnej z populacji N wektorów reprezentujących możliwe rozwiązania, wybierany jest zestaw rodziców μ . Na podstawie rodziców potomkowie λ są generowani przy użyciu operatorów mutacji i krzyżowania. Operator mutacji związany jest ze zmianą losowo wybranej wartości wektora potomnego zgodnie z rozkładem normalnym, gdzie środkiem tego rozkładu jest poprzednia wartość. Operator krzyżowania tworzy wektor potomny na podstawie dwóch wektorów rodzicielskich, gdy część wektora jest pobierana od jednego rodzica, podczas gdy druga część jest pobierana od

drugiego rodzica. Następnie, w przypadku strategii $(\mu + \lambda)$, z zestawu rodziców μ i potomków λ wybierane są najlepsze wektory μ i wracają do populacji. W przypadku strategii (μ, λ) wybór ten jest dokonywany tylko wśród wektorów potomków λ . Zarówno $(\mu + \lambda)$ jak i (μ, λ) są metodami wyszukiwania globalnego, ale $(\mu + \lambda)$ została wybrana do znalezienia parametrów modelu Jilesa–Athertona, ponieważ nie traci obiecujących wyników podczas identyfikacji parametrów [6].

Kolejną metodą jest metoda ewolucji różnicowej. Algorytm ewolucji różnicowej [27] jest stosunkowo nowy wśród rodziny algorytmów ewolucyjnych. W ewolucji różnicowej przetwarzana jest populacja N osobników, będących wektorami liczb rzeczywistych. Algorytm jest iteracyjny. Przy każdej iteracji t populacja (grupa N osobników) z $t-1$ jest przekształcana przez operatorów genetycznych mutacji i krzyżowania. Następnie otrzymana populacja z t iteracji jest oceniana przez funkcję cel, która powinna być zminimalizowana. Algorytm zatrzymuje się po określonej liczbie pokoleń. Liczba pokoleń i wielkość populacji N są parametrami algorytmu.

Tym, co odróżnia algorytm ewolucji różnicowej od reszty rodziny, jest operator mutacji różnicowej. Podczas mutacji z bieżącej populacji tworzona jest populacja tymczasowa. Każda i -ty nowy osobnik v_i jest tworzony przez dodanie ważonej różnicy między wybranymi osobnikami do trzeciego osobnika. Ten schemat można zaimplementować na wiele sposobów. Przede wszystkim osobniki mogą być wybierane z populacji w zróżnicowany sposób oraz możliwe są różne warianty przekazywania informacji pomiędzy osobnikami. Dlatego istnieje wiele wersji algorytmu ewolucji różnicowej [81]:

– Algorytm ewolucji różnicowej 1:

W podstawowej wersji algorytmu “DE /rand/1/bin”, mutant v_i jest generowany przez dodanie przeskalowanej różnicy pomiędzy dwoma losowo wybranymi osobnikami x_{r1} i x_{r2} do trzeciego losowo wybranego osobnika x_{r0} :

$$v_i = x_{r0} + F(x_{r1} - x_{r2}) \quad (6.2)$$

gdzie $F \in (0,1)$ jest czynnikiem skalującym i jest parametrem algorytmu.

– Algorytm ewolucji różnicowej 2:

W wariantcie “DE/local-to-best/1/bin” mutant v_i jest wynikiem sumy: i -tego osobnika x_i , przeskalowanej różnicy najlepszego osobnika w bieżącej populacji x_{best} i x_i , przeskalowanej różnicy dwóch losowo wybranych osobników:

$$v_i = x_i + F(x_{best} - x_i) + F(x_{r1} - x_{r2}) \quad (6.3)$$

– Algorytm ewolucji różnicowej 3:

W trzecim wariacie „DE/best/1/bin” mutant v_i jest wynikiem sumy: najlepszego osobnika w bieżącej populacji x_{best} , składnika *jitter*, przeskalowanej różnicy dwóch losowo wybranych osobników:

$$v_i = x_{best} + jitter + F(x_{r1} - x_{r2}) \quad (6.4)$$

gdzie $jitter = 0,0001 * rand + F$, gdzie *rand* jest rzeczywistą liczbą losowo wybraną z przedziału $<0,1>$.

– Algorytm ewolucji różnicowej 4:

W czwartym wariacie „DE/rand/1/bin with per-vector-dither” mutant v_i poprzez dodanie przeskalowanej przez *dither* różnicy pomiędzy dwoma losowo wybranymi osobnikami x_{r1} i x_{r2} do trzeciego losowo wybranego osobnika x_{r0} :

$$v_i = x_{r0} + dither(x_{r1} - x_{r2}) \quad (6.5)$$

gdzie $dither = F + rand * (1-F)$.

– Algorytm ewolucji różnicowej 5:

Piąty wariant „DE/rand/1/bin with pergeneration-dither” jest podobny do czwartego wariantu, ale wartość *dither* jest obliczana tylko raz na pokolenie.

– Algorytm ewolucji różnicowej 6:

W szóstym wariacie „DE/current-to-p-best/1” zamiast najlepszego rozwiązania wybierany jest osobnik losowo wybrany ze zbioru $10 \cdot p \cdot problem\ size$, najlepszych rozwiązań (*pbest*), gdzie $p = 0,2$ jest parametrem algorytmu, a *problem size* to liczba parametrów do optymalizacji:

$$v_i = x_i + F(x_{pbest} - x_i) + F(x_{r1} - x_{r2}) \quad (6.6)$$

Po mutacji wykonywane jest krzyżowanie. Do generowania każdego i-tego osobnika próbnego u_i używana jest para osobników x_i i v_i , gdzie x_i jest i-tym osobnikiem starej populacji (rodzicem), a v_i jest i-tym osobnikiem z populacji tymczasowej (mutantem). Aby

wykonać krzyżowanie, najpierw losowo wybierany jest indeks j potomka. Począwszy od tego indeksu ciąg wartości v_i jest kopiowany do u_i , aż do momentu, gdy losowo wybrana liczba rzeczywista (od $<0,1>$) jest mniejsza niż prawdopodobieństwo krzyżowania (CR), co jest parametrem algorytmu. Reszta wektora u_i jest kopiowana z x_i . Z tego wynika, że ustawienie $CR = 1$ oznacza, że $u_i = v_i$.

Po krzyżowaniu populację próbną ocenia się według funkcji jakości. Następnie dokonywana jest selekcja. i -te miejsce w nowej populacji zostanie zajęte przez u_i , jeśli jego jakość nie jest gorsza niż jakość x_i , w przeciwnym razie zostanie użyta x_i .

7. Przedmiot badań

Przedmiotem badań realizowanych w pracy były próbki z materiałów ferromagnetycznych stosowanych w konstrukcjach mechanicznych. Materiały te są wykorzystywane między innymi do budowy konstrukcji mostów, słupów energetycznych, kotłów wysokociśnieniowych itp. Badania wykonano na próbkach ze stali 13CrMo4-5 i X30Cr13.

7.1. Właściwości fizykochemiczne i mechaniczne stali X30Cr13

Stal X30Cr13 jest stalą martenzytyczną o podwyższonej odporności na korozję. Powszechnie stal ta w Polsce występuje pod nazwą 3H13 według polskiej normy. Skład stali X30Cr13 według poszczególnych norm EN 10088/1–3:1995 i PN–71/H–86020 zamieszczono w tabeli 7.1.

Tab. 7.1. Skład stali X30Cr13 oraz jej odpowiedników [117].

Norma	Oznaczenie stali	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni
PN	3H13	0,26 0,35	max 0,8	max 0,8	max 0,04	max 0,015	max 0,3	12,00 14,00	max 0,6
EN	X30Cr13	0,26 0,35	max 1,5	max 1,00	max 0,04	max 0,03	–	12,00 14,00	–

Tab. 7.2. Właściwości fizyczne stali X30Cr13 [117].

Gęstość	Moduł sprężystości	Przewodność cieplna	Twardość HV
kg/dm ³	GPa	W/mK	HB
7,7	215	30	235

Tab. 7.3. Właściwości mechaniczne stali X30Cr13 [117].

Wytrzymałość na rozciąganie R_m	MPa	800 – 1000
Granica plastyczności R_e	MPa	>600

Właściwości fizyczne X30Cr13 przedstawiono w tabeli 7.2. Wartość modułu sprężystości E wynosi 215 GPa. Właściwości mechaniczne stali X30Cr13 przedstawiono w tabeli 7.3. Wytrzymałość na rozciąganie R_m osiąga wartość maksymalną 1000 MPa, a granica plastyczności R_e wynosi ponad 600 MPa.

7.2. Właściwości fizykochemiczne i mechaniczne stali 13CrMo4-5

Stal 13CrMo4-5 jest stalą konstrukcyjną stopową chromowo–molibdenową, przeznaczoną do pracy przy podwyższonych temperaturach. Powszechnie w Polsce stal ta występuje pod nazwą 15HM według polskiej normy. Skład stali według poszczególnych norm zamieszczono w tabeli 7.4.

Tab. 7.4. Skład stali 13CrMo4-5 oraz jej odpowiedników [116].

Nor ma	Oznaczenie stali	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	inne
PN	15HM	0,11 0,18	0,40 0,70	0,15 0,35	max 0,040	max 0,040	max 0,25	0,70 1,00	max 0,35	0,40 0,55	Al max 0,020
EN	13CrMo4-5	0,10 0,17	0,40 0,70	max 0,35	max 0,025	max 0,025	max 0,30	0,70 1,15	max 0,30	0,40 0,60	Al max 0,040
DIN	13CrMo44	0,08 0,15	0,44 0,70	0,17 0,37	max 0,035	max 0,035	max 0,30	0,40 0,70	max 0,03	0,40 0,55	

Stal 13CrMo4-5 charakteryzuje się właściwościami fizycznymi zebranymi w tabeli 7.5. Wartość modułu sprężystości E wynosi 210 GPa. Właściwości mechaniczne stali 13CrMo4-5 przedstawiono w tabeli 7.5. Wytrzymałość na rozciąganie R_m osiąga wartość maksymalną 600 MPa, a granica plastyczności R_e wynosi 300 MPa.

Tab. 7.5. Właściwości fizyczne stali 13CrMo4-5 [116]

Gęstość	Moduł sprężystości	Przewodność cieplna	Twardość HV
kg/dm ³	GPa	W/mK	HB
7,85	210	33	225

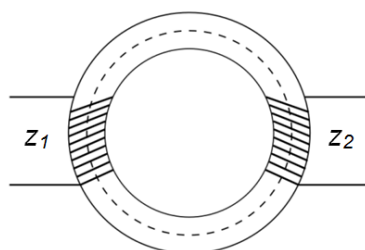
Tab. 7.6. Właściwości mechaniczne stali 13CrMo4-5 [116]

Wytrzymałość na rozciąganie R_m	MPa	430 – 600
Granica plastyczności R_e	MPa	255–300

8. Metodyka badań

8.1. Założenia dotyczące metodyki badań

Z rozdziału 3.7.2 wynika, że najlepszą próbką do badań właściwości magnetoelastycznych będzie próbka ramkowa. Jednak w celu uniezależnienia się od wpływu kształtu próbki i wpływu kierunku walcowania do wstępnych badań zastosowano standardowy kształt próbki – jakim jest próbka pierścieniowa przedstawiona na rysunku 8.1. Ponadto można uznać, że wyniki badania właściwości magnetycznych wykonane na próbkach pierścieniowych są magnetycznymi parametrami materiałowymi.



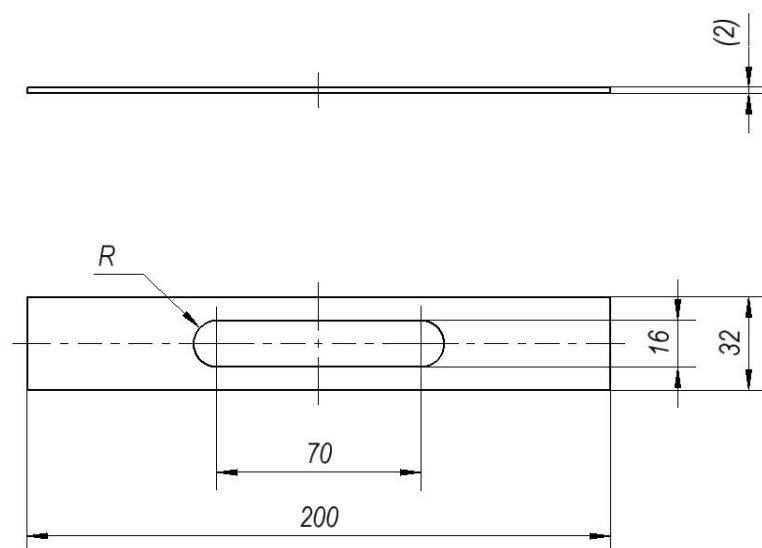
Rys. 8.1. Uzwojona próbka pierścieniowa do badań właściwości magnetycznych stali (Z_1 – uzwojenie magnesujące, Z_2 – uzwojenie pomiarowe, l_e – magnetowód).

W celu realizacji specjalistycznych badań doświadczalnych własności magnetoelastycznych $B(+\sigma, H)$ badanych materiałów opracowano, a następnie zweryfikowano nową metodykę badań [44], [49], [50], [58]. Opracowana metodyka badawcza powinna zapewnić określone warunki zarówno w odniesieniu do układu obciążenia mechanicznego próbki jak i do pomiaru właściwości magnetoelastycznych.

W odniesieniu do wymuszenia pola magnesującego H oraz pomiaru indukcji należało zapewnić zamknięty magnetowód uzwojonej próbki w warunkach działania naprężeń od sił zewnętrznych. Natomiast sposób obciążania mechanicznego powinien zapewnić taki sposób przyłożenia siły zewnętrznej do uzwojonej próbki, ażeby uzyskać w próbce jednorodny rozkład naprężeń wzdłuż całego magnetowodu. Z kolei kierunek działania tych naprężeń powinien być zgodny z kierunkiem pola magnesującego.

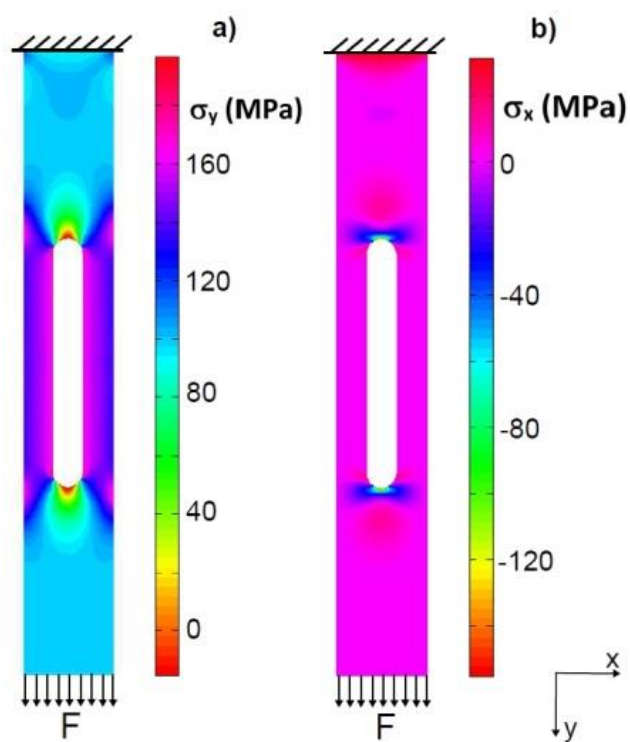
Analiza omówionych metod w rozdziale 3.7.2 wykazała, że nie znajdują one zastosowania do przewidzianych w pracy badań, ponieważ w pracy należało zbadać stan naprężeń w stalowych elementach konstrukcyjnych, które najczęściej są wytwarzane w formie płaskowników czy też profili. Z tego względu do badań realizowanych w pracy

zastosowano nowy kształt próbki ramkowej pokazanej na rysunku 8.2, zapewniającej możliwość uzwojenia i wprowadzania naprężeń rozciągających od siły zewnętrznej.

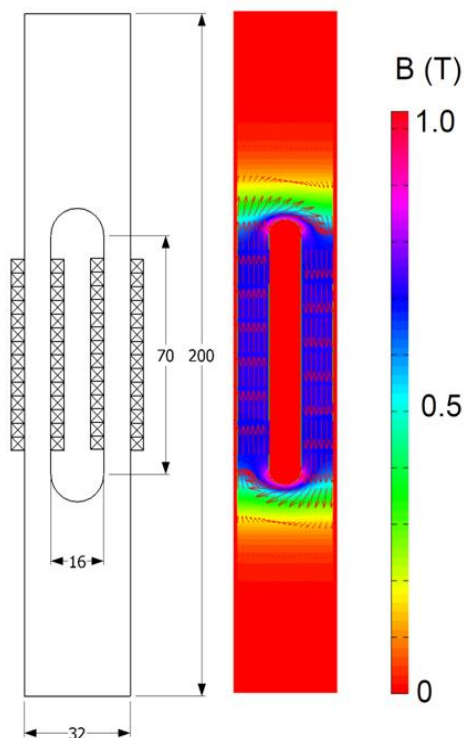


Rys. 8.2. Próbką ramkowa wykonana z blachy stalowej [44].

W pracy zaproponowano próbkę ramkową zapewniającą możliwość uzwojenia i wprowadzania naprężeń rozciągających od siły zewnętrznej. W celu weryfikacji rzeczywistego rozkładu naprężeń w badanej próbce dokonano analizy MES (metoda elementów skończonych) przedstawionej na rysunkach 8.3 i 8.4. Wyniki analizy rozkładu naprężeń potwierdziły jednorodny rozkład wzdłuż dominującej części magnetowodu. Następnie dokonano również analizy gęstości strumienia magnetycznego w badanej próbce. Funkcjonalne materiały magnetycznie miękkie takie jak magnetyki ceramiczne – ferryty, stopy amorficzne, czy też stopy nanokrystaliczne charakteryzują się znacznie wyższą przenikalnością niż materiały badane w pracy. Z tego względu przy pomiarach ich właściwości magnetycznych nie ma zagrożenia do rozproszenia strumienia magnetycznego. W odniesieniu do badanych próbek na podstawie analizy MES rozkładu strumienia magnetycznego uznano, że w celu uniknięcia rozproszenia strumienia magnetycznego badaną próbkę należy uzwoić symetrycznie na obu kolumnach.



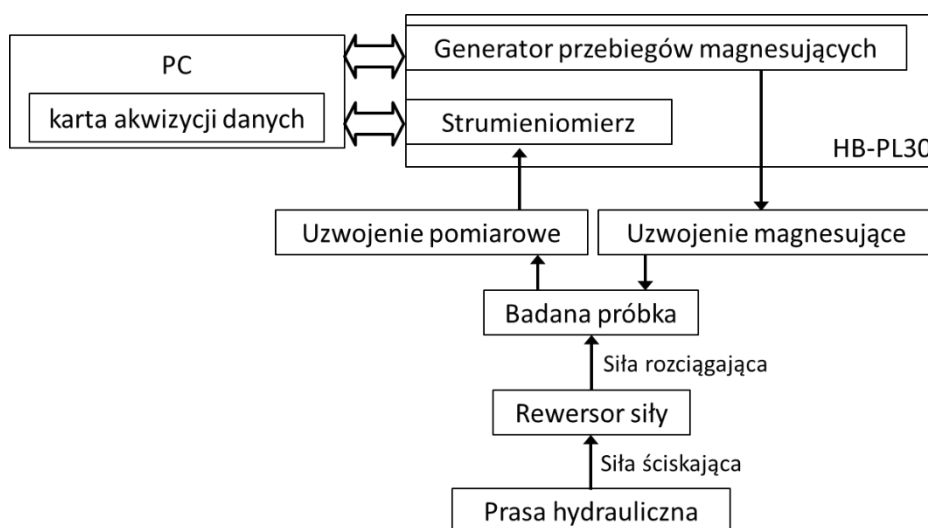
Rys. 8.3. Rozkład naprężeń rozciągających w ramkowej próbce: a) rozkład naprężeń rozciągających w kierunku normalnym y , b) rozkład naprężeń rozciągających w kierunku prostopadłym x [50].



Rys. 8.4. Rozkład gęstości strumienia magnetycznego w symetrycznie magnesowanej próbce ramkowej [49].

8.2. Stanowisko do pomiaru właściwości magnetoelastycznych

Na potrzeby niniejszej pracy opracowano stanowisko badawcze, przedstawione na rysunku 8.5, obejmujące zarówno część mechaniczną zadawania obciążenia do próbki jak również część elektryczną związaną bezpośrednio z pomiarem właściwości magnetycznych i magnetoelastycznych.



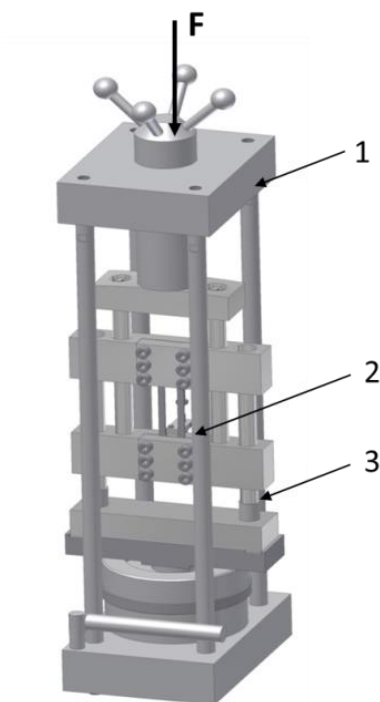
Rys. 8.5. Schemat blokowy stanowiska badawczego [49].

Układ obciążenia mechanicznego zawiera prasę hydrauliczną z czujnikiem do pomiaru siły obciążającej oraz mechanicznym rewersorem siły. Rewersor siły ma na celu konwersję siły ściskającej zadawanej na prasie na siłę rozciągającą działającą bezpośrednio na badaną próbkę. Układ obciążenia mechanicznego przedstawiono na rysunku 8.6, a rewersor siły na rysunku 8.7.

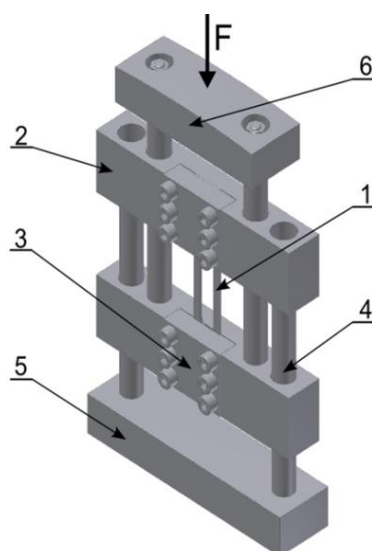
W zakresie pomiaru właściwości magnetycznych stanowisko zawiera histerezograf HB-PL30 współpracujący z komputerem PC oraz uzwojoną próbką. W skład systemu wchodzi trzy podstawowe bloki. Pierwszy to blok źródła przebiegów magnesujących obejmujący generator przebiegów magnesowania, rozmagnesowania, przebiegu polaryzacji oraz generator impulsów synchronizacji wewnętrznej. Drugi zespół magnesowania próbek składa się z woltomierza systemowego, układu pomiaru natężenia pola magnesującego, układu pomiaru temperatury oraz precyzyjnego przetwornika napięcie-prąd. Trzeci blok, pomiaru indukcji, zawiera integrator pomiarowy, woltomierz systemowy oraz blok autokompensacji.

Integracja oraz sterowanie systemem realizowane jest za pośrednictwem komputera klasy PC. System daje możliwość pomiaru charakterystyk quasistatycznych i dynamicznych.

Charakterystyki quasistatyczne są mierzone przy liniowo zmieniającym się natężeniu pola magnesującego H przy zadanej szybkości zmian tego pola. Charakterystyki dynamiczne mierzone są przy przemagnesowaniu próbki polem magnesującym o zadanej częstotliwości f , kształcie przebiegu oraz amplitudzie.



Rys. 8.6. Układ obciążenia mechanicznego: F – siła ściskająca, zadawana na prasie hydraulicznej; 1 – prasa hydrauliczna, 2 – badana próbka, 3 – rewersor [50].

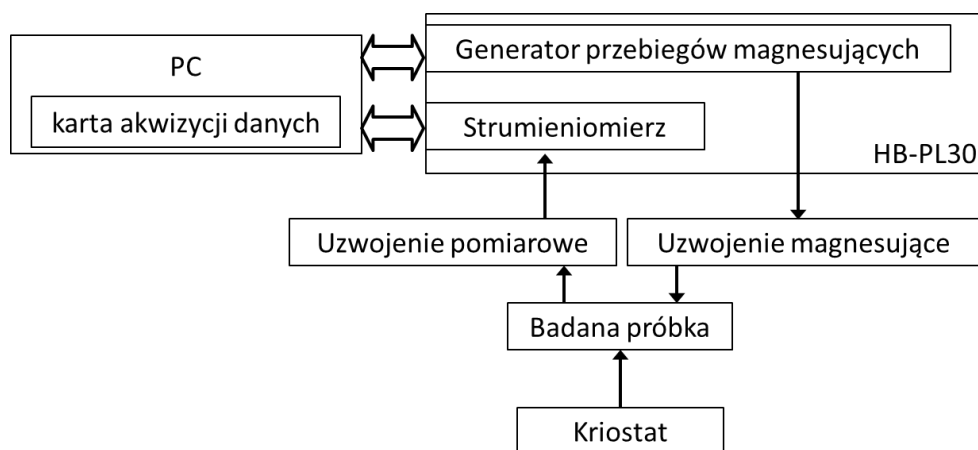


Rys. 8.7. Mechaniczny rewersor siły: F – zadawana siła ściskająca, 1 – badana próbka ramkowa, 2 – szczeka stała, 3 – mocowanie próbki, 4 – kolumny, 5 – podstawa stała, 6 – podstawa ruchoma [49].

System HB-PL30 umożliwia pomiar wspomnianych charakterystyk dla zadanej próbki. W trakcie jednego cyklu pomiarowego system może zmierzyć maksymalnie 64 punkty pomiarowe jako cząstkowe pętle histerezy $B(H)$. System zapewnia rozmagnesowanie próbki polem sinusoidalnym malejącym o zadanej częstotliwości i dekrementie tłumienia. Rozmagnesowanie takie jest wykonywane przed pomiarem każdej pętli histerezy.

8.3. Stanowisko do pomiaru charakterystyk temperaturowych

W pracy opracowano stanowisko badawcze do pomiaru charakterystyk temperaturowych przedstawione na rysunku 8.8. Stanowisko obejmowało część termostatyczną do zadawania temperatury oraz układ związany bezpośrednio z pomiarem właściwości magnetycznych.



Rys. 8.8. Schemat blokowy stanowiska badawczego do pomiaru charakterystyk temperaturowych [48].

Układ do zadawania temperatury składa się z kriostatu oraz termometru do pomiaru temperatury próbki. Do pomiaru temperatury wykorzystano termoparę współpracującą z multimetrem Appa 207.

Blok pomiarowy właściwości magnetycznych, zawierający histerezograf HB-PL30 oraz uzwojoną próbkę, został opisany w rozdziale 8.2.

9. Wyniki badań

W rozdziale przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych dla próbki pierścieniowej i ramkowej wykonanych ze stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5. Właściwości fizykochemiczne stali X30Cr13 zostały opisane w rozdziale 7.1, a 13CrMo4-5 zostały opisane w rozdziale 7.2.

Jako pierwsze wykonano badanie wpływu częstotliwości przebiegu magnesującego na właściwości magnetyczne stali 13CrMo4-5 i stali X30Cr13. Z charakterystyk wynika, że najważniejsze są badania przy małych częstotliwościach przebiegu magnesującego 0,1 Hz. Przy wyższej częstotliwości straty spowodowane przez prądy wirowe mają duży wpływ na wynik pomiaru [57].

Następnie wykonano badania właściwości magnetycznych stali 13CrMo4-5 i stali X30Cr13 na próbce pierścieniowej w temperaturze otoczenia (ok. 20 °C). Badania te obejmowały następujące charakterystyki: pętle histerezy magnetycznej $B(H)$, zależność indukcji magnetycznej od natężenia pola magnesującego $B_m(H_m)$, zależność przenikalności względnej od natężenia pola magnesującego $\mu_r(H_m)$, zależność pola koercji od natężenia pola magnesującego $H_c(H_m)$, zależność indukcji remanencji od natężenia pola magnesującego $B_r(H_m)$.

Badania na próbce ramkowej podzielono na cztery etapy. Pierwszy etap badań obejmował pomiary charakterystyk magnetycznych: pętli histerezy magnetycznej $B(H)$, zależność indukcji magnetycznej od natężenia pola magnesującego $B_m(H_m)$ zależność przenikalność względnej od natężenia pola magnesującego $\mu_r(H_m)$, zależność pola koercji od natężenia pola magnesującego $H_c(H_m)$, zależność indukcji remanencji od natężenia pola magnesującego $B_r(H_m)$ dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5 w temperaturze otoczenia (ok. 20 °C). Drugi etap badań koncentrował się na pomiarach właściwości magnetycznych w funkcji naprężeń: pętli histerezy magnetycznej przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $B(H)_\sigma$, zależności indukcji magnetycznej maksymalnej od naprężeń rozciągających $B_m(\sigma)_{Hm}$, zależności względnej przenikalności amplitudowej od naprężeń rozciągających $\mu_r(\sigma)_{Hm}$, dla próbki ramkowej w temperaturze otoczenia. Następny etap badań obejmował pomiary charakterystyk temperaturowych: pętli histerezy magnetycznej przy ustalonych wartościach temperatury $B(H)_T$, zależności indukcji magnetycznej maksymalnej od temperatury $B_m(T)_H$, zależności względnej przenikalności amplitudowej od temperatury $\mu_r(T)_{Hm}$ dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5. Ostatni etap badań obejmował pomiary właściwości magnetycznych w funkcji naprężeń dla próbek ramkowych po procesie „step cooling”: pętli histerezy magnetycznej przy ustalonych

wartościach naprężeń rozciągających $B(H)_\sigma$, zależności indukcji magnetycznej maksymalnej od naprężeń rozciągających $B_m(\sigma)_{Hm}$, zależności względnej przenikalności amplitudowej od naprężeń rozciągających $\mu_r(\sigma)_{Hm}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5 w temperaturze otoczenia.

9.1. Charakterystyki magnetyczne próbek pierścieniowych

Próbkę pierścieniową uzwojono równomiernie uzwojeniem pomiarowym i magnesującym. Uzwojenia podłączono do wyjścia i wejścia histerezografu HB-PL30. Dane parametry próbki podano w tabeli 9.1.

Tab. 9.1 Parametry próbki pierścieniowej

l_e – średnia droga magnetyczna	S_e – przekrój poprzeczny	z_1 – uzwojenie magnesujące	z_2 – uzwojenie pomiarowe
12,6 cm	0,2 cm ²	350 zwoje	100 zwoje

Pomiar właściwości magnetycznych stali X30Cr13 na próbce pierścieniowej wykonano przy parametrach podanych w tabeli 9.2.

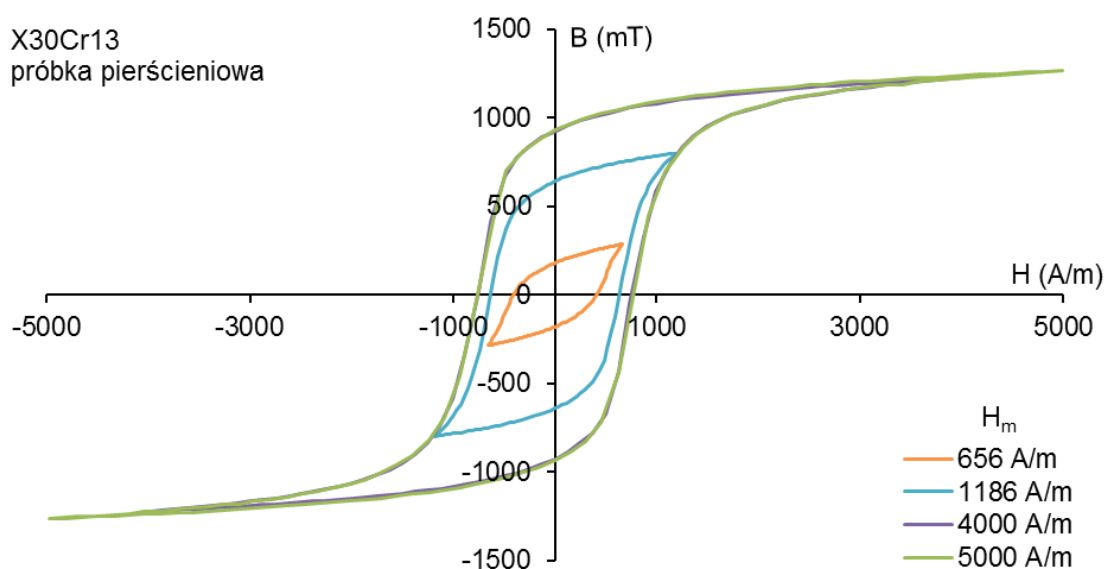
Tab. 9.2. Parametry pomiaru charakterystyk magnetycznych próbek pierścieniowych

Parametry pomiaru:	
• Typ charakterystyk $f(H_m)$:	dynamiczne;
• Pętle histerezy:	symetryczne;
• Magnesowanie próbki:	prądowe;
• Temperatura próbki:	20 °C;
Parametry przebiegu magnesującego:	
• Kształt przebiegu pola $H(t)$:	trójkąt;
• Max. amplituda pola magnesującego H_{max} :	5000 A/m;
• Częstotliwość f :	0,1 Hz;
Parametry przebiegu rozmagnesowania:	
• Max. amplituda pola rozmagnesowania H_{rmax} :	5000 A/m;
• Częstotliwość przebiegu rozmagnesującego f_{rozm} :	20 Hz;
• Współczynnik tłumienia:	1,04.

9.1.1. Wyniki dla stali X30Cr13

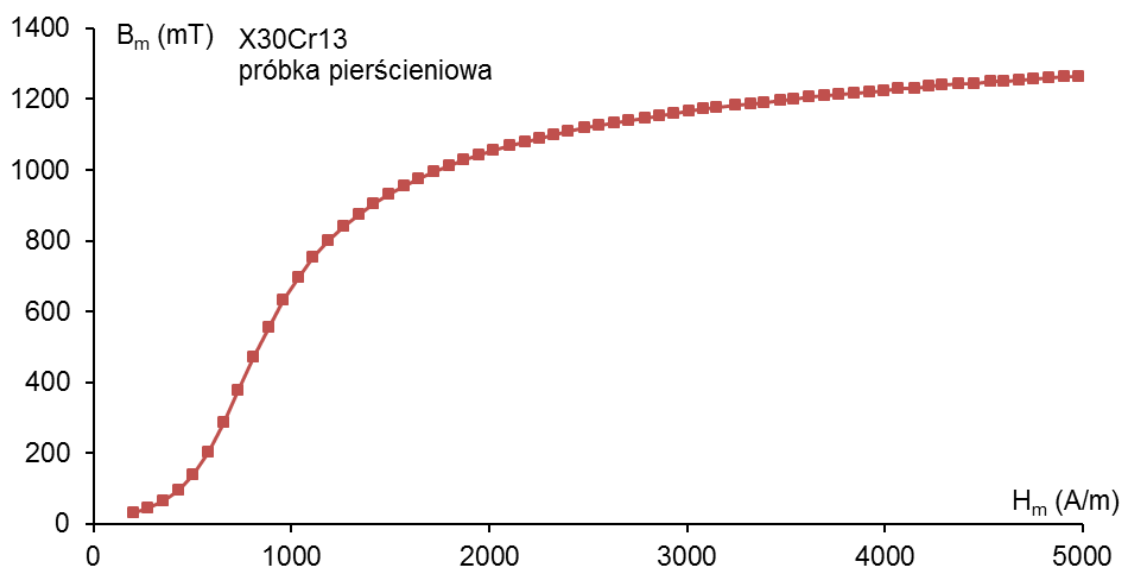
W rozdziale przedstawiono wyniki pomiaru charakterystyk magnetycznych próbki pierścieniowej wykonanej ze stali X30Cr13.

Na rysunku 9.1 przedstawiono pętle histerezy $B(H)$ dla próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13 dla różnych maksymalnych wartości amplitudy pola magnesującego.



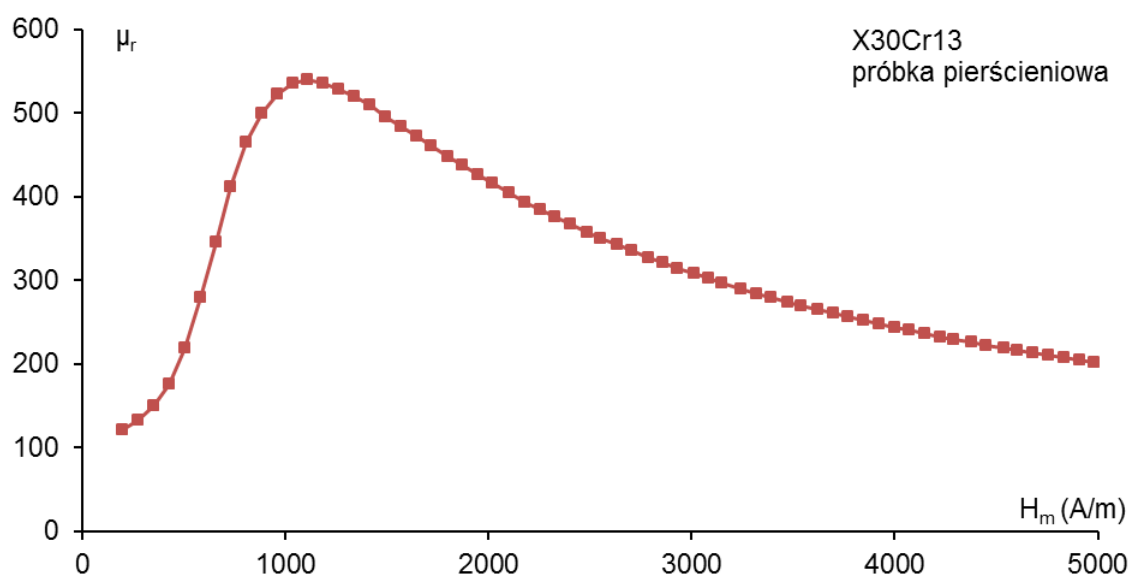
Rys. 9.1. Wybrane pętle histerezy $B(H)$ próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13 przy ustalonych wartościach natężenia pola magnesującego H_m

Na rysunku 9.2 przedstawiono zależność indukcji maksymalnej B_m od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13.



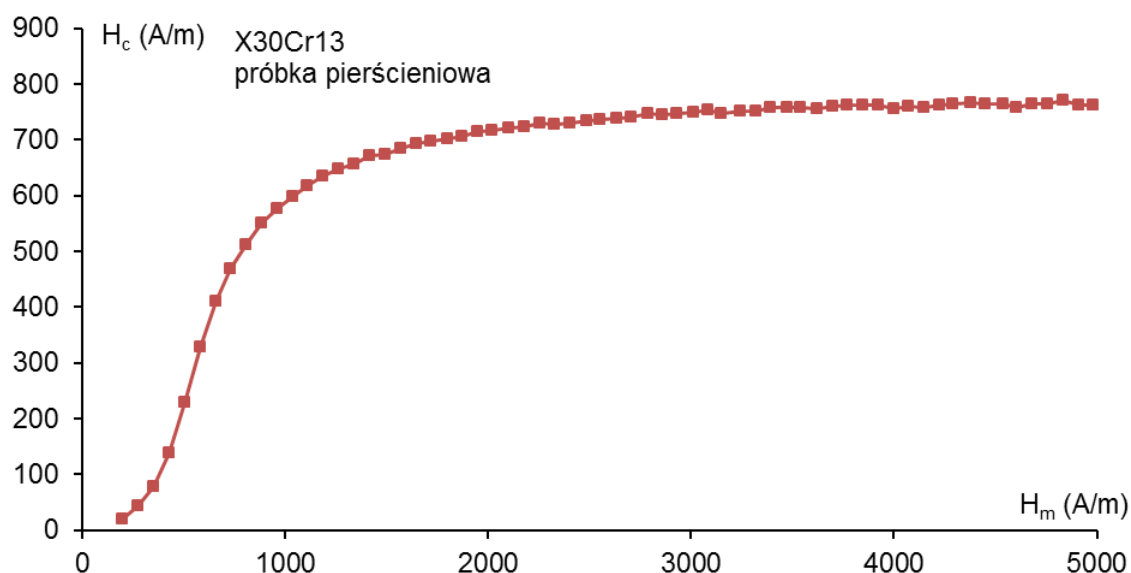
Rys. 9.2. Zależność indukcji maksymalnej B_m od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.3 przedstawiono zależność względnej przenikalności amplitudowej μ_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13.



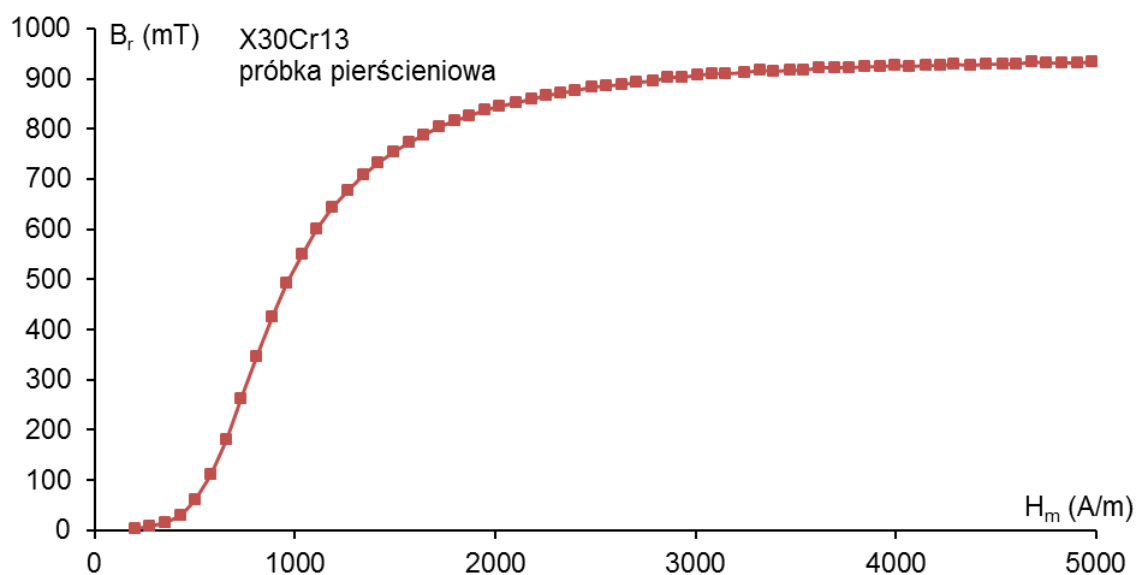
Rys. 9.3. Zależność przenikalności amplitudowej μ_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.4 przedstawiono zależność natężenia pola koercji H_c w funkcji amplitudy natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13.



Rys. 9.4. Zależność natężenia pola koercji H_c od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.5 przedstawiono zależność indukcji remanencji B_r od amplitudy natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13.



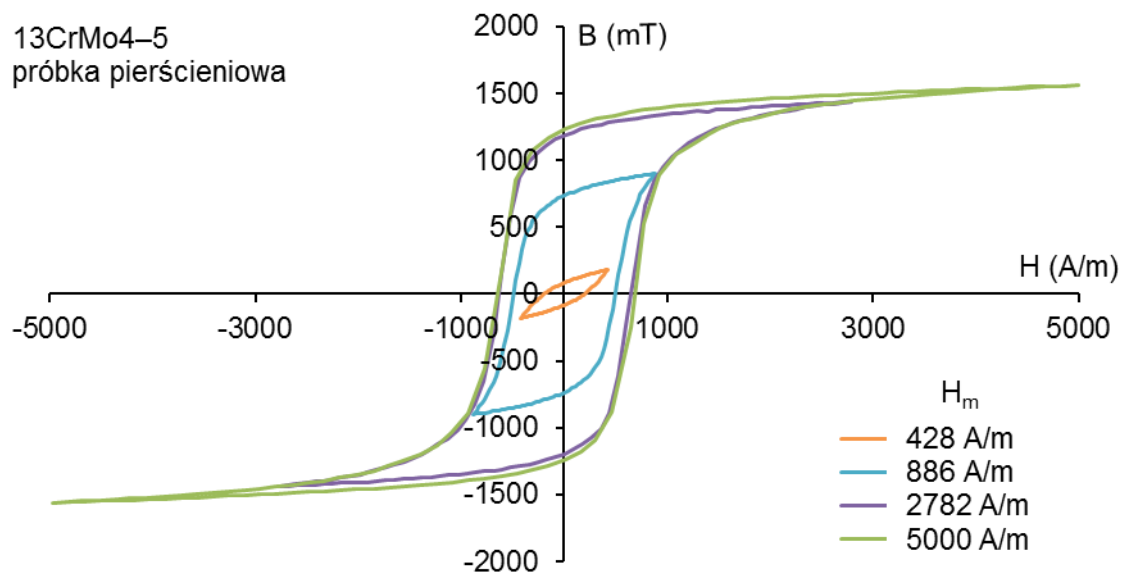
Rys. 9.5. Zależność indukcji remanencji B_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali X30Cr13

Wykonane pomiary właściwości magnetycznych potwierdziły, że stal X30Cr13 jest ferromagnetykiem magnetycznie miękkim.

9.1.2. Wyniki dla stali 13CrMo4-5

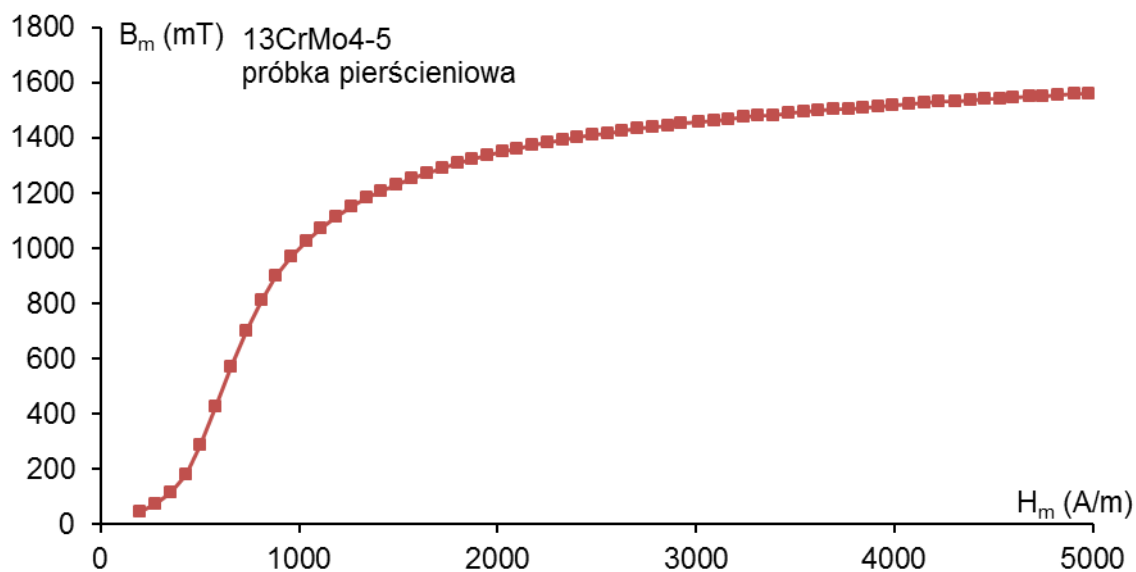
W rozdziale przedstawiono wyniki pomiaru charakterystyk magnetycznych próbki pierścieniowej wykonanej ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 9.6 przedstawiono rodzinę pętli histerezy $B(H)$ przy ustalonych maksymalnych wartościach pola magnesującego dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5.



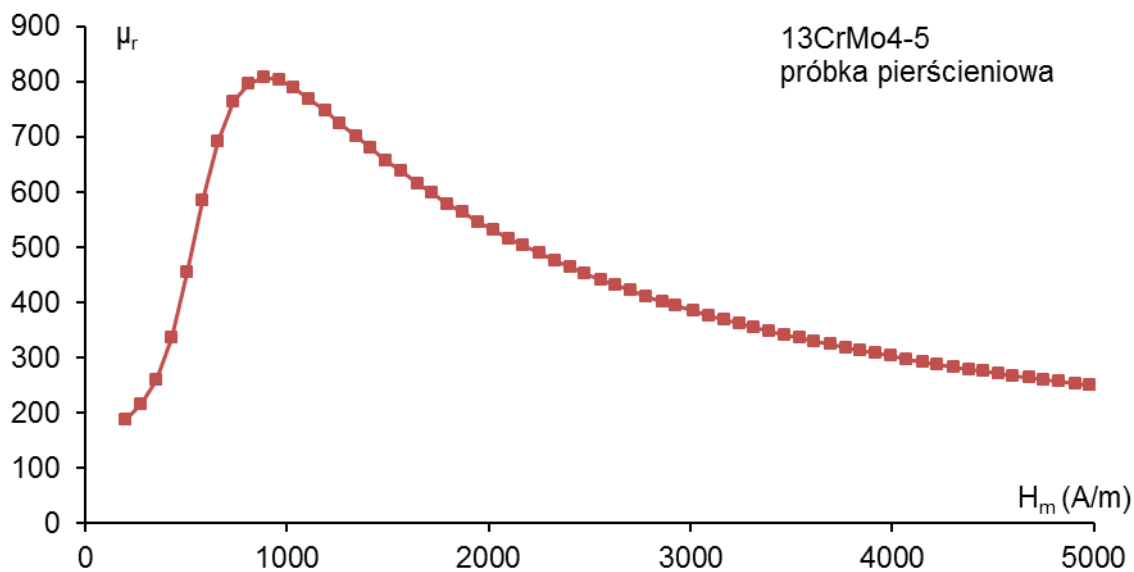
Rys. 9.6. Rodzina pętli histerezy $B(H)$ przy ustalonych wartościach natężenia pola magnesującego H_m dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.7 przedstawiono zależność indukcji maksymalnej B_m od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5.



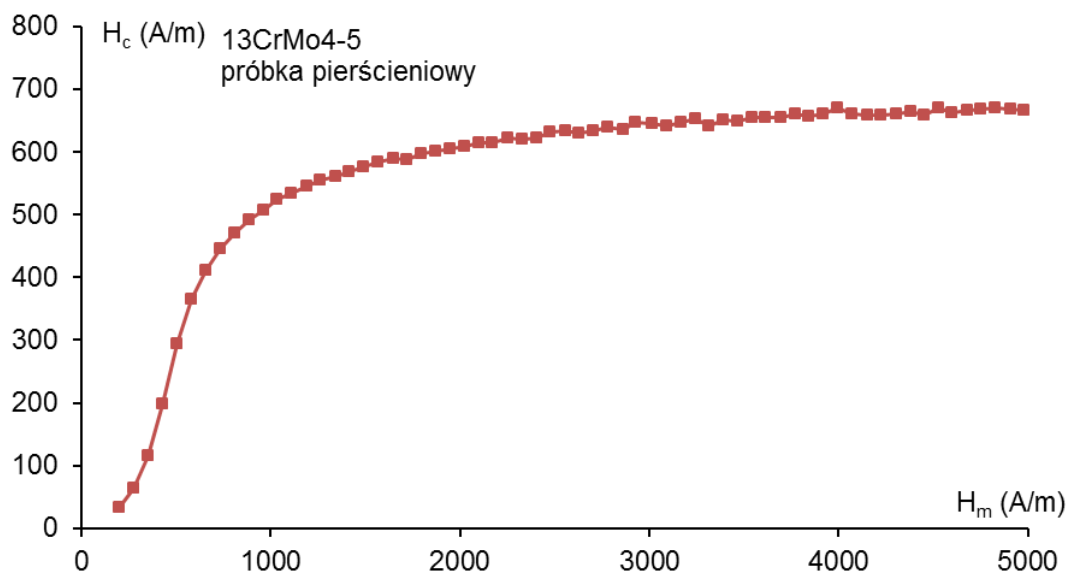
Rys. 9.7. Zależność indukcji maksymalnej B_m od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.8 przedstawiono zależność względnej przenikalności amplitudowej μ_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5.



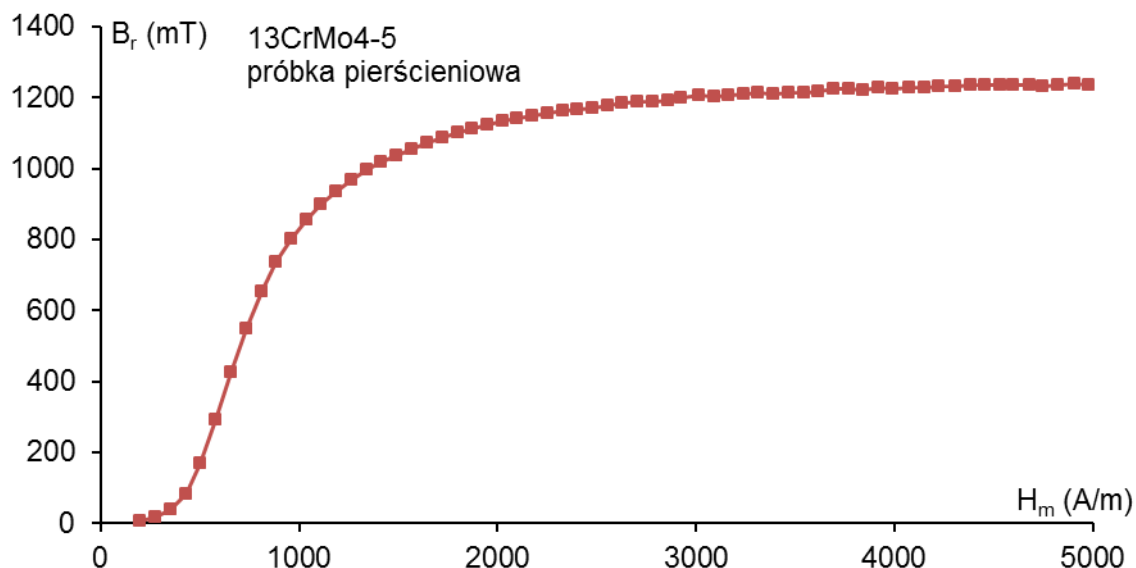
Rys. 9.8. Zależność przenikalności amplitudowej μ_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.9 przedstawiono zależność natężenia pola koercji H_c w funkcji amplitudy natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 9.9. Zależność natężenia pola koercji H_c od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.10 przedstawiono zależność indukcji remanencji B_r od amplitudy natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 9.10. Zależność indukcji remanencji B_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki pierścieniowej ze stali 13CrMo4-5

Wykonane pomiary właściwości magnetycznych potwierdziły, że stal 13CrMo4-5 jest ferromagnetykiem magnetycznie miękkim.

9.1.3. Wnioski

Wyniki badań właściwości magnetycznych potwierdziły, że stal X30Cr13 i stal 13CrMo4-5 są materiałami ferromagnetycznymi magnetycznie miękkimi.

Tab. 9.3. Wartości wybranych parametrów magnetycznych materiałów magnetycznie miękkich: stali X30Cr13 i 13CrMo4-5, ferrytu FG1, taśmy amorficznej METGLAS [113]

Parametr	X30Cr13	13CrMo4-5	Stal transformatorowa	Ferryt	METGLAS
Maks. przenikalność amplitudowa μ_r	539	807	9000	7000	300000
Maks. indukcja magnetyczna B_m w nasyceniu (mT)	1264	1560	1970	315	1600
Pole koercji H_c w nasyceniu (A/m)	763	600	40	12	2,2
Indukcja remanencji B_r w nasyceniu (mT)	933	1237	1724	100	1395

W tabeli 9.3 zestawiono wybrane parametry dla zróżnicowanych materiałów magnetycznie miękkich. Do porównania wybrano trzy klasyczne materiały magnetyczne: stal transformatorowa – stal krzemowa izotropowa (4.05% Si, 0,015% C), magnetyk ceramiczny –

ferryt ($\text{Mn}_{0.51}\text{Zn}_{0.44}\text{Fe}_{2.05}\text{O}_4$) oraz materiał magnetyczny METGLAS ($\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$) w stanie amorficznym.

Z analizy tabeli 9.3 wynika pewne zróżnicowanie stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5 w odniesieniu do klasycznych materiałów magnetycznie miękkich takich jak stal transformatorowa, ferryt czy magnetyk amorficzny. W przypadku badanych stali natężenie pola koercji H_c jest kilkadziesiąt razy większe od pola koercji ferrytu czy taśmy amorficznej. Jest to oczywiste, ponieważ ferryty i taśmy amorficzne są funkcjonalnymi materiałami magnetycznie miękkimi w odniesieniu do zastosowań w podzespołach magnetycznych. Natomiast badane stale są również materiał funkcjonalnym, ale w doniesieniu do zastosowań konstrukcyjnych. Pomimo, że właściwości magnetyczne stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5 odbiegają od właściwości magnetycznych klasycznych materiałów magnetycznych takich jak ferryty, stale transformatorowe czy też taśmy amorficzne, to są jednak istotne ze względu na potencjalne wykorzystanie ich do oceny stanu naprężeń konstrukcji.

Po weryfikacji właściwości magnetycznych na próbkach pierścieniowych, w których kształt próbki nie wpływa na właściwości magnetyczne należy wyznaczyć charakterystyki magnetyczne na próbkach ramkowych. Tak uzyskane wyniki można odnieść do wyników uzyskanych na próbkach pierścieniowych.

9.2. Charakterystyki magnetyczne próbek ramkowych

W każdym etapie próbkę ramkową uzwojono symetrycznie uzwojeniami pomiarowymi i magnesującymi. Uzwojenia podłączono do wyjścia i wejścia histerezo grafu HB-PL30. Dane parametry próbki podano w tabeli 9.4.

Tab. 9.4. Parametry magnetyczne próbki ramkowej.

l_e – średnia droga magnetyczna	S_e – przekrój próbki	z_1 – uzwojenie magnesujące	z_2 – uzwojenie pomiarowe
cm	cm^2	zwoje	zwoje
17,6	0,1896	500	200

Pomiar właściwości magnetycznych na próbce ramkowej wykonano przy parametrach podanych w tabeli 9.5.

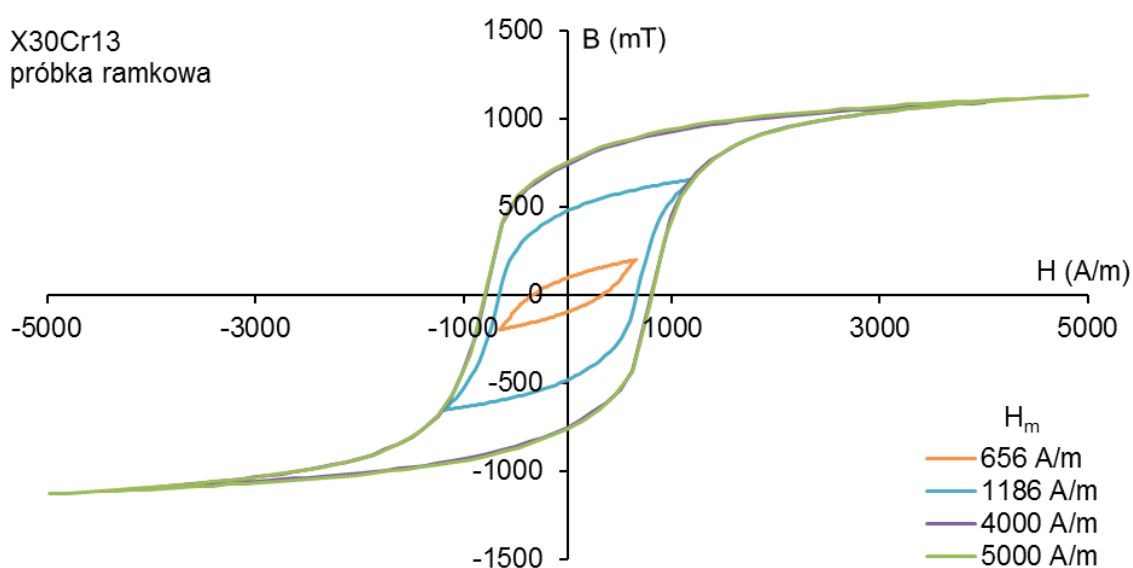
Tab. 9.5. Parametry pomiaru charakterystyk magnetycznych próbek ramkowych.

Parametry pomiaru:	
• Typ charakterystyk $f(H_m)$:	dynamiczne;
• Pętle histerezy:	symetryczne;
• Magnesowanie próbki:	prądowe;
• Temperatura próbki:	20 °C;
Parametry przebiegu magnesującego:	
• Kształt przebiegu pola $H(t)$:	trójkąt;
• Max. amplituda pola magnesującego H_{max} :	5000 A/m;
• Częstotliwość f :	0,1 Hz;
Parametry przebiegu rozmagnesowania:	
• Max. amplituda pola rozmagnesowania H_{rmax} :	5000 A/m;
• Częstotliwość przebiegu rozmagnesującego f_{rozm} :	20 Hz;
• Współczynnik tłumienia:	1,04.

9.2.1. Wyniki dla stali X30Cr13

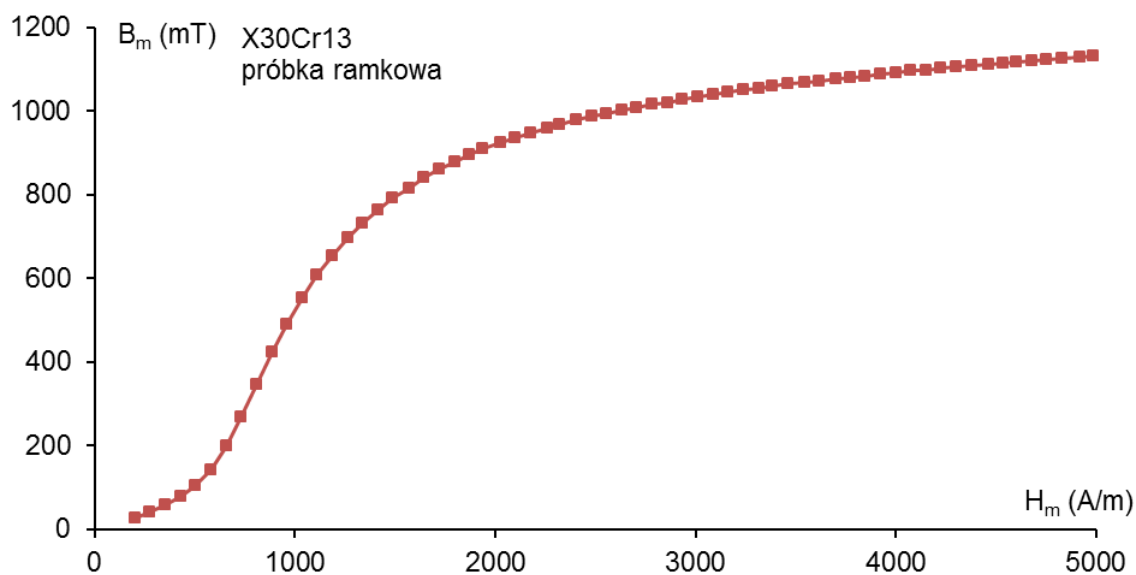
W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki pomiaru charakterystyk magnetycznych próbki ramkowej wykonanej ze stali X30Cr13.

Na rysunku poniżej 9.11 przedstawiono rodzinę pętli histerezy $B(H)$ przy ustalonych maksymalnych wartościach natężenia pola magnesującego H dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



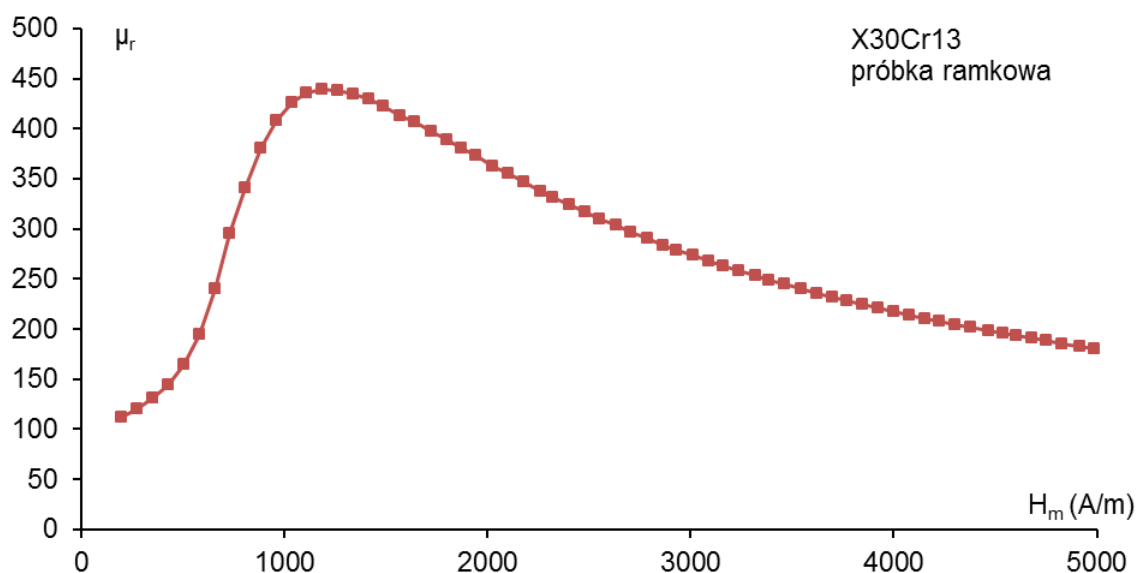
Rys. 9.11. Rodzina pętli histerezy $B(H)$ przy ustalonych wartościach amplitudy natężenia pola magnesującego H_m dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.

Na rysunku 9.12 przedstawiono zależność indukcji maksymalnej B_m od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



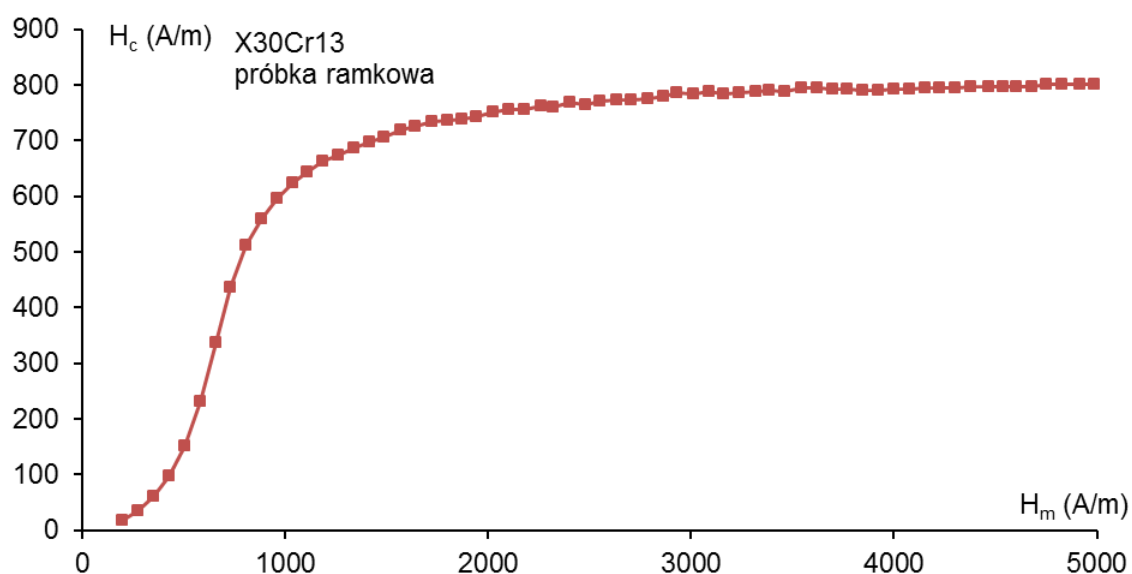
Rys. 9.12. Zależność indukcja maksymalnej B_m od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.13 przedstawiono zależność względnej przenikalności amplitudowej μ_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



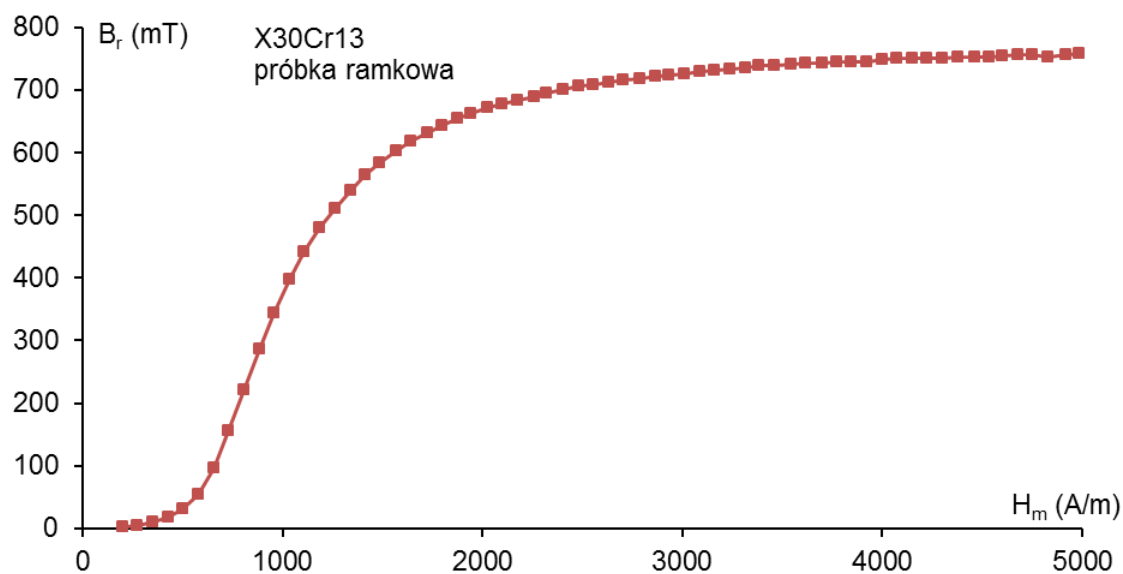
Rys. 9.13. Zależność przenikalności względnej amplitudowej μ_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.14 przedstawiono zależność natężenia pola koercji H_c od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



Rys. 9.14. Zależność natężenia pola koercji H_c od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.15 przedstawiono zależność indukcji remanencji B_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.

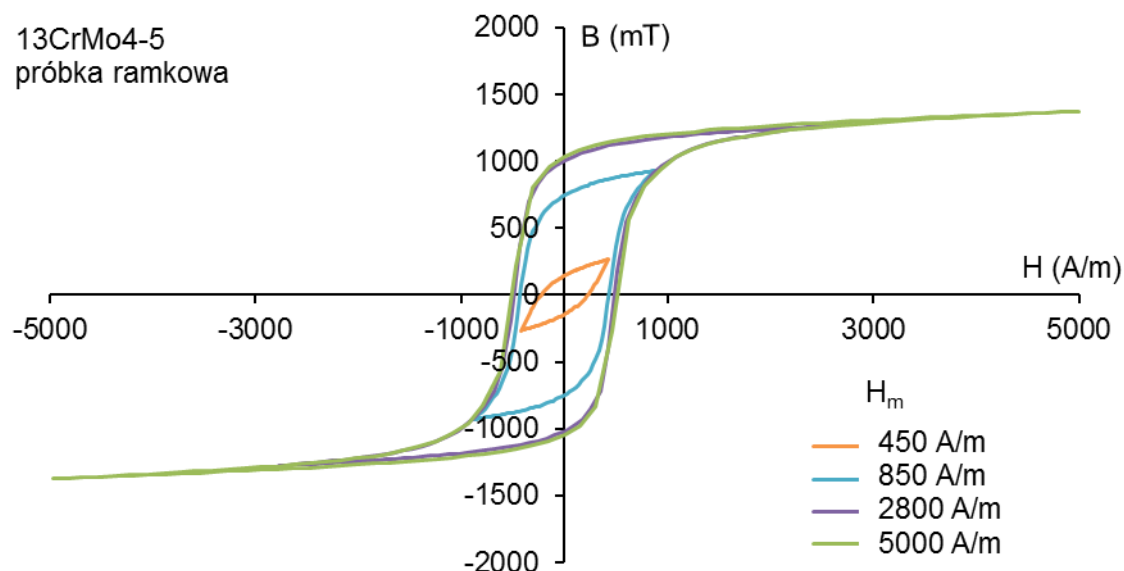


Rys. 9.15. Zależność indukcji remanencji B_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13

9.2.2. Wyniki dla stali 13CrMo4-5

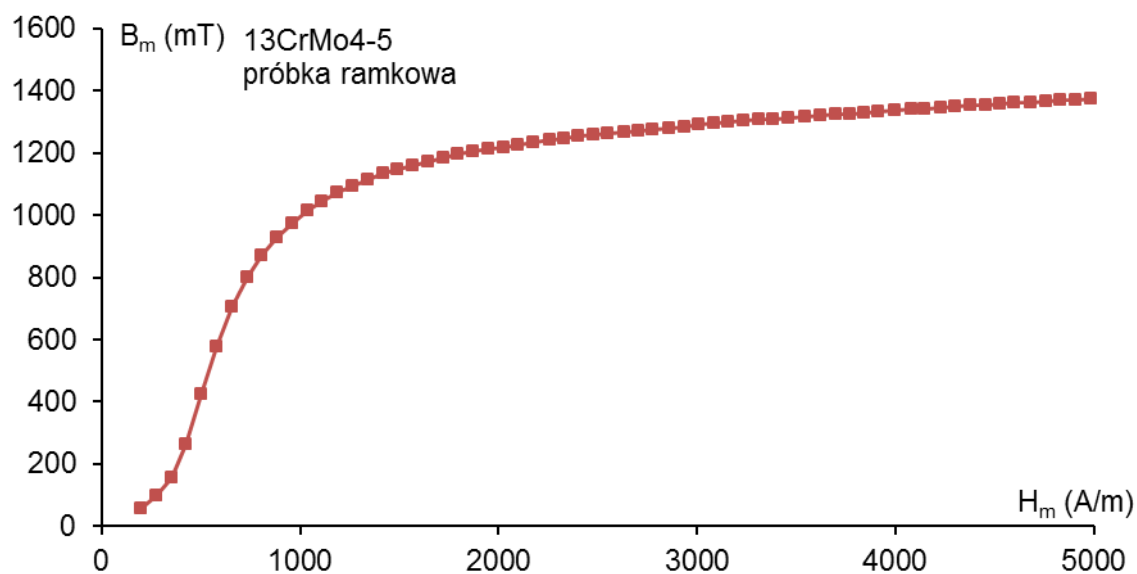
W rozdziale przedstawiono wyniki pomiaru charakterystyk magnetycznych próbek ramkowej wykonanej ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 9.16 przedstawiono rodzinę pętli histerezy $B(H)$ przy ustalonych maksymalnych wartościach natężenia pola magnesującego H dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



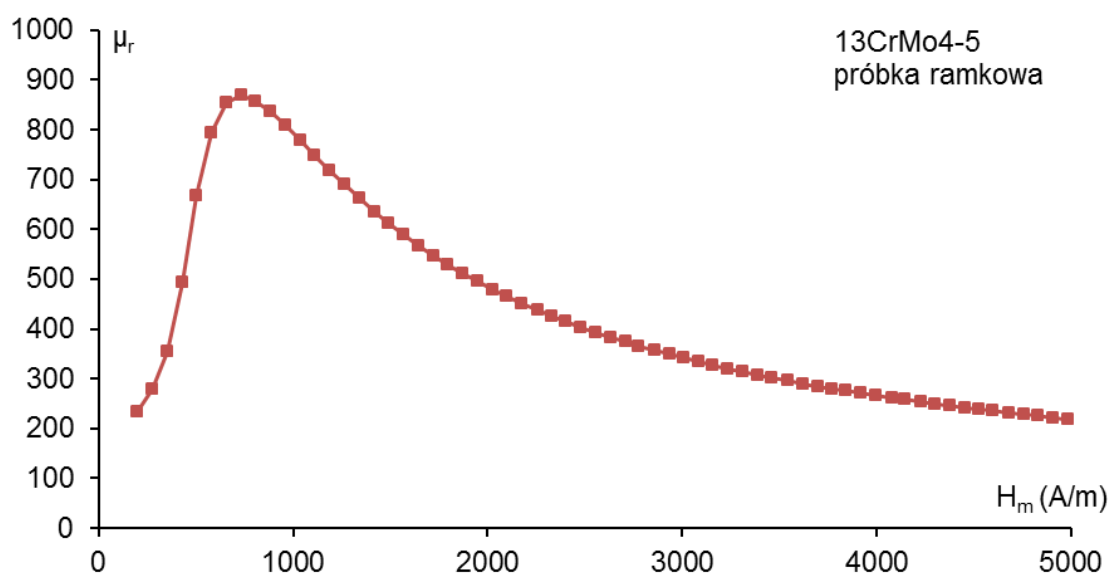
Rys. 9.16. Rodzina pętli histerezy $B(H)$ przy ustalonych wartościach amplitudy natężenia pola magnesującego H_m dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku poniżej 9.17 przedstawiono zależność indukcji maksymalnej B_m od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



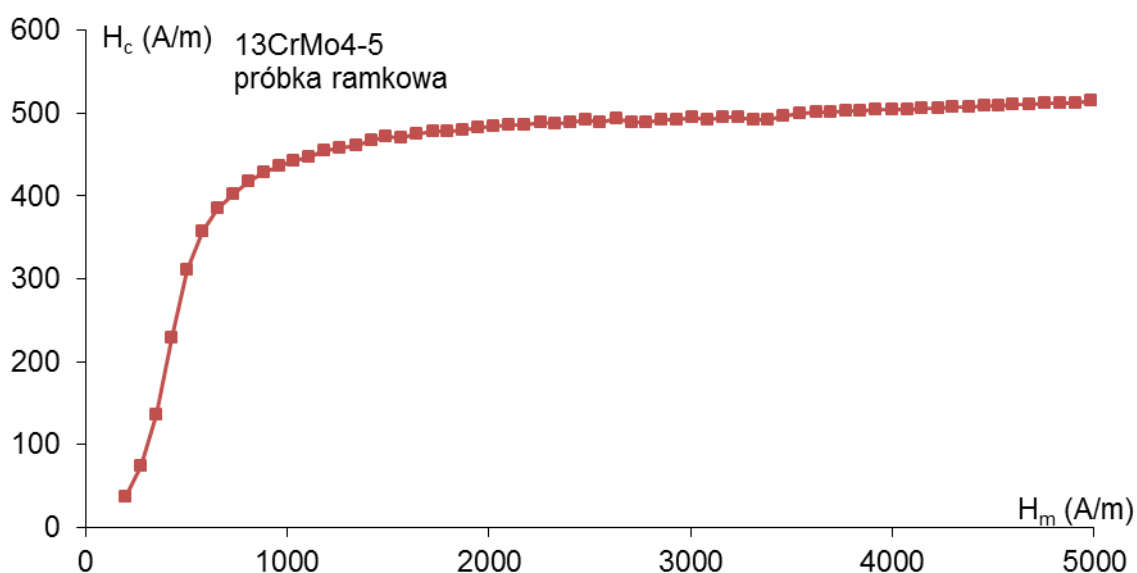
Rys. 9.17. Zależność indukcji maksymalnej B_m od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.18 przedstawiono zależność względnej przenikalności amplitudowej μ_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



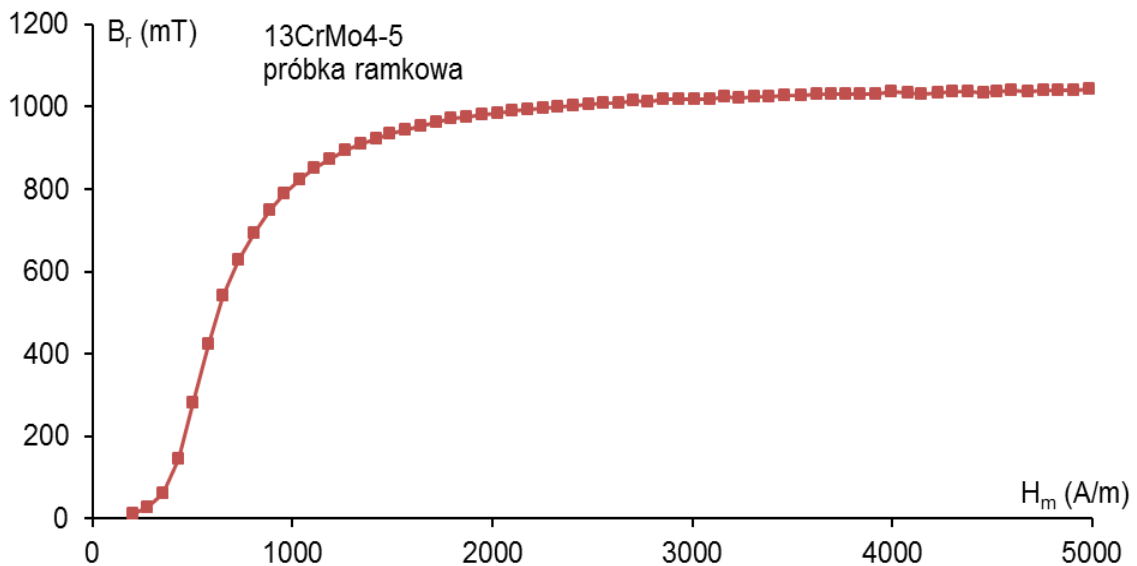
Rys. 9.18. Zależność przenikalności względnej amplitudowej μ_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.19 przedstawiono zależność natężenia pola koercji H_c od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 9.19. Zależność natężenia pola koercji H_c od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.20 przedstawiono zależność indukcji remanencji B_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 9.20. Zależność indukcji remanencji B_r od natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5

9.2.3. Wnioski

Z przedstawionych charakterystyk wynika, że badane materiały dla próbek ramkowych osiągają nasycenie dla natężenia pola magnesującego H około 5000 A/m. Maksymalna indukcja magnetyczna nasycenia B_m dla tej wartości natężenia pola magnesującego dla stali X30Cr13 wynosi 1131 mT, a dla stali 13CrMo4-5 wynosi 1373 mT. Natomiast wartości indukcji remanencji B_r osiąga wartość 755 mT dla stali X30Cr13 i wartość 1042 mT dla stali 13CrMo4-5.

Wyniki te są zbliżone do wartości otrzymanych dla próbek pierścieniowych. Różnice w wartościach parametrów magnetycznych wynikają głównie z:

- wpływu walcowania blach ze stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5,
- kształtu próbek, który może wprowadzić inny rozkład strumienia magnetycznego,
- obecności łączników w próbce ramkowej, co wiąże się z koniecznością przeliczenia drogi magnetycznej na równoważną.

W obu rodzajach próbek: pierścieniowych i ramkowych jest zachowany podobny charakter zmian, zaś zaistniałe różnice są na poziomie pomijalnym w dalszych rozważaniach.

9.3. Charakterystyki magnetoelastyczne $B(H, \sigma)$ próbek ramkowych

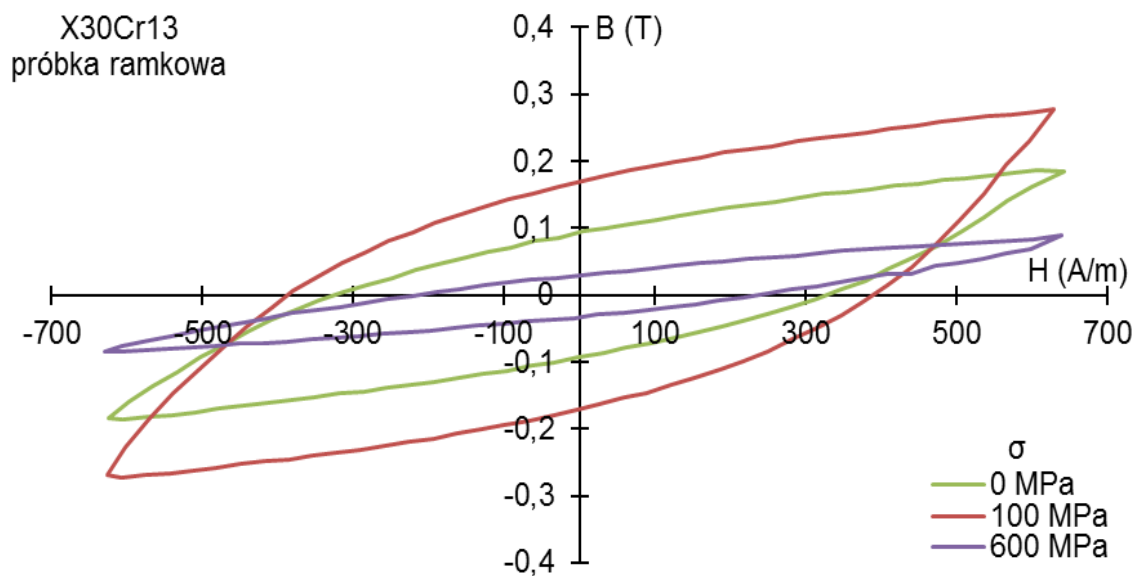
W drugim etapie badań wykonano pomiary właściwości magnetoelastycznych stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5 dla próbek ramkowych. Podczas badania próbki zamocowano w rewersorze, znajdującym się w prasie hydraulicznej. Dzięki temu do próbek były wprowadzane naprężenia rozciągające σ . Badania charakterystyk magnetoelastycznych wykonano przy pomocy opracowanego stanowiska badawczego opisanego w rozdziale 8.2. Warunki pomiaru podano w tabeli 9.6.

Tab. 9.6. Parametry pomiaru charakterystyk magnetoelastycznych próbek ramkowych.

Parametry pomiaru:	
• Typ charakterystyk $f(H_m)$:	dynamiczne;
• Pętle histerezy:	symetryczne;
• Magnesowanie próbki:	prądowe;
• Temperatura próbki:	20°C;
• Naprężenia w próbce:	od 0 MPa do 450 MPa;
Parametry przebiegu magnesującego:	
• Kształt przebiegu pola $H(t)$:	trójkąt;
• Max. amplituda pola magnesującego H_{max} :	5000 A/m;
• Częstotliwość f :	0,1 Hz;
Parametry przebiegu rozmagnesowania:	
• Max. amplituda pola rozmagnesowania H_{rmax} :	5000 A/m;
• Częstotliwość przebiegu rozmagnesującego f_{rozm} :	20,0 Hz;
• Współczynnik tłumienia:	1,04.

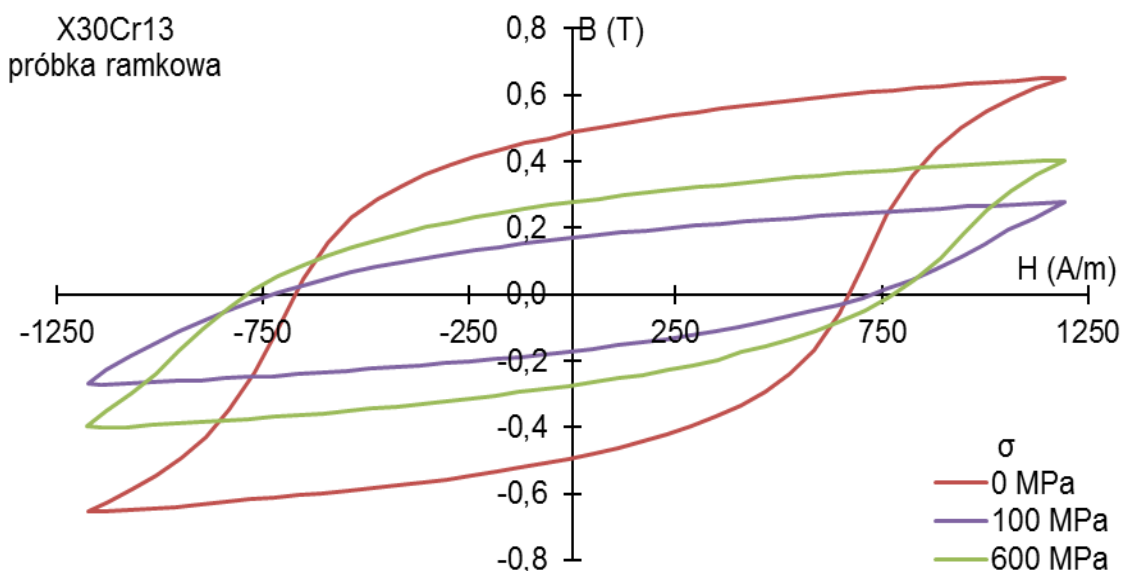
9.3.1. Wyniki dla stali X30Cr13

Na rysunku 9.21 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0 \text{ MPa}$, 100 MPa , 600 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 450 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



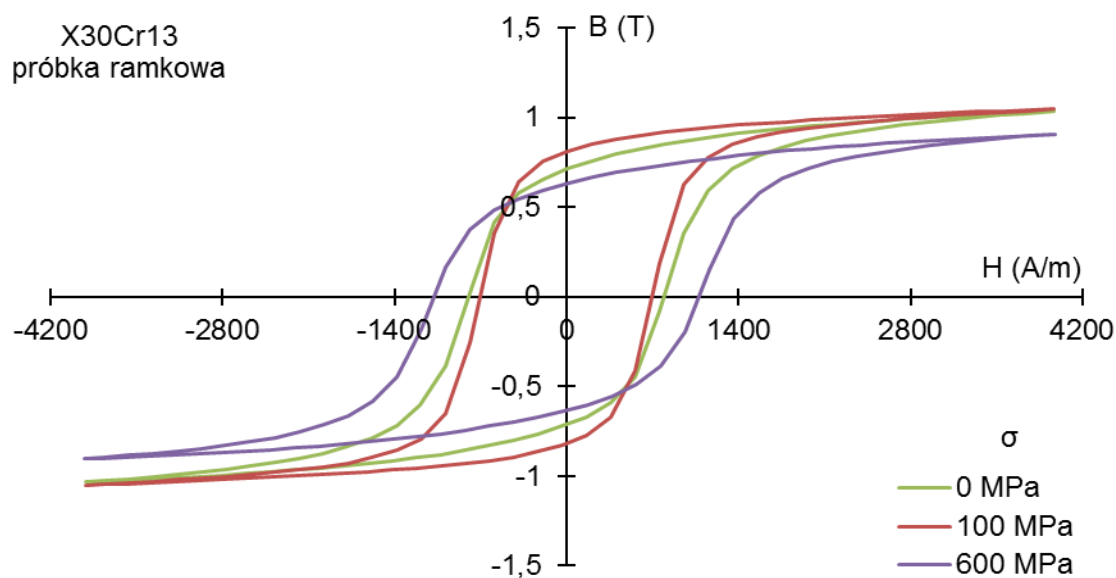
Rys. 9.21. Rodzina pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ , przy natężeniu pola magnesującego $H_c = 640$ A/m dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.22 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0$ MPa, 100 MPa, 600 MPa, przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 850$ A/m, dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



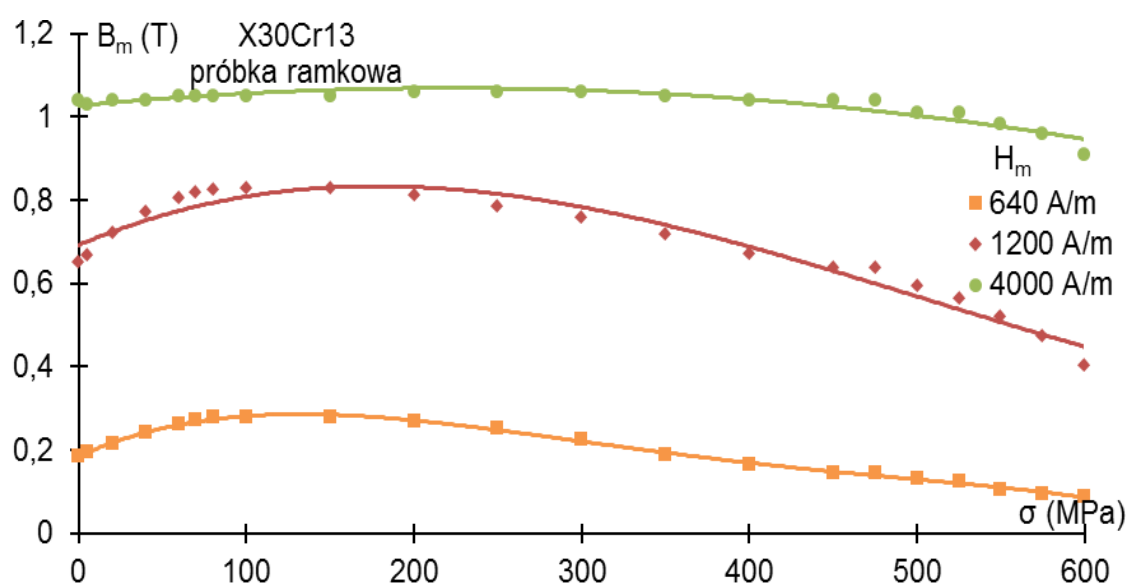
Rys. 9.22. Rodzina pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 1200$ A/m, dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.23 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 2800 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



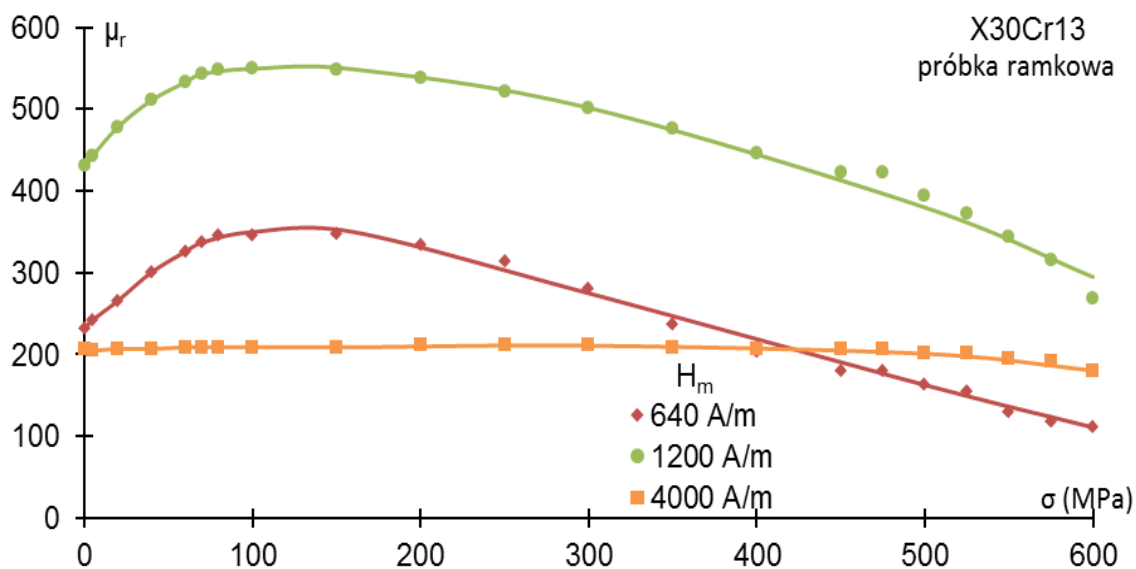
Rys. 9.23. Rodzina pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 4000 \text{ A/m}$, próbki ramkowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.24 przedstawiono charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



Rys. 9.24. Charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13

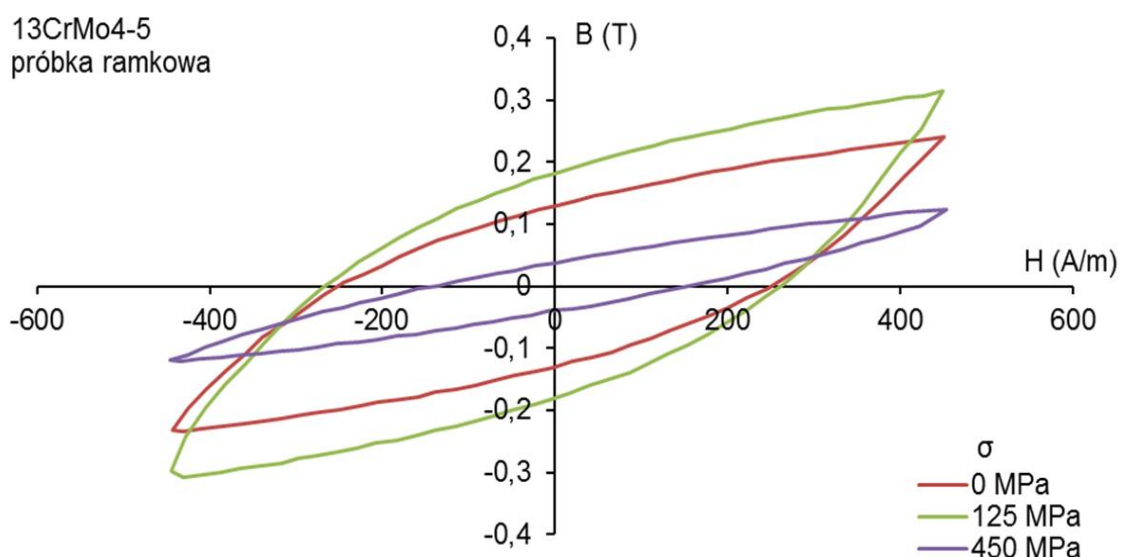
Na rysunku 9.25 przedstawiono charakterystyki magnetosprężyste $\mu_r(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



Rys. 9.25. Charakterystyki magnetosprężyste $\mu_r(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13

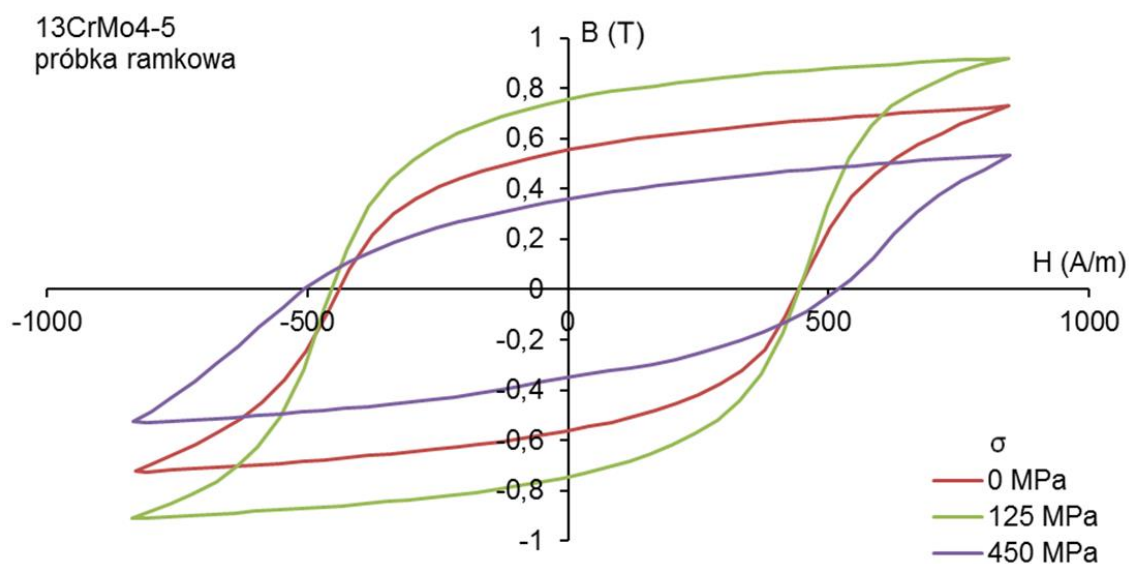
9.3.2. Wyniki dla stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.26 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0$ MPa, 125 MPa, 450 MPa, przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 450$ A/m, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



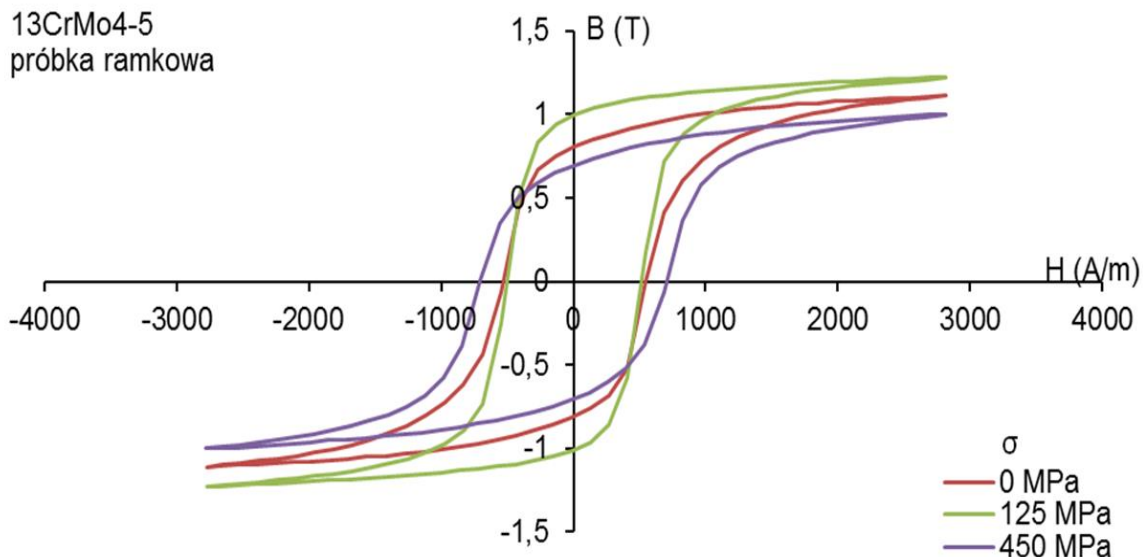
Rys. 9.26. Rodzina pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0 \text{ MPa}$, 125 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 450 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.27 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0 \text{ MPa}$, 125 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 850 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



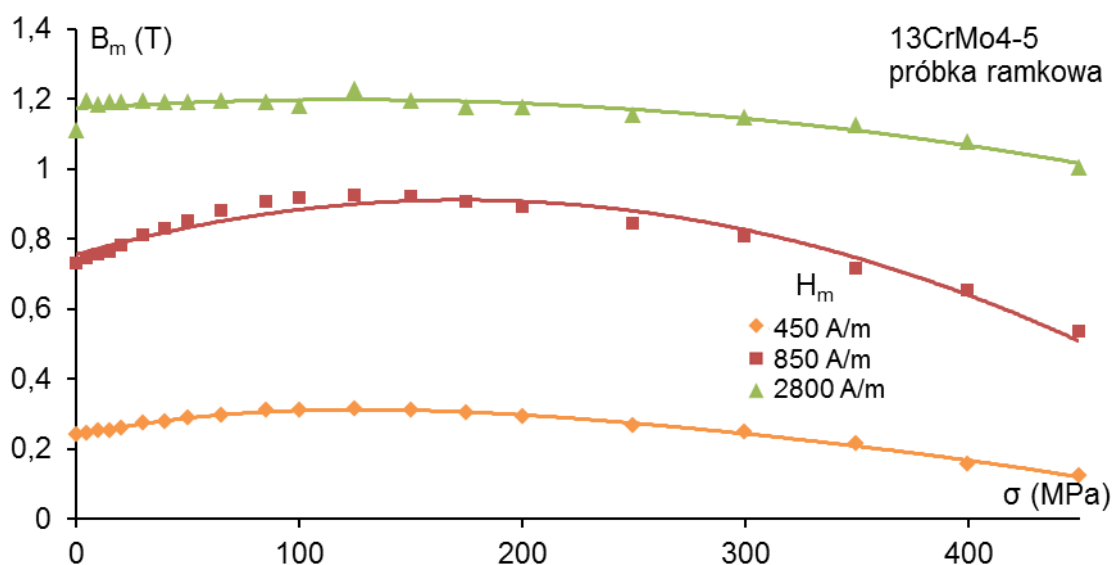
Rys. 9.27. Rodzina pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 850 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 9.28 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 2800 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



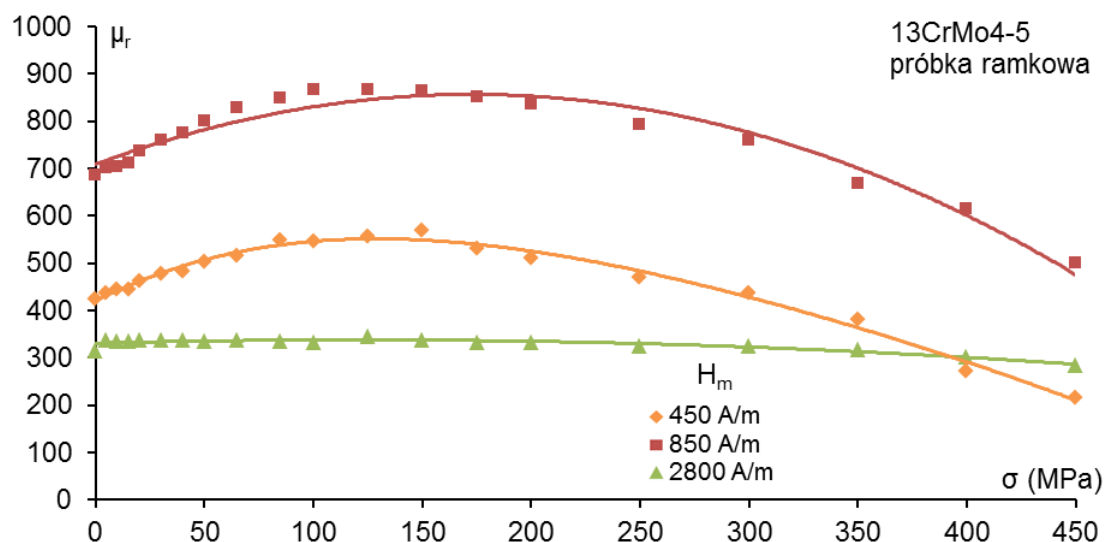
Rys. 9.28. Rodzina pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 2800 \text{ A/m}$, próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 9.29 przedstawiono charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 9.29. Charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 9.30 przedstawiono charakterystyki magnetosprężyste $\mu_r(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 9.30. Charakterystyki magnetosprężyste $\mu_r(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach natężenia pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5

9.3.3. Wnioski

Z przedstawionych charakterystyk wynika, że w badanych materiałach: stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5 zaobserwowano znaczny wpływ naprężeń na charakterystyki magnesowania. Z punktu widzenia analizy wyników najdogodniejsze są charakterystyki $B_m(\sigma)_{H_m}$ oraz $\mu_r(\sigma)_{H_m}$.

Dla stali X30Cr13 największa bezwzględna zmiana wartości indukcji maksymalnej B_m od wartości początkowej B_m przy zerowych naprężeniach do maksymalnej wartości B_m wyniosła 0,18 T, co odpowiada zmianie względnej wynoszącej 27%, dla natężenia pola magnesującego $H_m = 1200$ A/m. Z kolei w przedziale od maksymalnej wartości B_m do wartości końcowej B_m przy maksymalnych naprężeniach wartość indukcji magnetycznej maksymalnej B_m spadła o wartość bezwzględną 0,43 T, co odpowiada zmianie względnej 51%. Dla tego samego pola magnesującego zmiana wartości przenikalności względnej amplitudowej μ_r od wartości początkowej μ_r przy zerowych naprężeniach do maksymalnej wartości μ_r wyniosła bezwzględnie 118, czyli względnie 27%, a od maksymalnej wartości μ_r do wartości końcowej μ_r przy maksymalnych naprężeniach wyniosła bezwzględnie 282, a względnie 51%.

Natomiast dla stali 13CrMo4-5 zmiana wartości indukcji maksymalnej B_m od punktu początkowego do maksimum wyniosła bezwzględnie aż 0,19 T, a względnie 26% dla natężenia pola magnesującego $H_m = 850$ A/m. Z kolei w przedziale od maksimum do punktu końcowego wartość indukcji magnetycznej maksymalnej B_m spadło bezwzględnie o 0,39 T, czyli względnie o 42%. Dla tego samego pola magnesującego zmiany wartości przenikalności względnej amplitudowej od punktu początkowego do maksimum wyniosły bezwzględnie 181, czyli względnie 26%, a od punktu maksimum do punktu końcowego wyniosły bezwzględnie 367, czyli względnie 42%.

Uzyskane wyniki w sposób jednoznaczny potwierdzają znaczny wpływ naprężeń mechanicznych na charakterystyki magnetyczne stali X30Cr13 oraz 13CrMo4-5. Potwierdza to możliwość wykorzystania zjawiska magnetosprężystego do oceny stanu naprężeń w konstrukcjach stalowych.

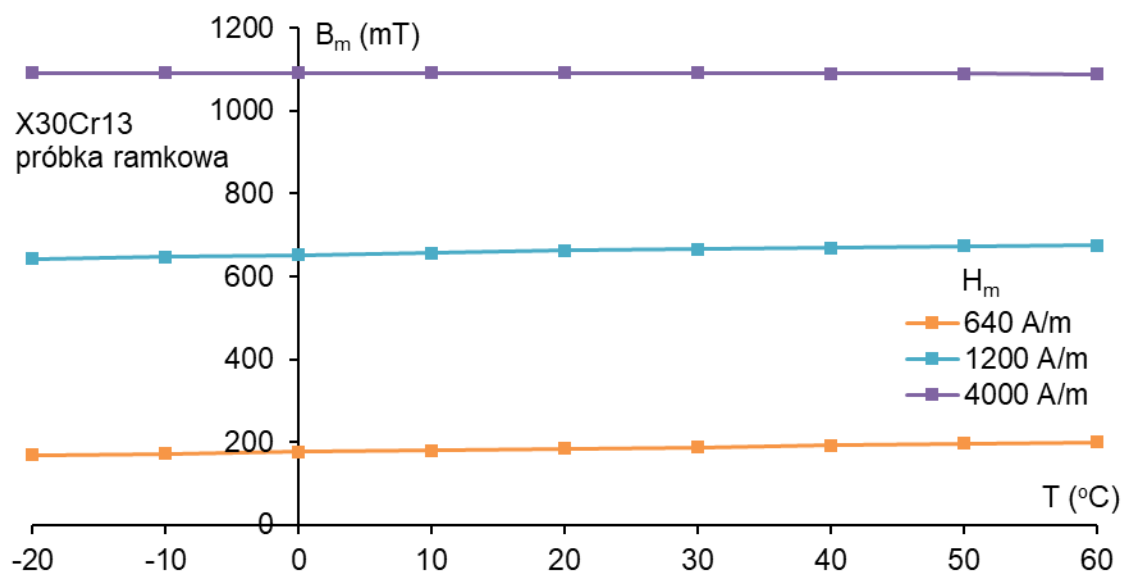
9.4. Charakterystyki temperaturowe $B(T)$ próbek ramkowych

Tab. 9.7. Parametry pomiaru charakterystyk temperaturowych próbek ramkowych.

Parametry pomiaru:	
• Typ charakterystyk $f(H_m)$:	dynamiczne;
• Pętle histerezy:	symetryczne;
• Magnesowanie próbki:	prądowe;
• Temperatura próbki:	od -20°C do 60°C ;
• Naprężenia w próbce:	0 MPa;
Parametry przebiegu magnesującego:	
• Kształt przebiegu pola $H(t)$:	trójkąt;
• Max. amplituda pola magnesującego H_{max} :	5000 A/m;
• Częstotliwość f :	0,1 Hz;
Parametry przebiegu rozmagnesowania:	
• Max. amplituda pola rozmagnesowania H_{rmax} :	5000 A/m;
• Częstotliwość przebiegu rozmagnesowującego f_{rozm} :	20 Hz;
• Współczynnik tłumienia:	1,04.

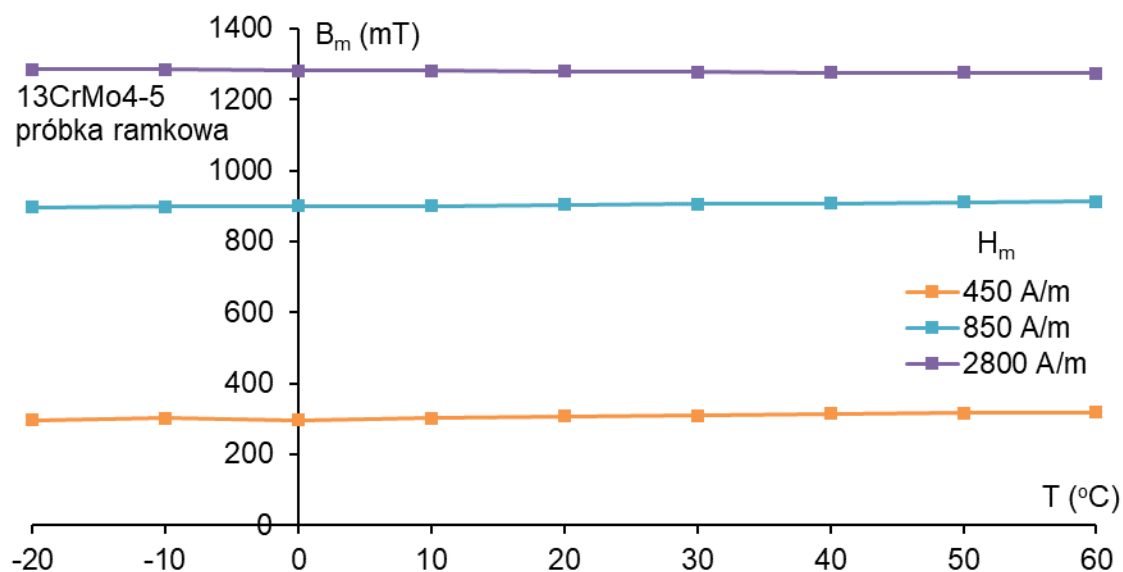
Na tym etapie badań wykonano pomiary charakterystyk temperaturowych stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5 dla próbki ramkowej [48]. Podczas badania próbkę umieszczano w kriostacie, przy pomocy którego otrzymywano zadaną temperaturę. Badania charakterystyk temperaturowych wykonano przy pomocy opracowanego stanowiska badawczego opisanego w rozdziale 8.3. Parametry pomiaru podano w tabeli 9.7.

Na rysunku poniżej 9.31 przedstawiono charakterystyki temperaturowe indukcji maksymalnej $B_m(T)_{H_m}$, przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



Rys. 9.31. Charakterystyki temperaturowe indukcji maksymalnej $B_m(T)_{H_m}$, przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13

Na rysunku 9.32 przedstawiono charakterystyki temperaturowe indukcji maksymalnej $B_m(T)_{H_m}$, przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



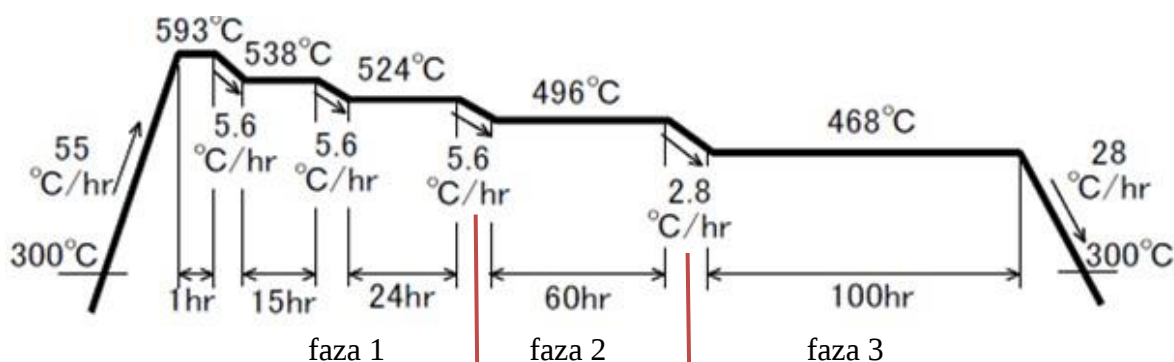
Rys. 9.32. Charakterystyki temperaturowe indukcji maksymalnej $B_m(T)_{H_m}$, przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5

Z przedstawionych charakterystyk wynika, że w zakresie temperatur T od -20°C do 60°C obserwuje się znikomo mały wpływ temperatury na właściwości magnetyczne stali X30Cr13 i stali 13CrMo4-5.

9.5. Charakterystyki magnetoelastyczne $B(H, \sigma)$ próbek ramkowych po procesie „step cooling”

Test „step cooling” jest to rodzaj obróbki cieplnej, która ma symulować wpływ czasu i warunków środowiskowych takich jak temperatura i naprężenia na badany element lub materiał [14], [34]. Dzięki temu uzyskuje się w szybkim czasie struktury i właściwości materiału takie jak po kilku latach użytkowania. Proces ten dotyczy w szczególności przyspieszonej obróbki cieplnej (kilkaset godzin), uwzględniającej m.in zmiany udarności ocenianego materiału w rzeczywistych warunkach w długim okresie (rzędu 100 000 godzin) eksploatacji.

Oprócz klasycznego procesu „step cooling”, zastosowano dwa inne procesy oparte na typowej obróbce [59]. Do badań zostały wykorzystane trzy takie same próbki ramkowa opisane w rozdziale 8.1. W pierwszym procesie obróbki termicznej (faza 1) następuje wstrzymanie nagrzewania po osiągnięciu temperatury 524°C i próbka była wyżarzana przez 24 h w tej temperaturze. Natomiast w drugim procesie obróbki termicznej (faza 2) nagrzewanie przerwano po osiągnięciu temperatury 496°C i próbka była wyżarzana przez 60 h w tej temperaturze. Schemat zastosowanej obróbki „step cooling” przedstawiona na rysunku 9.33.

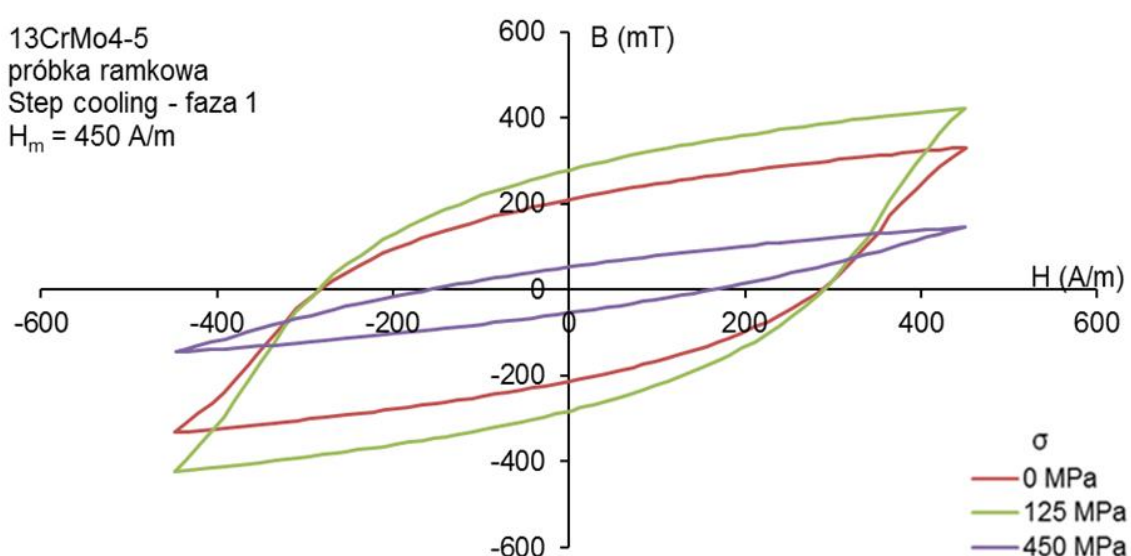


Rys. 9.33. Schemat zastosowanej obróbki „step cooling” [59].

Dla każdej z próbek poddanych procesowi „step cooling” przeprowadzono badania właściwości magnetoelastycznych. Procedura ta pozwoliła na wyznaczenie charakterystyk dla

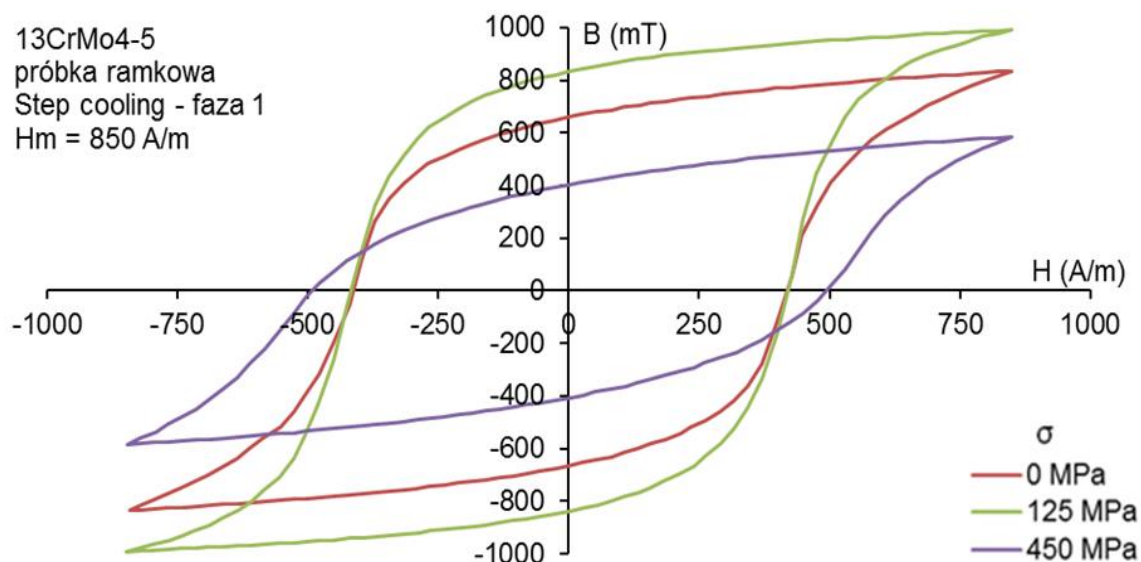
trzech różnych struktur uzyskanych w wyniku obróbki cieplnej symulującej warunki degradacji w środowiskach przemysłowych. Należy jednak zauważyć, że procedura stosowana do modyfikacji struktury nie pozwala na jednoznaczną identyfikację czasu, po którym dana struktura ma szansę pojawić się w rzeczywistych warunkach eksploatacji jednak jest powszechnie uznawana i stosowana w tego typu badaniach.

Na rysunku 9.34 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 1 przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0 \text{ MPa}$, 125 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 450 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



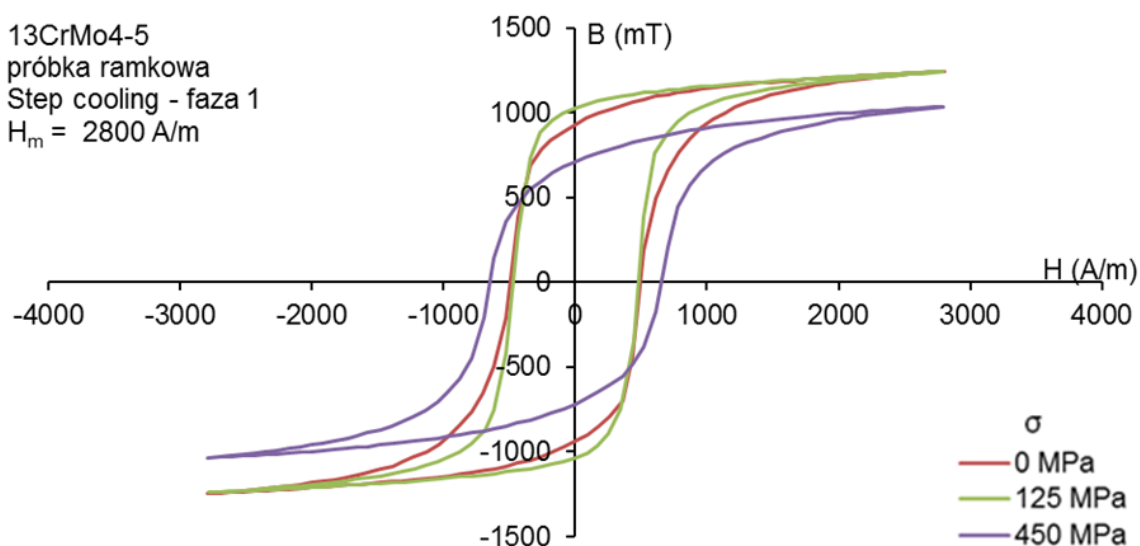
Rys. 9.34. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 1, przy $H_m = 450 \text{ A/m}$ dla ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ .

Na rysunku 9.35 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 1 przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0 \text{ MPa}$, 125 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 850 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



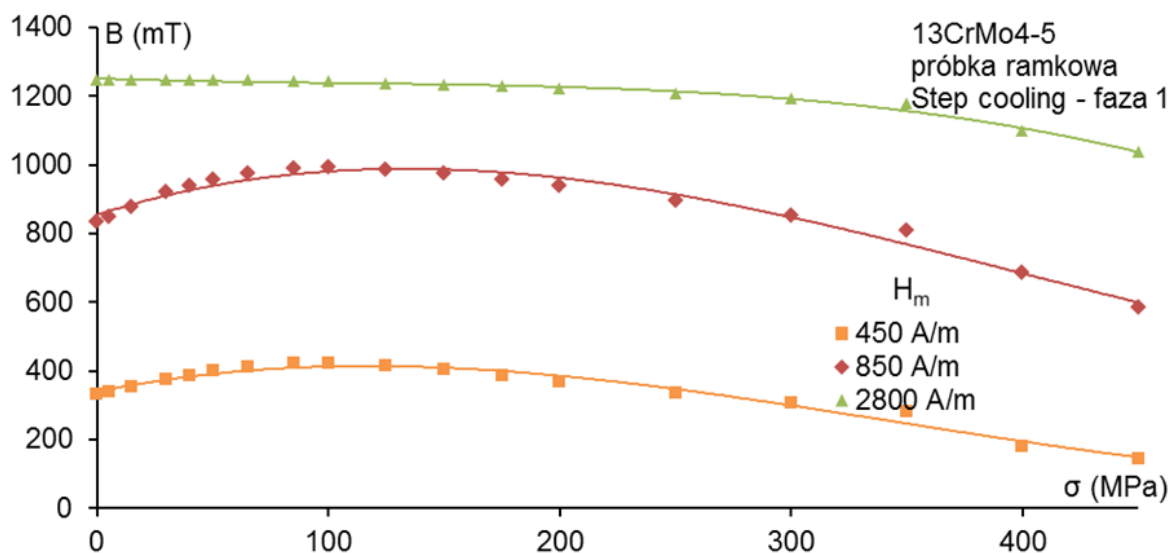
Rys. 9.35. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 1, przy $H_m = 850 \text{ A/m}$ dla ustalonych wartości naprężeń rozciągających σ .

Na rysunku 9.36 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 1 przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0 \text{ MPa}$, 125 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 2800 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



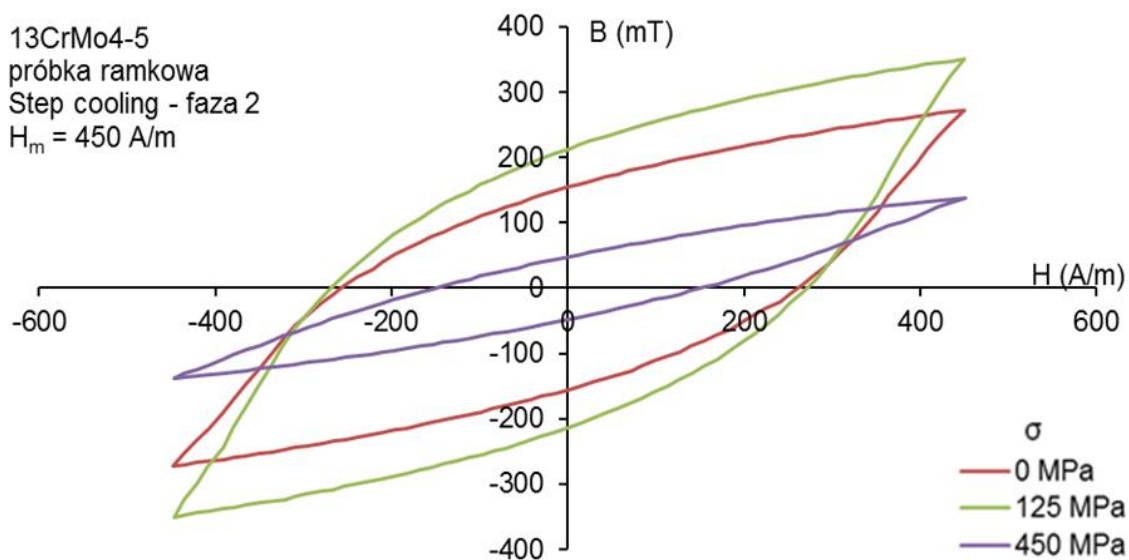
Rys. 9.36. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 1, przy $H_m = 2800 \text{ A/m}$ dla ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ .

Na rysunku 9.37 przedstawiono charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)H_m$ po procesie „step cooling” faza 1, przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



Rys. 9.37. Charakterystyki magnetostryżyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ po procesie „step cooling” faza 1, przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m .

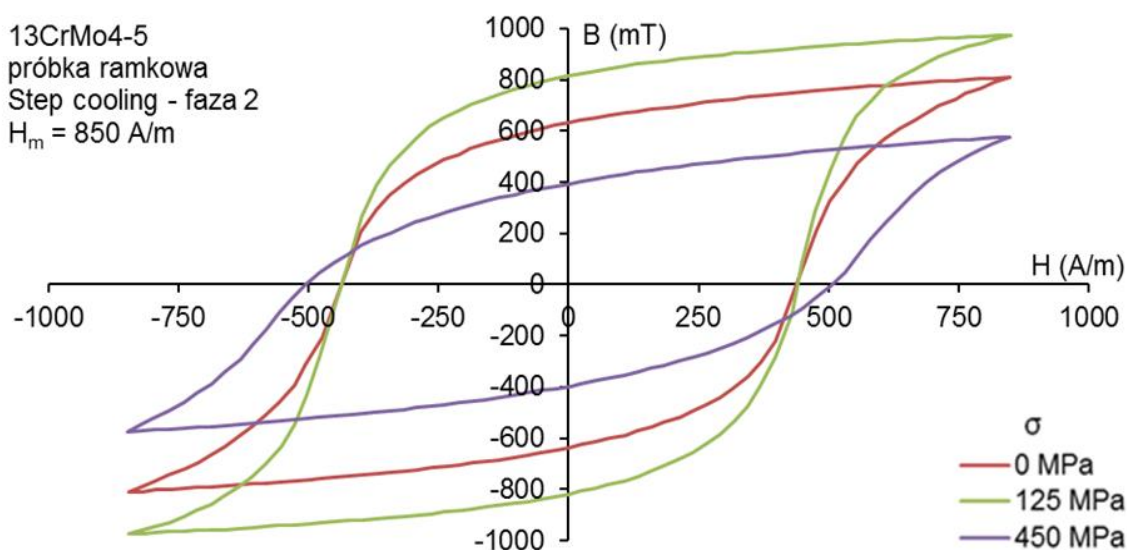
Na rysunku 9.38 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)\sigma$ po procesie „step cooling” faza 2 przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0$ MPa, 125 MPa, 450 MPa, przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 450$ A/m, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 9.38. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)\sigma$ po procesie „step cooling” faza 2, przy $H_m = 450$ A/m dla ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ .

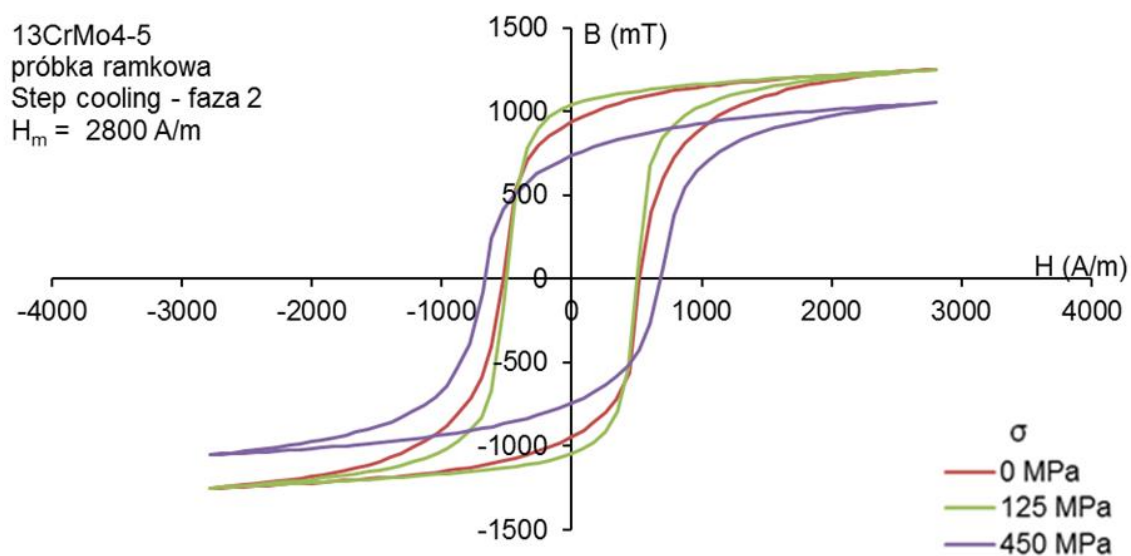
Na rysunku 9.39 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)\sigma$ po procesie „step cooling” faza 2 przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających

$\sigma = 0 \text{ MPa}$, 125 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 850 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



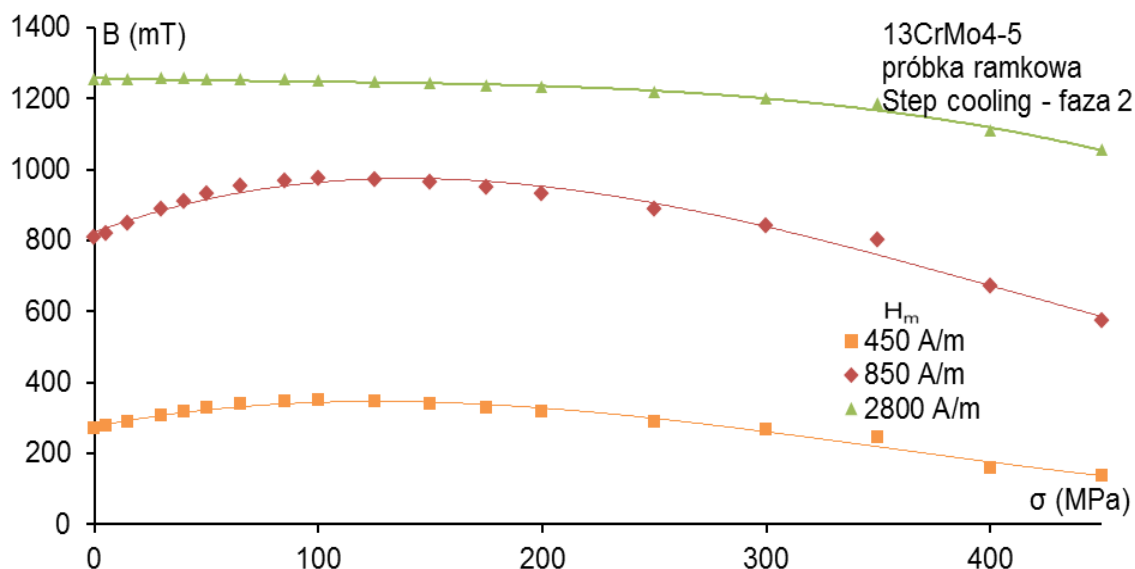
Rys. 9.39. Rodzina pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 2, przy $H_m = 850 \text{ A/m}$ dla ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ .

Na rysunku 9.40 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 2 przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0 \text{ MPa}$, 125 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 2800 \text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



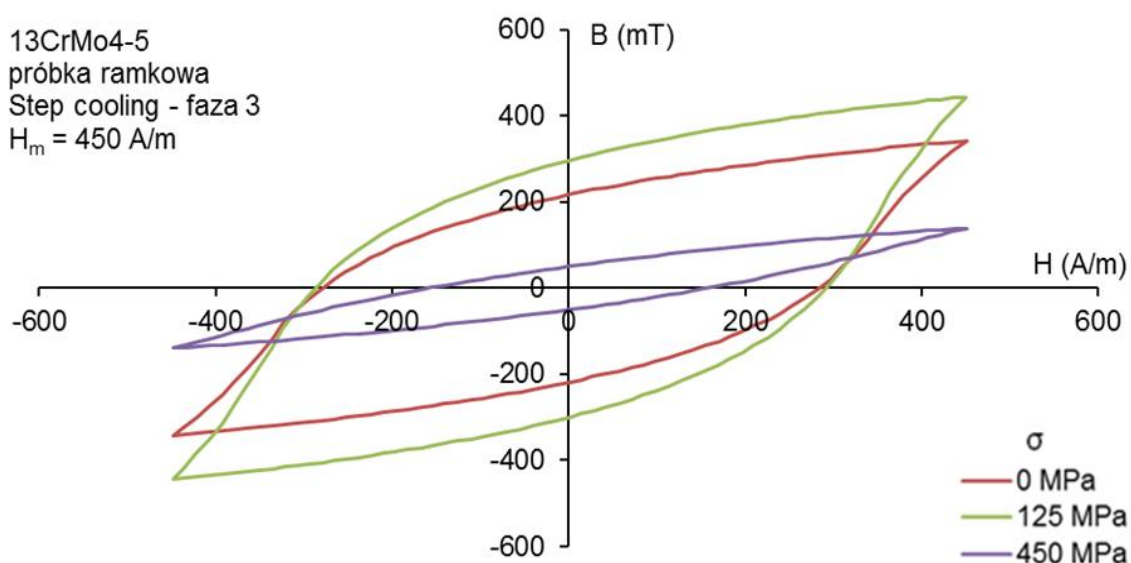
Rys. 9.40. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 2, przy $H_m = 2800 \text{ A/m}$ dla ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ .

Na rysunku 9.41 przedstawiono charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)H_m$ po procesie „step cooling” faza 2, przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali X30Cr13.



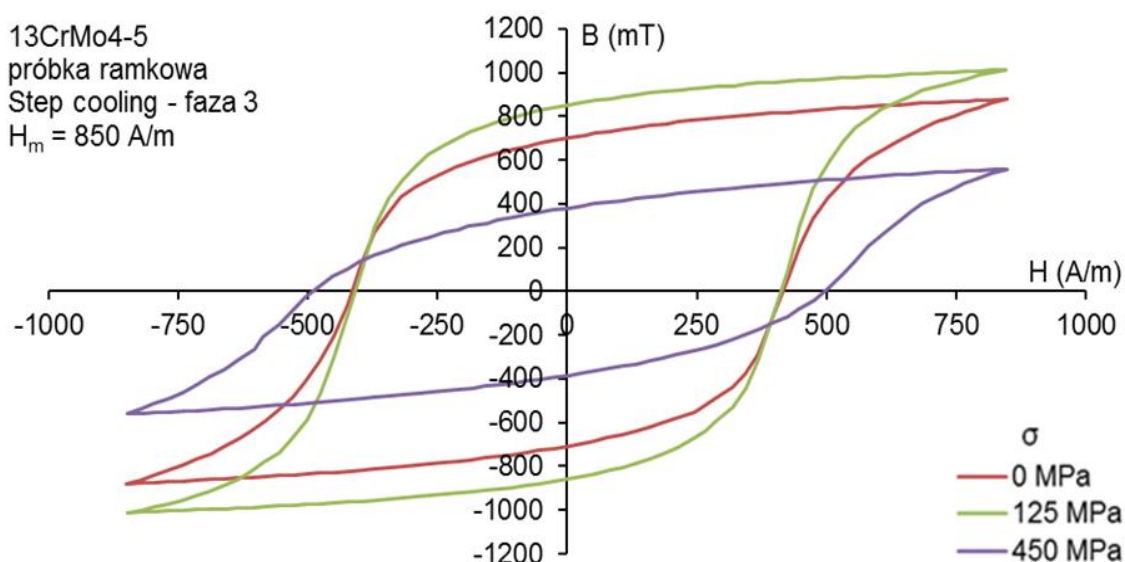
Rys. 9.41. Charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)H_m$ po procesie „step cooling” faza 2, przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m .

Na rysunku 9.42 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)\sigma$ po procesie „step cooling” faza 3 przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0$ MPa, 125 MPa, 450 MPa, przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 450$ A/m, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



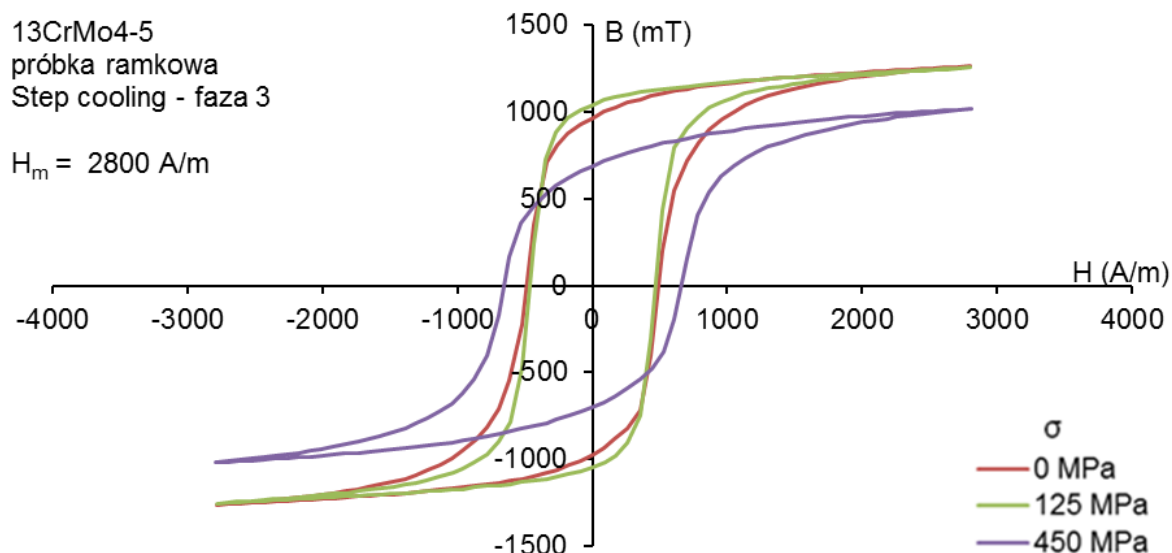
Rys. 9.42. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)\sigma$ po procesie „step cooling” faza 3, przy $H_m = 450$ A/m dla ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ .

Na rysunku 9.43 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)\sigma$ po procesie „step cooling” faza 3 przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0\text{ MPa}$, 125 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 850\text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



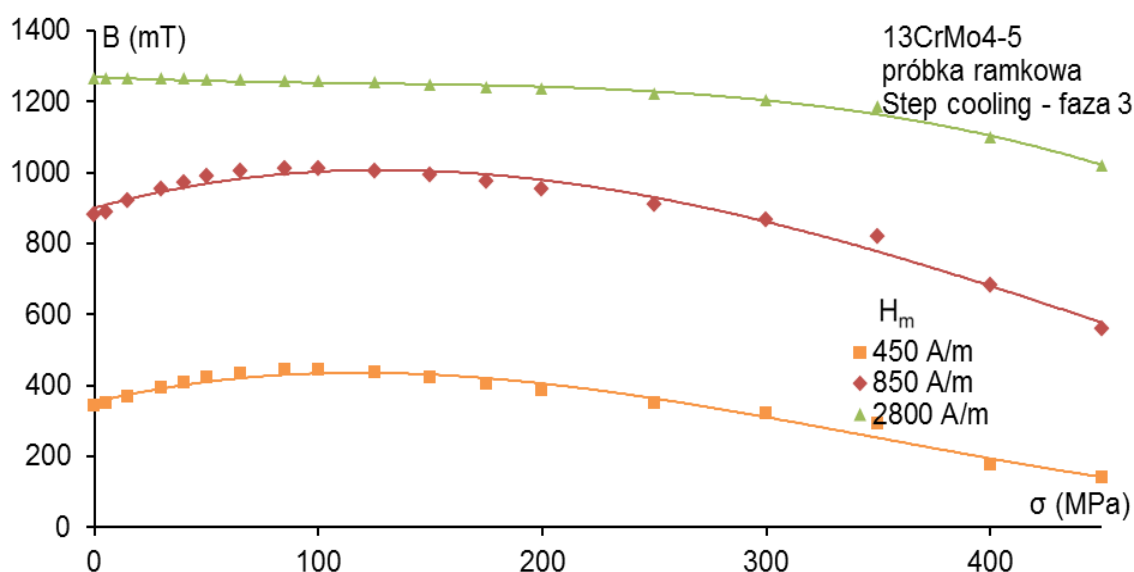
9.43. Pętli histerezy magnetycznej $B(H)\sigma$ po procesie „step cooling” faza 3, przy $H_m = 850\text{ A/m}$ dla ustalonych wartościach naprężeń rozciągających σ .

Na rysunku 9.44 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)\sigma$ po procesie „step cooling” faza 3 przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0\text{ MPa}$, 125 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 2800\text{ A/m}$, dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 9.44. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ po procesie „step cooling” faza 3, przy $H_m = 2800 \text{ A/m}$ dla ustalonych wartości naprężeń rozciągających σ .

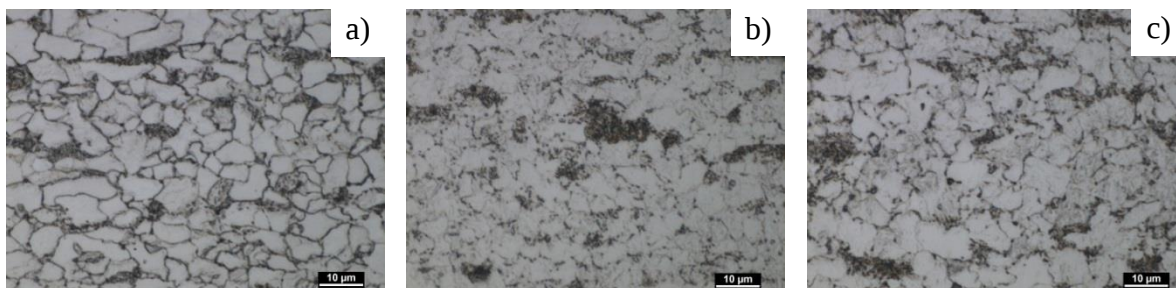
Na rysunku 9.45 przedstawiono charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ po procesie „step cooling” faza 3, przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m , dla próbki ramkowej ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 9.45. Charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ po procesie „step cooling” faza 3, przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m .

Dla trzech badanych próbek ramkowych poddanych procesowi „step cooling” ze stali 13CrMo4-5 uzyskane wyniki są do siebie podobne. Kształt uzyskanych charakterystyk pokrywa się z kształtem dla próbki niepoddanej procesowi „step cooling” pokazanej w rozdziale 8. Powyższe wyniki można wyjaśnić brakiem różnic pomiędzy strukturami [40],

[59]. We wszystkich przypadkach obserwowano typ ferrytyczno-węglkowy z wyraźnie widocznym ziarnem pierwotnego perlitu, w którym obserwuje się efekty rozpadu struktury płytkowej. Zaobserwowane struktury przedstawiona na rysunku 9.46.



Rys. 9.46. Zaobserwowane struktury ferrytyczno-węglkowe w badanych próbkach poddanych procesowi „step cooling”: a) po fazie 1, b) po fazie 2, c) po fazie 3 (mikroskop świetlny, pole jasne, trawione odczynnikiem Nital 5%) [40].

9.6. Analiza wyników badań

Na podstawie charakterystyk magnetosprężystych $B_m(\sigma)_{Hm}$ oraz $\mu_r(\sigma)_{Hm}$ można wyznaczyć czułość magnetosprężystą. Czułość ta może być opisana zależnością (9.1) dla indukcji magnetycznej maksymalnej B_m i zależnością (9.2) dla względnej przenikalności amplitudowej μ_r :

$$k_B = \frac{\Delta B_m}{\Delta \sigma} \quad (9.1)$$

$$k_\mu = \frac{\Delta \mu_r}{\Delta \sigma} \quad (9.2)$$

gdzie k_b – czułość magnetosprężysta, ΔB_m – przyrost indukcji magnetycznej maksymalnej odpowiadający przyrostowi naprężeń $\Delta \sigma$, $\Delta \mu_r$ – przyrost przenikalności magnetycznej względnej maksymalnej odpowiadającej przyrostowi naprężeń $\Delta \sigma$.

W tabeli 9.8 podano maksymalne wartości czułości magnetosprężystej dla indukcji magnetycznej maksymalnej B_m i dla względnej przenikalności amplitudowej μ_r .

Tab. 9.8. Maksymalne wartości czułości magnetosprężystej dla indukcji magnetycznej maksymalnej B_m i dla względnej przenikalności amplitudowej μ_r .

	$k_B \left(\frac{mT}{MPa} \right)$		$k_\mu \left(\frac{1}{MPa} \right)$	
	X30Cr13	13CrMo4-5	X30Cr13	13CrMo4-5
$H_m = 0,8 H_c$	0,6	0,7	0,8	1,22
$H_m = 1,5 H_c$	1,8	1,9	1,2	1,79
$H_m = 5 H_c$	0,3	0,5	0,07	0,15

Zmiany wartości indukcji magnetycznej B_m i względnej przenikalności amplitudowej μ_r od naprężeń są zależne od wartości natężenia pola magnesującego H przy jakiej został wykonany pomiar. Największe zmiany zaobserwowano przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 1,5 H_c$.

Przedstawione wyniki badań wskazują na możliwość wykorzystania zjawiska magnetosprężystego do oceny stanu naprężeń w ferromagnetycznych elementach konstrukcyjnych.

Charakterystyki temperaturowe przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 1,5 H_c$ wykazały mały wpływ temperatury na właściwości magnetyczne. Zmiana indukcji magnetycznej w przedziale temperatur od -20°C do 60°C wyniosła 0,2%, co jest poniżej niepewności pomiarowej.

Analiza wyników pomiaru charakterystyk magnetosprężystych $B(H, \sigma)$ próbek ramkowych po procesie „step cooling” wykazała, że czas eksploatacji (wpływ czasu i warunków środowiskowych) nie wpływa negatywnie na możliwość oceny stanu naprężeń poprzez badanie magnetosprężyste.

10. Możliwości oceny stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych wykonanych ze stali ferromagnetycznej

10.1. Wymagania dotyczące weryfikacji

Opracowaną metodę analizy naprężeń przy pomocy charakterystyk magnetoelastycznych zweryfikowano na opracowanym i wykonanym modelu obiektu. Aby weryfikacja była miarodajna powinna spełnić następujące założenia:

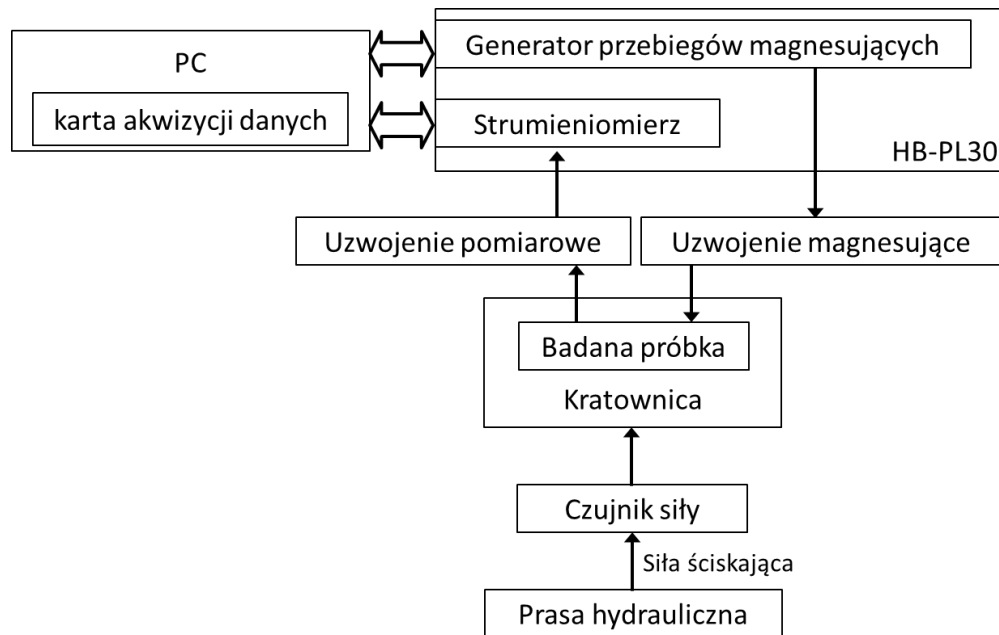
- model obiektu powinien reprezentować dużą grupę rzeczywistych konstrukcji,
- musi być zapewnione przykładanie określonych sił zewnętrznych,
- wartości naprężeń powstających w konstrukcji muszą być znane,
- konstrukcja musi umożliwiać przeprowadzenie badań charakterystyk magnetycznych.

W ramach pracy jako modelowy obiekt wybrano kratownice. Ten rodzaj konstrukcji bardzo często wykorzystuje się jako elementy konstrukcyjne. Z kratownic budowane są mosty, słupy, pylony, hale i dachy. Kratownica również spełnia pozostałe założenia niezbędne do weryfikacji metody. Pozwala na łatwe przyłożenie sił zewnętrznych oraz wyliczenie naprężeń powstających w każdym elemencie. Konstrukcja kratownicy również umożliwia wykonanie pomiarów charakterystyk magnetycznych.

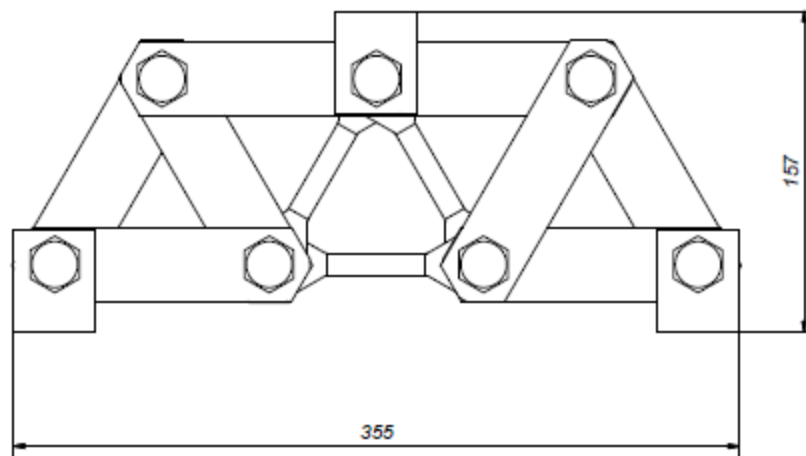
10.2. Opracowana metoda testów

Do weryfikacji metody zaprojektowano stanowisko badawcze przystosowane do badania własności magnetoelastycznych $B(\sigma, H)$ konstrukcji kratownicowych [37], [38], [39], [41], [43]. Część mechaniczna zawiera prasę hydrauliczną z czujnikiem do pomiaru siły obciążającej oraz kratownicę płaską w układzie kratownicy Warrena (na kracie trójkątnej). Część odpowiadająca za pomiar właściwości magnetycznych, zawierająca histerezograf HB-PL30, została opisana w rozdziale 7.2.

Na rysunku 10.1 przedstawiono schemat blokowy stanowiska badawczego do pomiaru właściwości magnetoelastycznych, a na rysunku 10.2 model kratownicy.



Rys. 10.1. Schemat blokowy stanowiska do badania konstrukcji kratownicowych



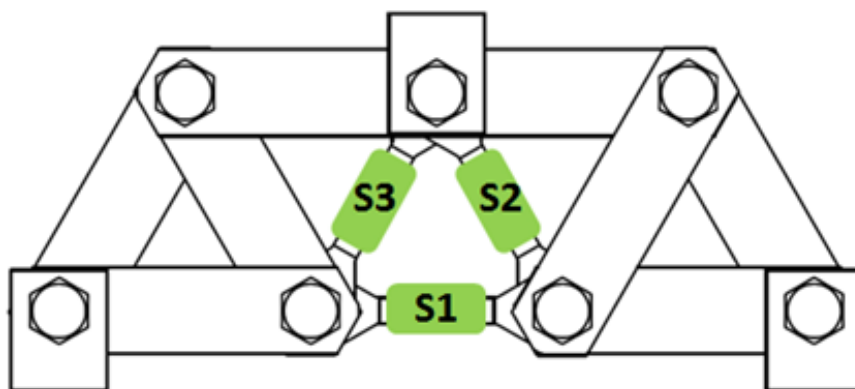
Rys. 10.2. Model kratownicy stosowany do weryfikacji

Kratownica została tak zaprojektowana, aby można było wymieniać trzy środkowe elementy, które stanowią badane próbki. Elementy te mają zmniejszony przekrój, aby podczas przykładania siły dochodziło do zniszczenia tylko ich, a nie całej kratownicy.

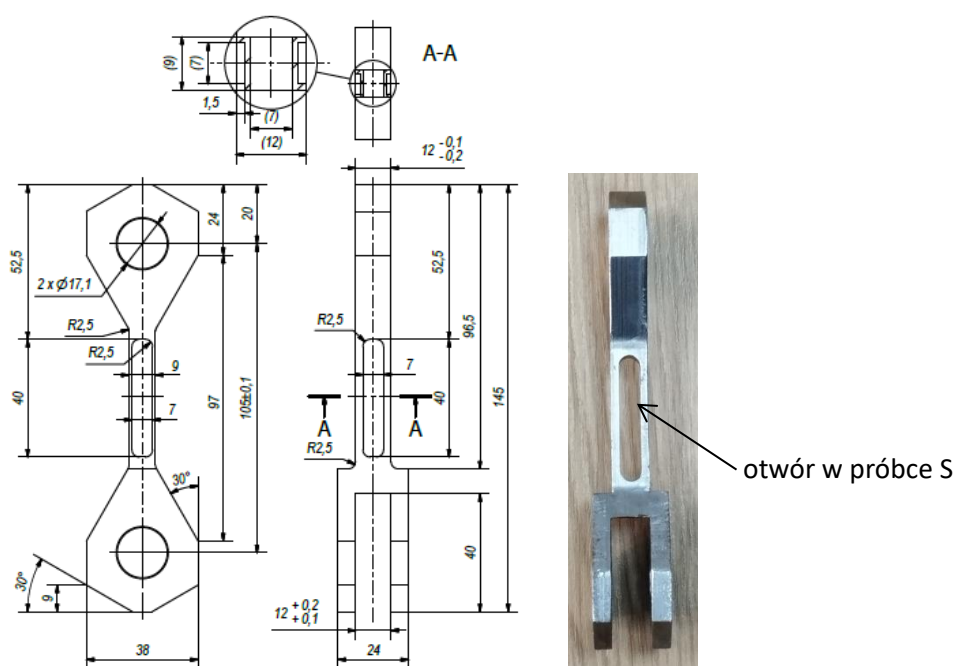
W niniejszej pracy kratownica była badana w dwóch konfiguracjach:

- pierwsza konfiguracja S w której zastosowana próbki S z otworem,
- druga konfiguracja M, w których zastosowano próbki M bez otworu.

Pierwsza konfiguracja S kratownicy pokazano na rysunku 10.3, a stosowane w niej próbki S na rysunku 10.4.



Rys. 10.3. Pierwsza konfiguracja kratownicy S

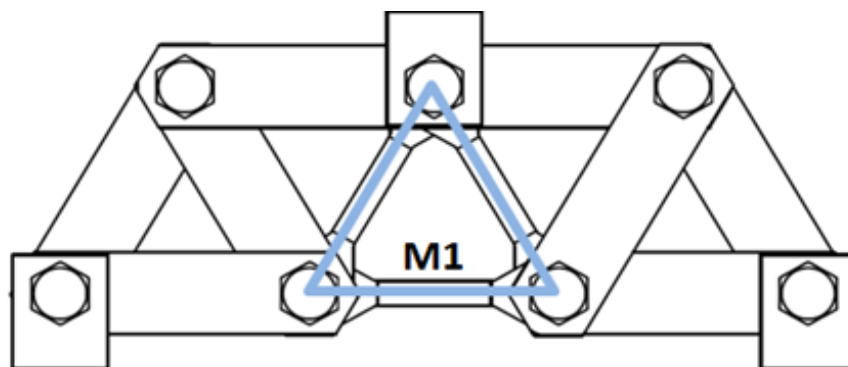


Rys. 10.4. Próbkę S użyte w pierwszej konfiguracji S

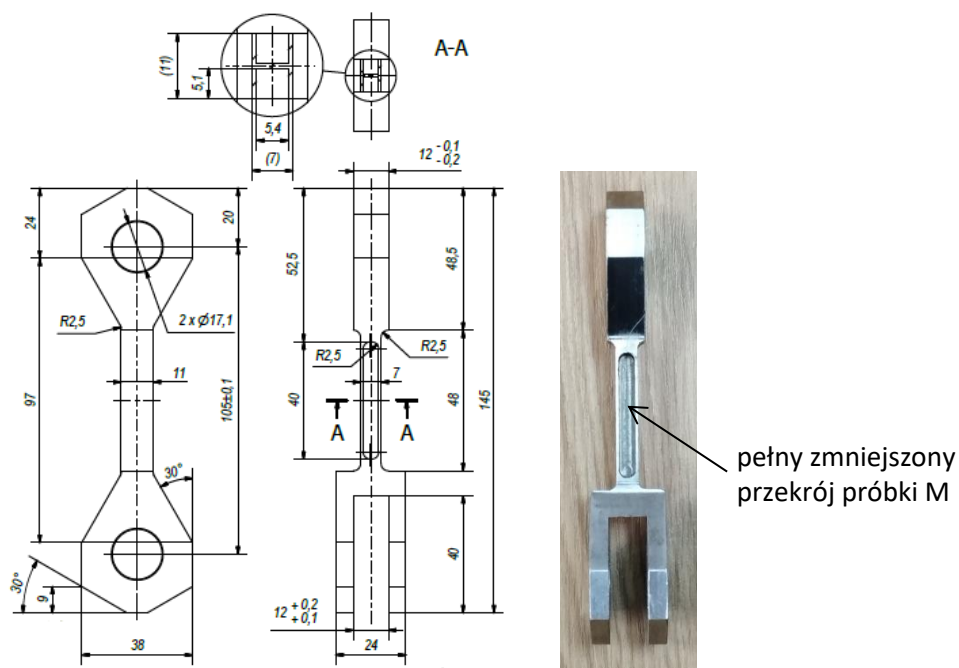
Próbki S mają otwór służący do ich uzwojenia. Każda próbka S jest uzwojona uzwojeniem pomiarowym i magnesującym. Magnetowód jest zamknięty na pojedynczej próbce S. Charakterystyki magnetoelastyczne są wyznaczane dla każdej próbki S oddzielnie. Próbka S1 jest rozciągana, a próbki S2 i S3 są ściskane.

Pierwsza konfiguracja S choć pozwala na wyznaczenie osobnych charakterystyk magnetoelastycznych pod wpływem naprężeń rozciągających i ściskanych, to wymaga wytworzenia dodatkowego otworu w próbce. Takie rozwiązanie jest mało praktyczne i zmniejsza wytrzymałość całej konstrukcji. Z tego powodu została zaproponowana druga metoda weryfikacji.

W drugiej zaproponowanej konfiguracji M zastosowano próbki M, które nie mają otworu, a mają jedynie zmniejszony przekrój. Konfigurację M kratownicy pokazano na rysunku 10.5, a stosowane w niej próbki M na rysunku 10.6.



Rys. 10.5. Druga konfiguracja kratownicy M



Rys. 10.6. Próbka M użyta w drugiej konfiguracji kratownicy

Uzwojenie pomiarowe i magnesujące jest nawinięte równomiernie na wszystkie próbki M, dzięki czemu magnetowód M zamyka się poprzez wszystkie trzy próbki. Próbka M1 jest rozciągana, a próbki M2 i M3 są ściskane.

Dla zaprojektowanych próbek S i M zostały obliczone naprężenia rozciągające i ściskające. Ich wartości przedstawiono w tabeli 10.1.

Tab. 10.1. Wartości naprężeń ściskających i rozciągających wyliczone dla próbek umieszczonych w kratownicy z rysunku 10.1.

	σ (MPa)	
	rozciąganie	ściskanie
1	20	13
2	40	27
3	60	40
4	80	53
5	100	67
6	120	80
7	140	93
8	160	107
9	180	120
10	200	133
11	250	167
12	300	200
13	350	233
14	400	267
15	450	300
16	500	333
17	550	367
18	600	400

10.3. Charakterystyki magnetosprężyste

10.3.1. Konfiguracja S kratownicy

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych dla kratownicy w pierwszej konfiguracji S wykonanej ze stali 13CrMo4-5. Właściwości magnetyczne stali 13CrMo4-5 zostały opisane w rozdziale 7.2.

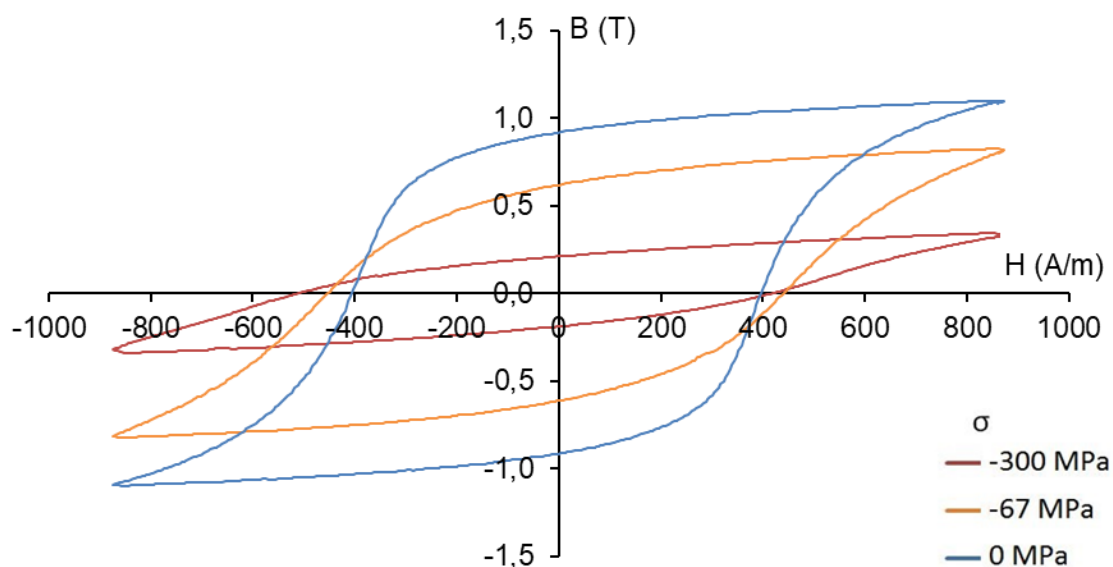
Przeprowadzono pomiary właściwości magnetycznych w funkcji naprężeń: pętli histerezy magnetycznej przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $B(H)_\sigma$, zależność indukcji magnetycznej maksymalnej od naprężeń rozciągających i ściskających $B_m(\sigma)_{Hm}$.

Badane próbki S uzwojono symetrycznie uzwojeniem pomiarowym i magnesującym. Uzwojenia podłączano na zmianę do wyjścia i wejścia histerezoграfu HB-PL30, tak aby charakterystyki magnetosprężyste były wyznaczone dla każdej próbki S oddzielnie. Parametry pomiaru podano w tabeli 10.2.

Tab. 10.2. Parametry pomiaru charakterystyk magnetoelastycznych próbek S

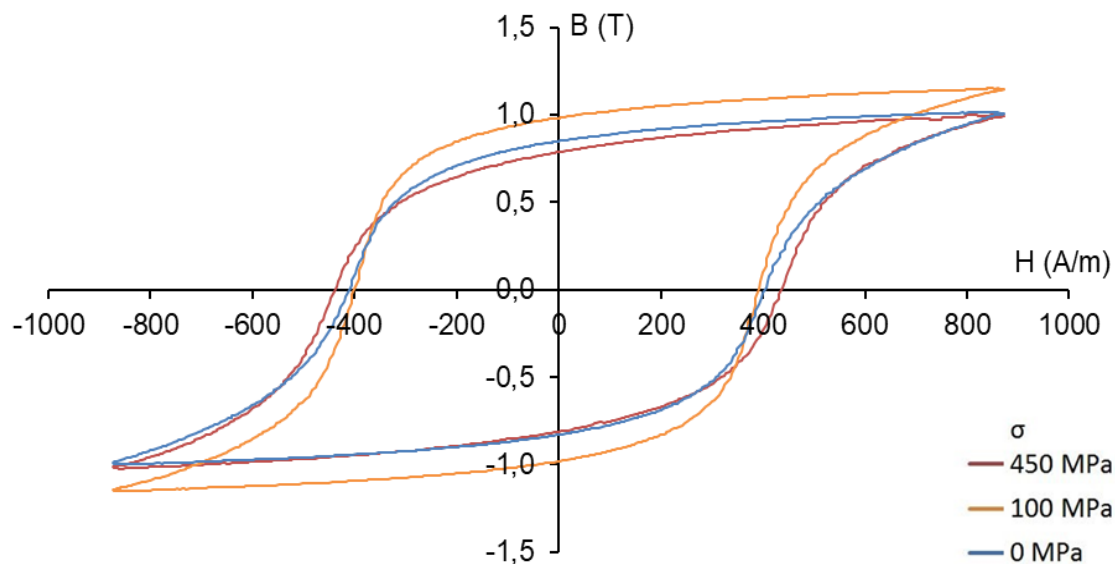
Parametry pomiaru:	
• Typ charakterystyk $f(H_m)$:	dynamiczne;
• Pętle histerezy:	symetryczne;
• Magnesowanie próbki:	prądowe;
• Temperatura próbki:	20 °C;
Parametry przebiegu magnesującego:	
• Kształt przebiegu pola $H(t)$:	trójkąt;
• Max. amplituda pola magnesującego H_{max} :	5000 A/m;
• Częstotliwość f :	0,1 Hz;
Parametry przebiegu rozmagnesowania:	
• Max. amplituda pola rozmagnesowania H_{rmax} :	5000 A/m;
• Częstotliwość przebiegu rozmagnesującego f_{rozm} :	20 Hz;
• Współczynnik tłumienia:	1,04.

Na rysunku 10.7 przedstawiono rodzinę pętli histerezy $B(H)$ przy ustalonych maksymalnych wartościach natężenia pola magnesującego H dla próbki S1 ze stali 13CrMo4-5.



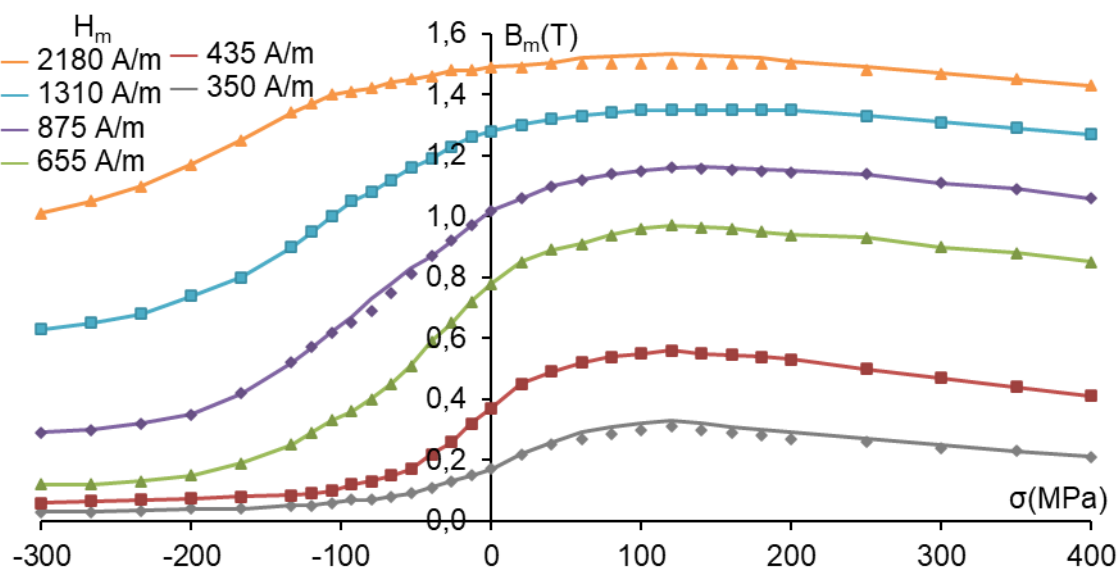
Rys. 10.7. Rodzina pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń ściskających $\sigma = 0$ MPa, 67 MPa, 300 MPa dla próbki S2 ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 10.8 przedstawiono rodzinę pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0 \text{ MPa}$, 100 MPa , 450 MPa , przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 850 \text{ A/m}$, dla próbki S1 ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 10.8. Rodzina pętli histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $\sigma = 0 \text{ MPa}$, 100 MPa , 450 MPa dla próbki S1 ze stali 13CrMo4-5

Na rysunku 10.9 przedstawiono charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m , dla próbek S ze stali 13CrMo4-5.



Rys. 10.9. Charakterystyki magnetosprężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego H_m , dla próbek S ze stali 13CrMo4-5

10.3.2. Konfiguracja M kratownicy

W rozdziale przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych dla kratownic w drugiej konfiguracji M wykonanych ze stali 13CrMo4-5 i X30Cr13. Właściwości magnetyczne stali 13CrMo4-5 zostały opisane w rozdziale 7.2, a stali X30Cr13 w rozdziale 7.1.

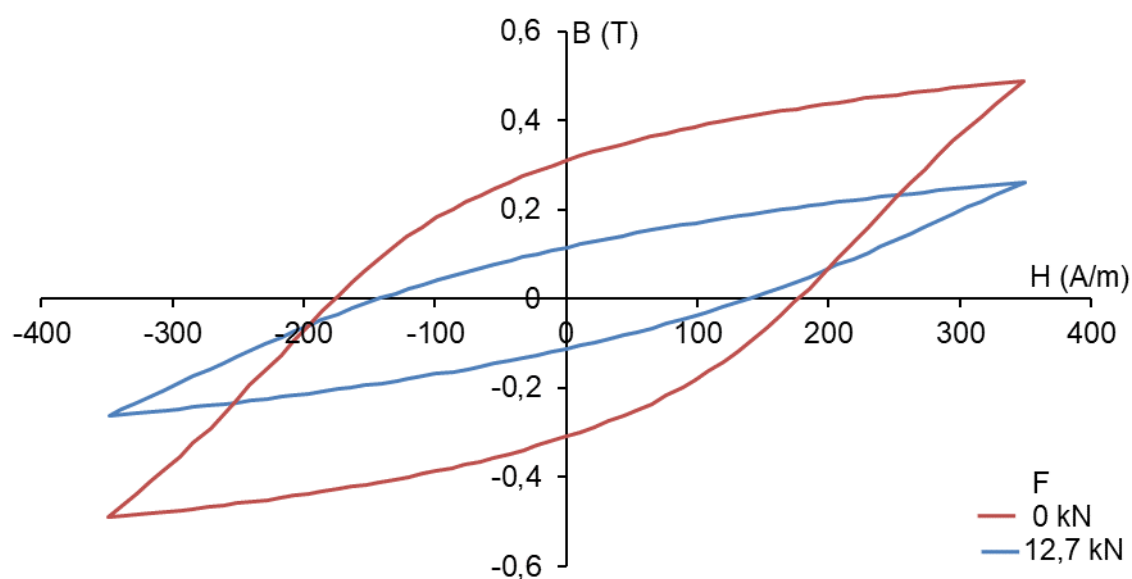
Przeprowadzono pomiary właściwości magnetycznych w funkcji naprężeń: pętli histerezy magnetycznej przy ustalonych wartościach naprężeń rozciągających $B(H)_\sigma$, zależność indukcji magnetycznej maksymalnej od wartości przyłożonej siły $B_m(F)_{H_m}$ dla pięciu zestawów próbek.

Badane próbki M uzwojono symetrycznie uzwojeniem pomiarowym i magnesującym. Uzwojenia podłączono do wyjścia i wejścia histerezo grafu HB-PL30. Parametry pomiaru podano w tabeli 10.3.

Tab. 10.3. Parametry pomiaru charakterystyk magnetycznych próbek M

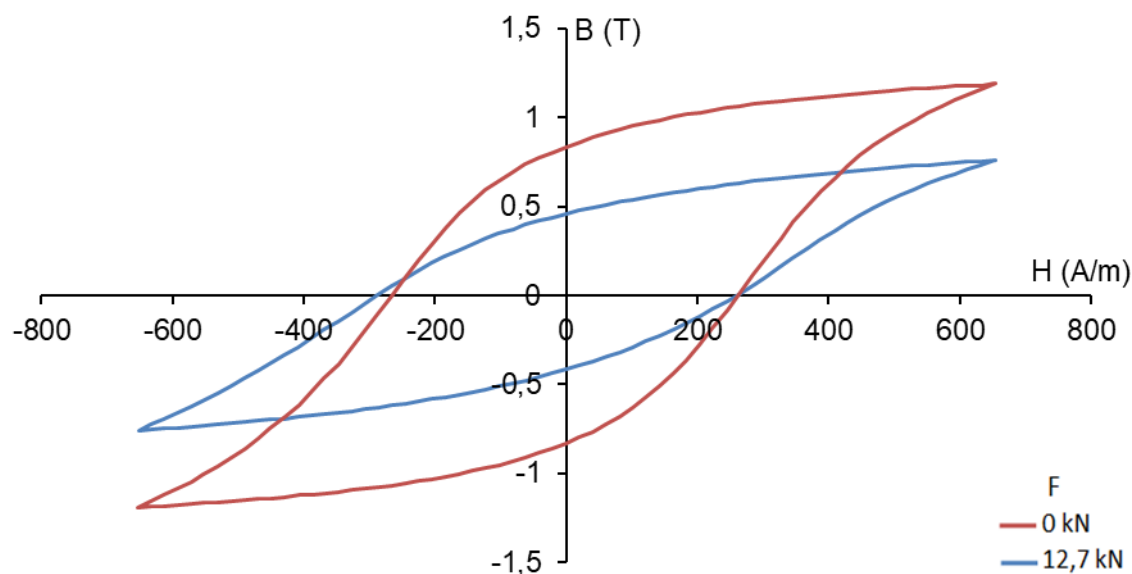
Parametry pomiaru:	
• Typ charakterystyk $f(H_m)$:	dynamiczne;
• Pętle histerezy:	symetryczne;
• Magnesowanie próbki:	prądowe;
• Temperatura próbki:	20 °C;
Parametry przebiegu magnesującego:	
• Kształt przebiegu pola $H(t)$:	trójkąt;
• Max. amplituda pola magnesującego H_{max} :	5000 A/m;
• Częstotliwość f :	0,1 Hz;
Parametry przebiegu rozmagnesowania:	
• Max. amplituda pola rozmagnesowania H_{rmax} :	5000 A/m;
• Częstotliwość przebiegu rozmagnesującego f_{rozm} :	20 Hz;
• Współczynnik tłumienia:	1,04.

Na rysunku 10.10 przedstawiono pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły obciążającej F równej 0 kN i 12,7 kN przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 350$ A/m, dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.



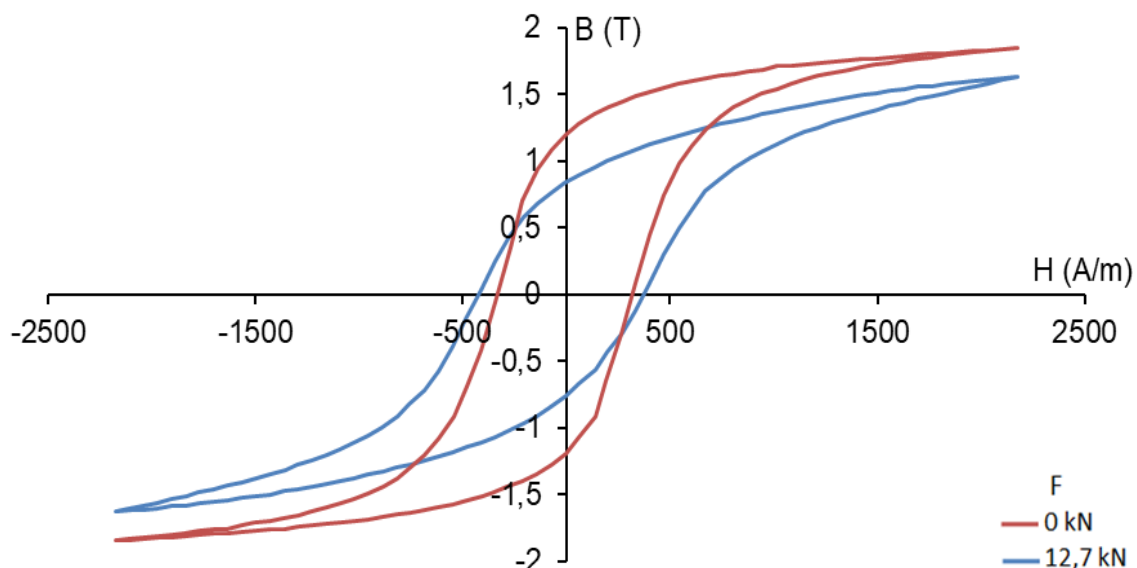
Rys. 10.10. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 10.11 przedstawiono pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły obciążającej F równej 0 kN i 12,7 kN przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 655$ A/m, dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.



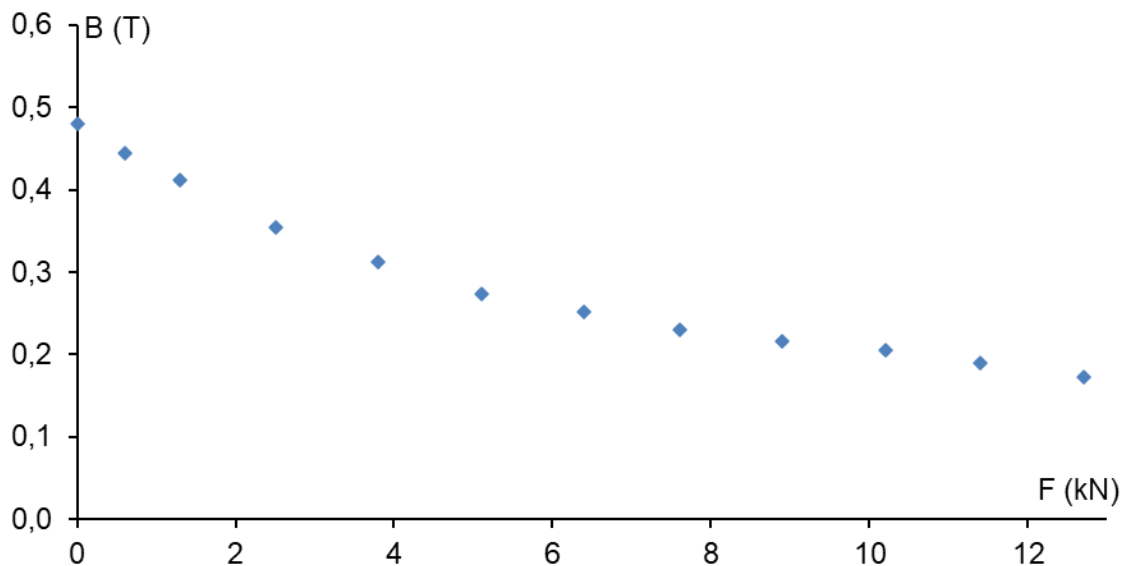
Rys. 10.11. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 10.12 przedstawiono pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły obciążającej F równej 0 kN i 12,7 kN przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 2170$ A/m, dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.



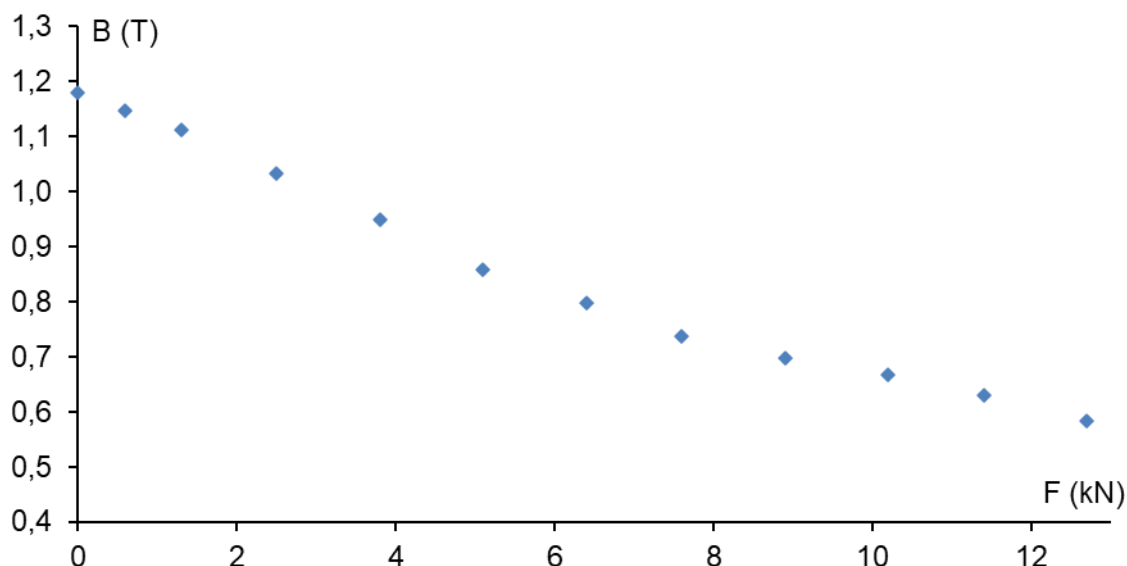
Rys. 10.12. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 10.13 przedstawiono charakterystykę magnetościśmową $B_m(F)_{H_m}$ przy ustalonej wartości amplitudy pola magnesującego $H_m = 350$ A/m, dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.



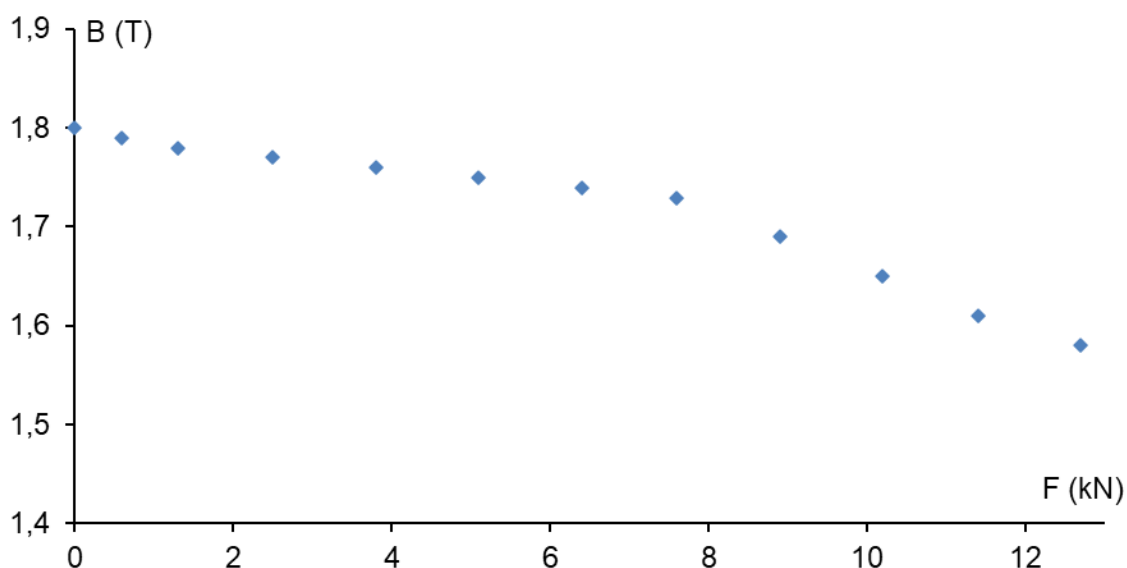
Rys. 10.13. Charakterystyki magnetościśmowe $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego $H_m = 350$ A/m, dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 10.14 przedstawiono charakterystykę magnetościśmową $B_m(F)_{H_m}$ przy ustalonej wartości amplitudy pola magnesującego $H_m = 655$ A/m, dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.



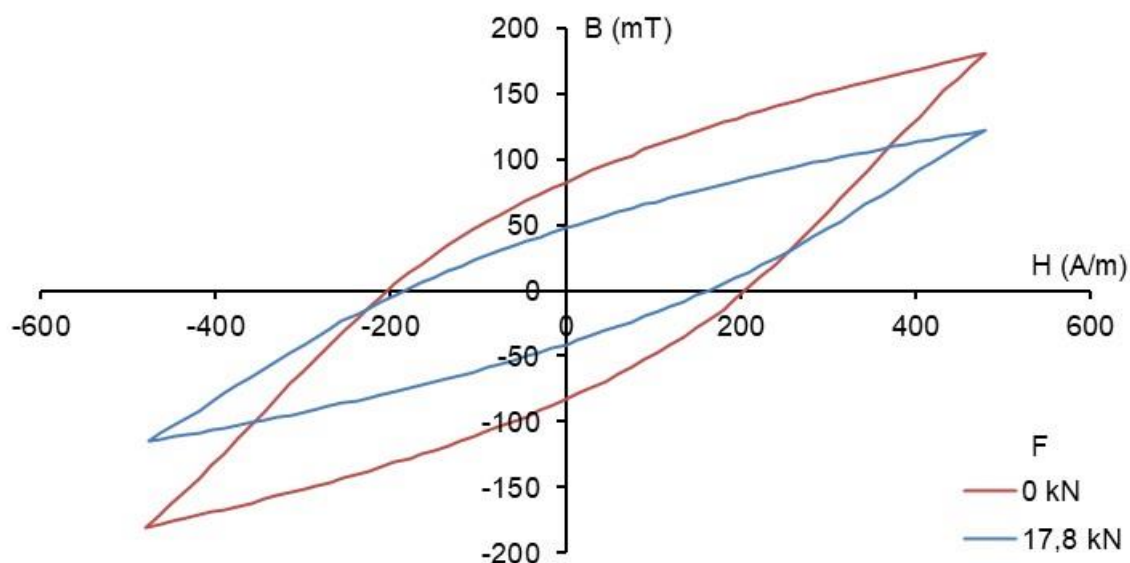
Rys. 10.14. Charakterystyki magnetościężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego $H_m = 655$ A/m, dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 10.15 przedstawiono charakterystykę magnetościężystą $B_m(F)_{H_m}$ przy ustalonej wartości amplitudy pola magnesującego $H_m = 2170$ A/m, dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.



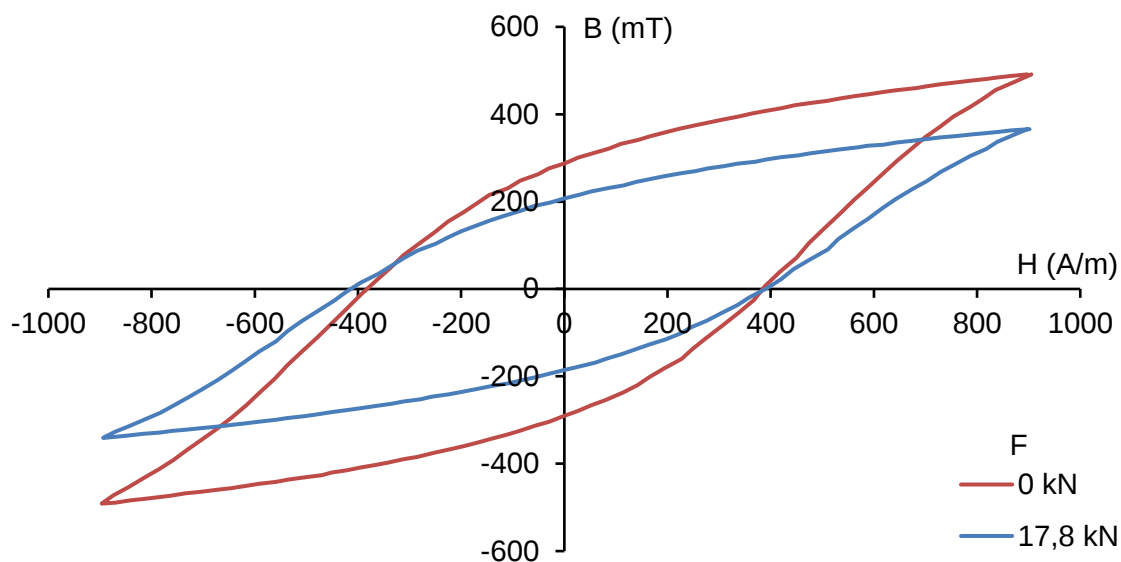
Rys. 10.15. Charakterystyki magnetościężyste $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego $H_m = 2170$ A/m, dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5.

Na rysunku 10.16 przedstawiono pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły obciążającej F równej 0 kN i 17,8 kN przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 480$ A/m, dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.



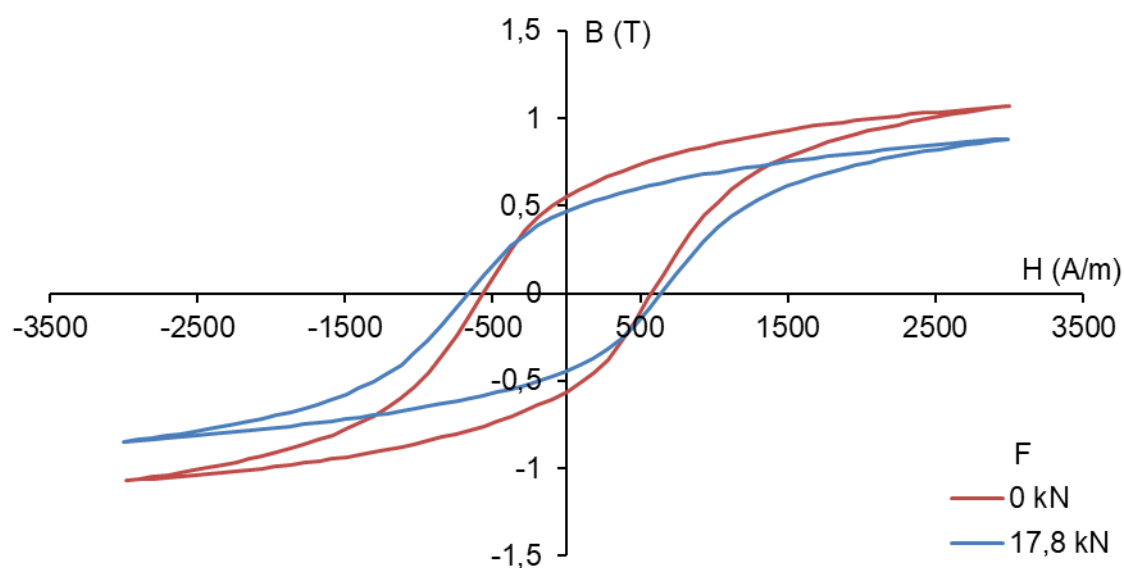
Rys. 10.16. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.

Na rysunku 10.17 przedstawiono pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły obciążającej F równej 0 kN i 17,8 kN przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 900$ A/m, dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.



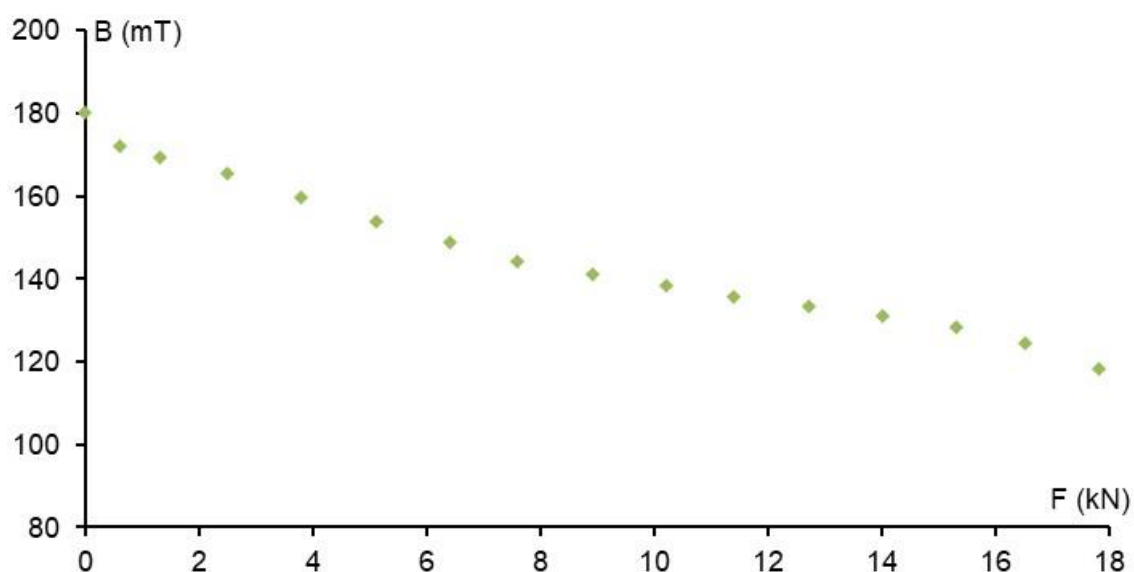
Rys. 10.17. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.

Na rysunku 10.18 przedstawiono pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły obciążającej F równej 0 kN i 17,8 kN przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 3000$ A/m, dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.



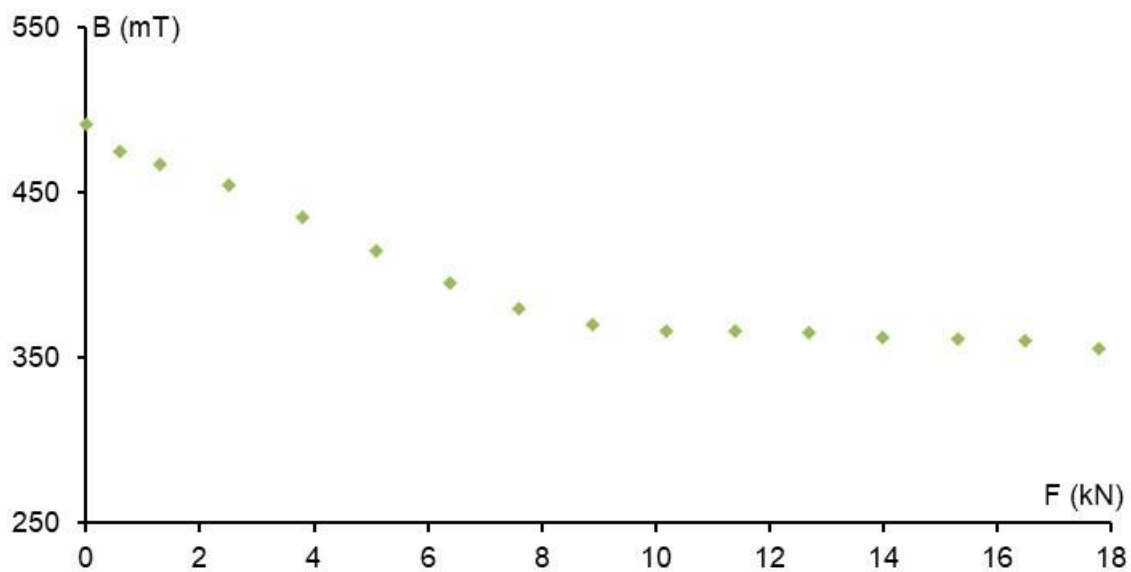
Rys. 10.18. Pętle histerezy magnetycznej $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.

Na rysunku 10.19 przedstawiono charakterystykę magnetościśmową $B_m(F)_{H_m}$ przy ustalonej wartości amplitudy pola magnesującego $H_m = 480$ A/m, dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.



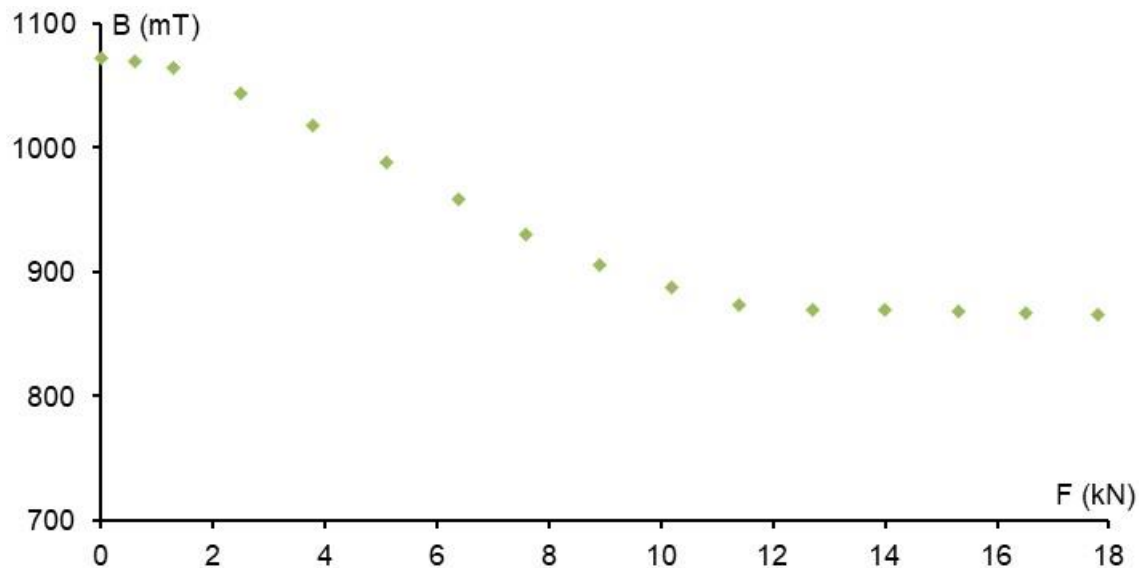
Rys. 10.19. Charakterystyki magnetościśmowe $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego $H_m = 480$ A/m, dla magnetowodu M ze stali X30Cr13

Na rysunku 10.20 przedstawiono charakterystykę magnetościśmową $B_m(F)_{H_m}$ przy ustalonej wartości amplitudy pola magnesującego $H_m = 900$ A/m, dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.



Rys. 10.20. Charakterystyki magnetoelastyczne $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego $H_m = 900$ A/m, dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.

Na rysunku 10.21 przedstawiono charakterystykę magnetoelastyczną $B_m(F)_{H_m}$ przy ustalonej wartości amplitudy pola magnesującego $H_m = 3000$ A/m, dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.



Rys. 10.21. Charakterystyki magnetoelastyczne $B_m(\sigma)_{H_m}$ przy ustalonych wartościach amplitudy pola magnesującego $H_m = 3000$ A/m, dla magnetowodu M ze stali X30Cr13.

10.4. Analiza wyników badań

Zaproponowana pierwsza konfiguracja S kratownicy, choć umożliwia osobny pomiar wpływu naprężeń ściskających i rozciągających, wymaga wykonania otworów w elementach badanych, co w rzeczywistych konstrukcjach nie jest dopuszczalne.

Z kolei druga konfiguracja M, mimo braku możliwości ocenienia osobno wpływu naprężeń rozciągających i ściskających na wartość indukcji magnetycznej, posiada dwie zasadnicze zalety. Pierwszą z nich jest możliwość stosowania jej na rzeczywistych elementach konstrukcyjnych bez ingerencji w tę konstrukcję. Drugą zaletą tej metody jest uzyskanie monotonicznej charakterystyki magnetosprężystej $B_m(\sigma)_{Hm}$.

Ze względu na powyższe porównanie lepszą metodą do monitorowania naprężeń w konstrukcjach kratownicowych jest metoda wykorzystana w drugiej konfiguracji M.

Dla metody w drugiej konfiguracji M zostały obliczone estymatory nieobciążone odchylenia standardowego rozrzutu wskazań. Wartości tych estymatorów umieszczono w tabelach 10.4 i 10.5.

Tab. 10.4. Wartość procentowa estymatora nieobciążonego odchylenia standardowego dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5

Estymator nieobciążony odchylenia standardowego (%) dla stali 13CrMo4-5			
F	H		
kN	350 A/m	655 A/m	2170 A/m
0,0	6,1	5,6	4,3
0,6	5,0	4,8	4,1
1,3	4,6	4,5	4,0
2,5	3,8	4,0	4,3
3,8	3,3	3,5	4,1
5,1	2,7	2,6	3,9
6,4	3,4	3,5	3,9
7,6	3,8	3,6	3,7
8,9	3,9	3,8	3,8
10,2	4,8	4,5	4,4
11,4	5,7	5,1	4,5
12,7	6,3	5,9	6,8

Tab. 10.5. Wartość procentowa estymatora nieobciążonego odchylenia standardowego dla magnetowodu M ze stali X30Cr13

Estymator nieobciążony odchylenia standardowego (%) dla stali X30Cr13			
	H		
F (kN)	480 A/m	900 A/m	3000 A/m
0,0	4,7	3,4	2,7
0,6	4,4	3,5	2,7
1,3	4,0	3,4	2,7
2,5	3,2	2,9	2,7
3,8	2,7	2,7	2,8
5,1	2,6	2,6	2,9
6,4	2,4	2,3	2,9
7,6	2,3	1,9	2,9
8,9	2,5	1,6	3,0
10,2	2,6	1,8	2,5
11,4	3,3	2,2	2,3
12,7	3,8	2,5	2,1
14,0	4,0	2,5	1,9
15,3	3,7	2,2	1,9
16,5	2,9	1,8	1,9
17,8	7,5	6,8	4,7

Procentowe wartości estymatora nieobciążonego odchylenia standardowego wskazują na bardzo małą niepewność w szacowaniu wartości naprężeń występujących w konstrukcji, zważywszy na dokonanie pomiarów na pięciu niezależnych zestawach próbek.

Na podstawie uzyskanych charakterystyk dla konfiguracji drugiej M można wyznaczyć czułość magnetoelastyczną. Czułość ta może być opisana zależnością (10.1) dla charakterystyk magnetoelastycznych $B_m(F)_{Hm}$:

$$k_F = \frac{\Delta B_m}{\Delta F} \quad (10.1)$$

gdzie k_F – czułość magnetoelastyczna, ΔB_m – przyrost indukcji magnetycznej maksymalnej, ΔF – przyrost siły zewnętrznej. W tabeli 10.6 i 10.7 podano maksymalne wartości czułości magnetoelastycznej dla indukcji magnetycznej maksymalnej B_m dla kratownicy w drugiej konfiguracji M.

Tab. 10.6. Maksymalne wartości czułości magnetosprężystej dla indukcji magnetycznej maksymalnej B_m dla magnetowodu M ze stali 13CrMo4-5

H_m (A/m)	350	655	1270
k_F (mT/kN)	29	34	37

Tab. 10.7. Maksymalne wartości czułości magnetosprężystej dla indukcji magnetycznej maksymalnej B_m dla magnetowodu M ze stali X30Cr13

H_m (A/m)	480	900	3000
k_F (mT/kN)	4	10	14

Zmiany wartości indukcji magnetycznej B_m od naprężeń są zależne od wartości natężenia pola magnesującego H przy jakiej został wykonany pomiar. Największe zmiany zaobserwowano przy natężeniu pola magnesującego $H_m = 850$ A/m dla magnetowodu M wykonanego dla stali 13CrMo4-5.

Przedstawione wyniki badań wskazują na możliwość wykorzystania opracowanej metody w konfiguracji M do oceny stanu naprężeń w ferromagnetycznych elementach konstrukcyjnych.

11. Modelowanie magnetoelastycznych charakterystyk stali ferromagnetycznych z zastosowaniem modelu Jilesa–Athertona

Opis modelowy magnetoelastycznych charakterystyk zmierzonych w odniesieniu do próbek ramkowych oraz kratownicy umożliwia zrozumienie fizycznych mechanizmów determinujących proces magnesowania w obecności naprężeń. Do opisu tych procesów zastosowano model Jilesa–Athertona.

W pierwszym etapie wykonano modelowanie charakterystyk magnetoelastycznych uzyskanych na próbkach ramkowych. Wyniki modelowania próbek ramkowych opublikowane w pracach [42], [47] potwierdzają możliwość wykorzystania modelu Jilesa–Athertona do modelowania magnetoelastycznych charakterystyk stali ferromagnetycznych.

W drugim etapie wykonano modelowanie charakterystyk magnetoelastycznych uzyskanych na kratownicy w konfiguracji M wykonanej ze stali 13CrMo4-5.

Jednak w modelu Jilesa–Athertona, przy założeniu, że stal 13CrMo4-5 jest w warunkach braku naprężeń, izotropowa z makroskopowego punktu widzenia, uwzględniono [42]:

- pojawienie się anizotropii osiowej spowodowanej obecnością osiowych naprężeń mechanicznych,
- wpływ naprężeń mechanicznych spowodowanych działaniem siły mechanicznej F na gęstość ścian domenowych w materiale (opisaną parametrem a modelu), średnią energię konieczną do pokonania zaczepu ściany domenowej (parametr k modelu), odwracalność procesu magnesowania (parametr c modelu) oraz sprzężenie międzydomenowe (parametr α modelu).

Anizotropię osiową [45], [102] w obciążanych elementach stalowych, związaną z pojawieniem się naprężeń mechanicznych opisano za pomocą równania (5.7) przedstawionego w rozdziale 5.1 pracy.

Do wyznaczenia zestawu parametrów modelu Jilesa–Athertona dla początkowej, niewielkiej wartości naprężeń, zastosowano minimalizację metodą ewolucji różnicowej [97], [23]. Jako funkcję celu przyjęto sumę kwadratów różnic pomiędzy wynikami pomiaru, a wynikami modelowania, daną zależnością (6.1). Następnie, dla kolejnych wartości siły F , przeprowadzono optymalizację bezgradientową metodą Nedlera–Meada [78]. W trakcie tej optymalizacji jako wartość początkową identyfikowanych parametrów przyjmowano wartości uzyskane w trakcie identyfikacji parametrów dla poprzedniego punktu [45]. W rezultacie, ze

względem na niewielkie zmiany wartości siły F dla kolejnych kroków, możliwe było zastosowanie lokalnie optymalizacji bezgradientowej.

Ponieważ algorytm minimalizacji metodą ewolucji różnicowej jest algorytmem stosunkowo nowym, w literaturze nie podano wytycznych w zakresie doboru metaparametrów procesu optymalizacji. Z tego względu przeprowadzono badania wpływu doboru metaparametru $DE-n$, określającego modyfikację algorytmu ewolucji różnicowej oraz parametru CR określającego wartość prawdopodobieństwa krzyżowania [23] w trakcie wykonywania algorytmu optymalizacji różnicowej.

Algorytm ewolucji różnicowej został zaimplementowany w pakiecie *optim* oprogramowania OCTAVE. Został uruchomiony na pojedynczym procesorze Intel(R) Xeon(R) 3.50GHz CPU. Czas trwania obliczeń jednego uruchomienia wynosił około 16 minut, przy czym dla każdej wartości metaparametrów $DE-n$ oraz CR zostało przeprowadzone 25 procesów optymalizacji dla każdego algorytmu ewolucji różnicowej [5], [45].

Wyniki badania wpływu doboru metaparametru $DE-n$, określającego modyfikację algorytmu ewolucji różnicowej przedstawiono w tabeli 11.1.

Tab. 11.1. Wyniki badania wpływu doboru metaparametru $DE-n$, określającego modyfikację algorytmu ewolucji różnicowej ($G_{\bar{s}r}$ – średnia wartość funkcji celu, G_{min} – najlepsza wartość funkcji celu, $\sigma(G)$ – odchylenie standardowe rozrzutu uzyskanych wartości funkcji celu)

Metaparametr DE-n	$G_{\bar{s}r}$	G_{min}	$\sigma(G)$
DE-1	0,566	0,503	0,043
DE-2	0,507	0,469	0,026
DE-3	0,495	0,460	0,031
DE-4	0,606	0,509	0,054
DE-5	0,599	0,536	0,043
DE-6	0,622	0,503	0,062

W kolejnym kroku, algorytm ewolucji różnicowej DE-2, dla którego została uzyskana najniższa wartość odchylenia standardowego rozrzutu wskazań uzyskanych wartości funkcji celu, został przetestowany dla trzech wybranych wartości prawdopodobieństwa krzyżowania CR . Wyniki badania wpływu doboru metaparametru CR przedstawiono w tabeli 11.2.

Tab. 11.2. Wyniki badania wpływu doboru metaparametru CR , określającego wartość prawdopodobieństwa krzyżowania (G_{sr} – średnia wartość funkcji celu, G_{min} – najlepsza wartość funkcji celu, $\sigma(G)$ – odchylenie standardowe rozrzutu uzyskanych wartości funkcji celu)

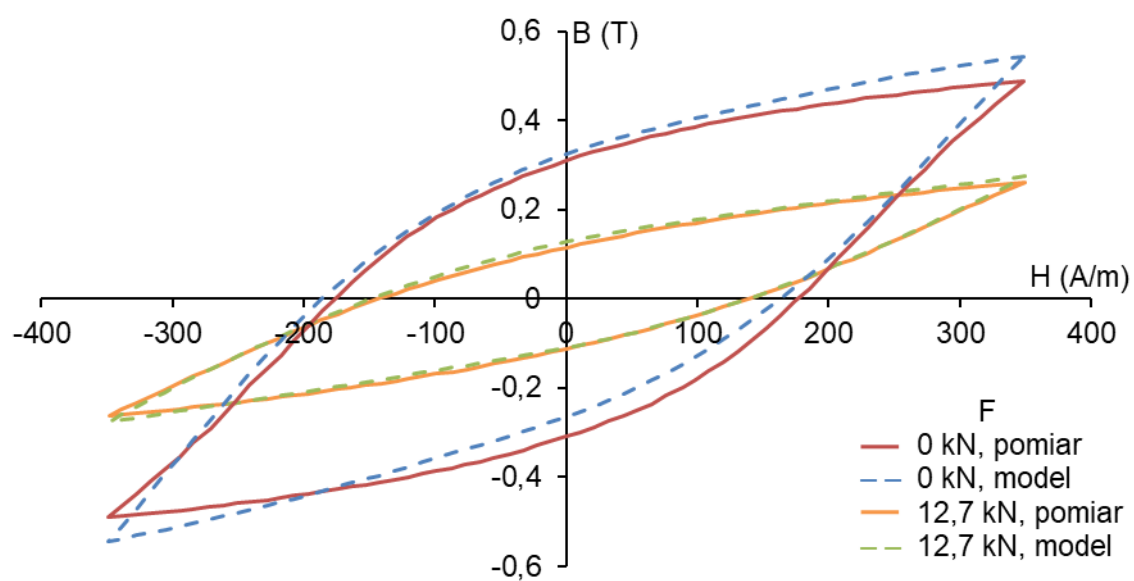
CR	G_{sr}	G_{min}	$\sigma(G)$
0,5	0,507	0,469	0,026
0,7	0,461	0,450	0,004
1	0,458	0,458	0

Z danych podanych w tabeli 11.2 wynika, że wzrost wartości parametru krzyżowania CR umożliwia uzyskanie bardziej spójnych i niższych wartości wyników funkcji celu. Dlatego przy zastosowaniu ewolucji różnicowej do identyfikacji parametrów modelu Jilesa–Athertona przyjęto wartość współczynnika krzyżowania CR wynoszącą 1.

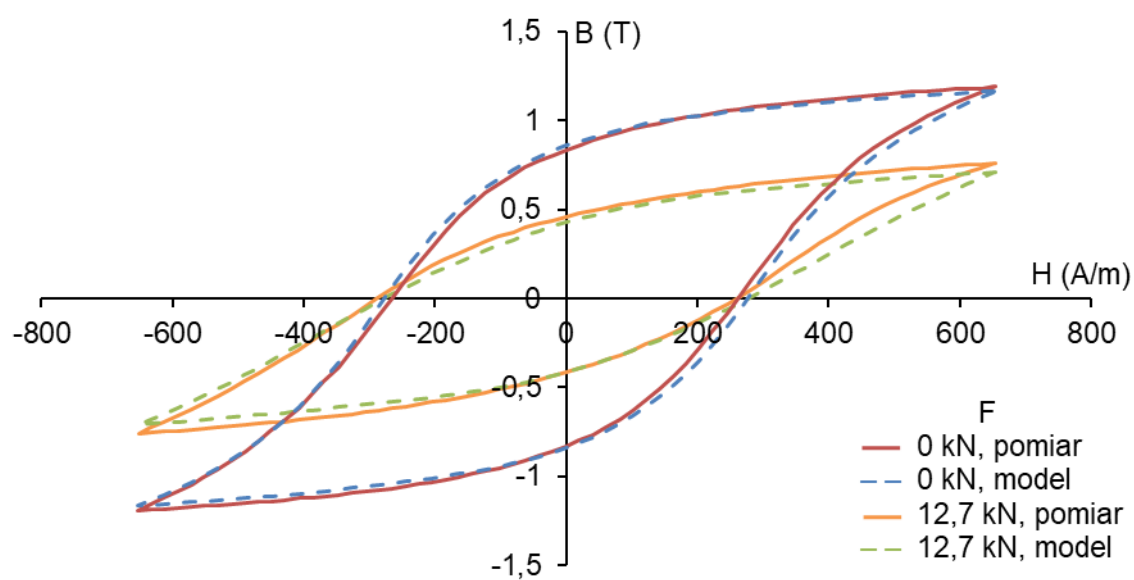
Zgodnie z przyjętym założeniem stal konstrukcyjną 13CrMo4-5 można uznać za materiał makroskopowo izotropowy w stanie nieobciążonym. Dlatego w początkowym etapie identyfikacji parametrów modelu Jilesa–Athertona średnia gęstość energii anizotropii K_{an} była równa 0. W wyniku identyfikacji parametrów modelu z wykorzystaniem ewolucji różnicowej (metaparametry $DE-2$ oraz $CR=1$) uzyskano następujące parametry modelu Jilesa–Athertona: $a = 289$ A/m, $k = 296$ A/m, $c = 0,599$, $= 4,15 \cdot 10^4$, $M_s = 1,661 \cdot 10^5$ A/m.

W kolejnym kroku wyznaczono zależność parametrów modelu Jilesa–Athertona w funkcji siły F obciążającej badany układ. W tym celu wykorzystano optymalizację bezgradientową z wykorzystaniem algorytmu Nedlera–Meada. W trakcie identyfikacji parametrów przyjęto stałą wartość magnetyzacji nasycenia M_s , ponieważ magnetyzacja nasycenia nie zależy od naprężeń mechanicznych [52].

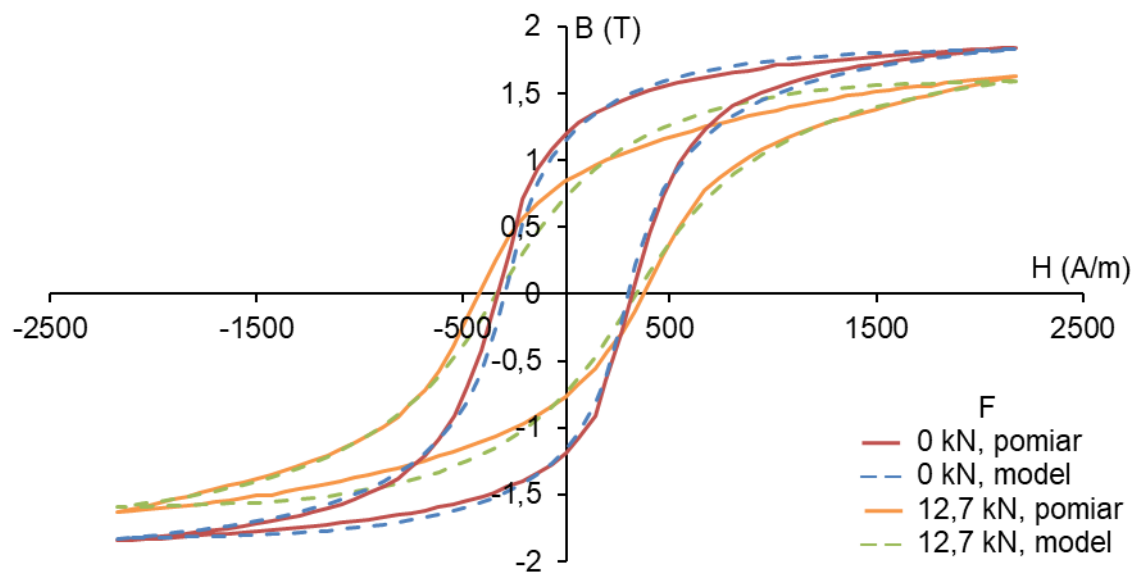
Na rysunkach 11.1, 11.2, 11.3 przedstawiono wyniki modelowania wpływu siły F obciążającej kratownicę na kształt pętli histerezy magnetycznej obciążanych elementów. Natomiast na rysunku 11.4 przedstawiono wyniki modelowania wpływu siły F na wartości parametrów a , k , c , K_{an} oraz α modelu Jilesa–Athertona.



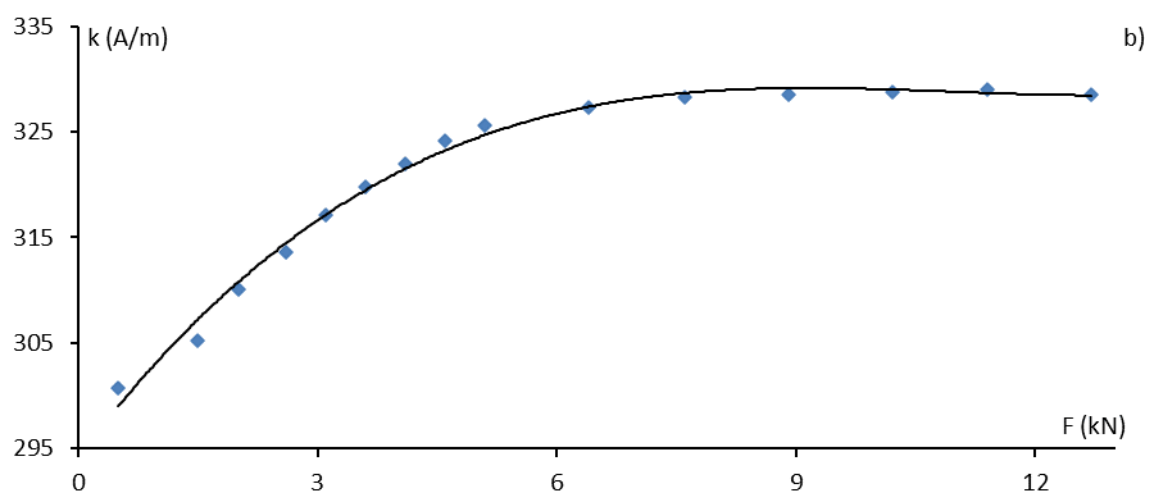
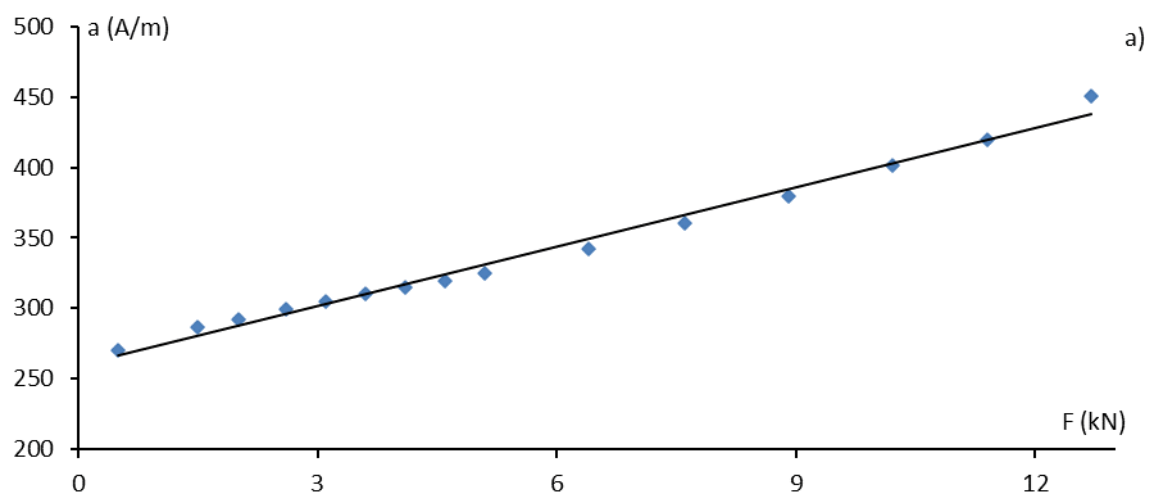
Rys. 11.1. Wyniki pomiarowe i modelowania $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły, przy natężeniu pola magnesującego $H_c = 350$ A/m

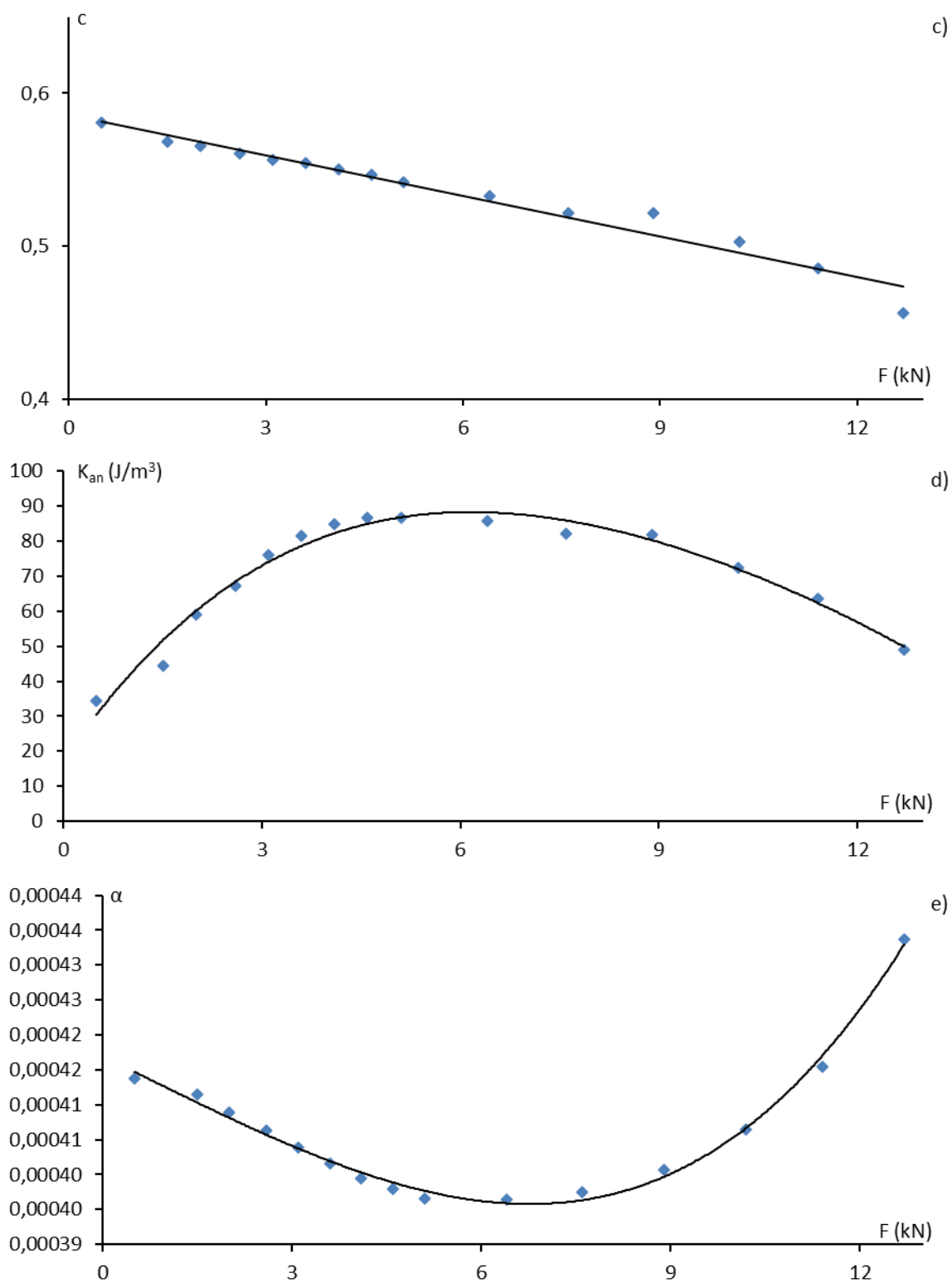


Rys. 11.2. Wyniki pomiarowe i modelowania $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły, przy natężeniu pola magnesującego $H_c = 655$ A/m



Rys. 11.3. Wyniki pomiarowe i modelowania $B(H)_\sigma$ przy ustalonych wartościach siły, przy natężeniu pola magnesującego $H_c = 2170$ A/m





Rys. 11.4. Zależność parametrów modelu Jilesa–Athertona od naprężenia:
a) a – współczynnik opisujący gęstość ścian domenowych, b) k – współczynnik opisujący średnią energię konieczną do przesunięcia ściany domenowej przez punkt zaczepienia, c) c – odwracalność magnetyzacji, d) K_{an} – anizotropia gęstości energii, e) α – współczynnik opisujący sprężenie międzydomenowe (— linia trendu).

Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość zastosowania modelu Jilasa–Athertona (z uwzględnieniem anizotropii osiowej) do opisu wpływu naprężeń na pętlę histerezy magnetycznej stali 13CrMo4-5.

W rezultacie możliwe jest przewidzenie parametrów modelu w próbce poddanej działaniu naprężeń lub odtworzenie wartości naprężeń mechanicznych poprzez analizę kształtu pętli histerezy magnetycznej badanej próbki.

12. Podsumowanie i wnioski końcowe

W ramach pracy zbadano właściwości magnetyczne i magnetoSprężyste wybranych typów stali konstrukcyjnych. W badaniach uwzględniono również wpływ temperatury oraz wpływ czasu eksploatacji na właściwości magnetyczne materiału.

W celu przeprowadzenia badań została opracowana nowa metodyka badań charakterystyk magnetoSprężystych wykorzystująca próbki ramkowe. Opracowana metodyka umożliwia badanie materiału przy spełnieniu warunku zamkniętego magnetowodu przy jednoczesnym zadawaniu naprężeń od sił zewnętrznych. W ramach pracy przeprowadzono także analizę rozkładu naprężeń oraz rozkładu indukcji magnetycznej w badanych próbkach ramkowych. Wyniki modelowania potwierdziły, że opracowana metodyka umożliwia pomiary wpływu jednoznacznie zdefiniowanych naprężeń mechanicznych na charakterystyki magnesowania stali konstrukcyjnych, mierzone w warunkach zdefiniowanej wartości pola magnesującego równoległego do naprężeń.

Zrealizowane w ramach pracy badania z wykorzystaniem próbek ramkowych wykazały możliwość uzyskania znacznych czułości magnetoSprężystych w próbkach ze stali konstrukcyjnych powszechnie stosowanych w inżynierii lądowej. Zmiana wartości indukcji magnetycznej przekracza 26% dla naprężeń o wartości do 150 MPa. Istotnym wynikiem badań jest pomijalny wpływ temperatury na charakterystyki magnetoSprężyste. Zmiany właściwości magnetycznych w zakresie zmiany temperatury od -20°C do 60°C nie przekraczają 2%, co ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia potencjalnych zastosowań praktycznych. Przeprowadzone w ramach pracy badania przyspieszonego starzenia (proces „step cooling”) potwierdziły, że wpływ czasu nie wpływa znacząco na właściwości magnetoSprężyste badanych materiałów konstrukcyjnych, przez co może zostać pominięty.

Na podstawie wyników badań z wykorzystaniem próbek ramkowych opracowano dwie konfiguracje kratownic, umożliwiające badania magnetoSprężystych właściwości materiałów konstrukcyjnych w układzie modelowym w konfiguracji zbliżonej do stosowanej w warunkach przemysłowych.

W pierwszej konfiguracji kratownicy (konfiguracja S) badany magnetowód zamykał się w jednym elemencie. Dzięki temu obserwowano jednorodny rozkład naprężeń w elemencie. Jednak zastosowanie konfiguracji S wiąże się z koniecznością wykonywania otworów w elementach. Należy podkreślić, że maksymalne zmiany wartości indukcji magnetycznej w rozciągającym elemencie kratownicy wyniosły 25%, a w elemencie ściskającym przekroczyły 75%.

W drugiej konfiguracji kratownicy (konfiguracja M) magnetowód kratownicy jest zamknięty w obrębie trzech elementów kratownicy. Takie rozwiązanie nie wymaga wykonywania otworów w elementach, jednak powoduje niejednorodny rozkład naprężeń. W konfiguracji M maksymalna zmiana wartości indukcji magnetycznej wyniosła 64%. Pomimo mniejszych zmian indukcji magnetycznej pod wpływem naprężeń w kratownicy w konfiguracji M stwierdzono, że konfiguracja ta jest dogodniejsza do stosowania w już istniejących konstrukcjach, ponieważ nie wymaga ona wykonywania dodatkowych otworów do uzwojenia.

Badania przeprowadzone na modelowych kratownicach potwierdziły możliwość stosowania opracowanej metody do monitorowania stanu wybranych konstrukcji przy czułości pomiarowej przekraczającej 39 mT/kN. Całość zrealizowanych badań oraz przedstawionych wyników potwierdza tezę pracy stanowiącą, że ocena stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych wykonanych ze stali ferromagnetycznej może być zrealizowana z wykorzystaniem zjawiska magnetosprężystego.

Wyniki badań uzyskane z zastosowaniem opracowanej metodyki badawczej umożliwiają lepsze zrozumienie procesów magnesowania w warunkach działania naprężeń od sił zewnętrznych, co otwiera nowe możliwości monitorowania stanu konstrukcji. Dlatego dalsze badania należy rozwijać w zakresie:

- poznania magnetosprężystych charakterystyk innych stali konstrukcyjnych. W przyszłości należy utworzyć otwartą bazę danych zawierającą charakterystyki magnetyczne i magnetosprężyste wszystkich stosowanych praktycznie stali ferromagnetycznych,
- monitorowania prętów zbrojeniowych konstrukcji żelbetowych oraz dostosowania metodyki badawczej tak, aby był możliwy również monitoring również obiektów wykonanych w tej technologii,
- ciągłego monitorowania stanu naprężeń w kadłubach statków. Obecnie stosowane metody obejmują jedynie badania okresowe i nie umożliwiają monitorowania stanu naprężeń w trakcie eksploatacji.

Bibliografia

- [1] Augustyniak B. (2019). Wyznaczanie naprężenia z wykorzystaniem efektu Barkhausena – badania porównawcze i perspektywa rozwoju metody. *Energetyka*, 11, 731-734.
- [2] Bagavathiappan, S., Lahiri, B., Saravanan, T., Philip, J., Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, 60, 35-55. DOI: 10.1016/j.infrared.2013.03.006
- [3] Baodong B., Jiayin W., Keqing Z. (2011). Identification of the Jiles-Atherton model parameters using simulated annealing method. *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1–4. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073612
- [4] Beyer, H. (2001). The theory of evolution strategies. *Natural Computing Series*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-04378-3
- [5] Biedrzycki, R., Jackiewicz, D., Szewczyk, R. (2014). Reliability and efficiency of differential evolution based method of determination of Jiles-Atherton model parameters for X30Cr13 Corrosion Resisting Martensitic steel. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 8, 63–68. DOI: 10.14313/JAMRIS_4-2014/39
- [6] Biedrzycki R., Szewczyk R., Švec P., Winiarski W. (2015). Determination of Jiles-Atherton model parameters using differential evolution. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 317, 11-18. DOI: 10.1007/978-3-319-10990-9_2
- [7] Bieńkowski, A. (1992). Some problems of measurement of magnetostriction in ferrites under stresses. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 112, 143-145. DOI: 10.1016/0304-8853(92)91136-H
- [8] Bieńkowski, A., Szewczyk, R. (2002). New possibility of utilizing amorphous ring cores as stress sensor. *Physica Status Solidi (a)*, 189, 787-790. DOI: 10.1002/1521-396X(200202)189:3<787::AID-PSSA787>3.0.CO;2-G
- [9] Bieńkowski, A., Szewczyk, R., Salach, J. (2010). Industrial application of magnetoelastic force and torque sensors. *Acta Physica Polonica A*, 118(5), 1008–1009. DOI: 10.12693/aphyspola.118.1008
- [10] Bieńkowski, A., Szewczyk, R., Wiśniewska, A. (2004) Magnetostrictive properties and magnetoelastic Villari effect in the high-permeability Mn-Zn ferrites. *Czechoslovak Journal of Physics* 54, 169–172. DOI: 10.1007/s10582-004-0056-9
- [11] Bozorth R. M. (1951). *Ferromagnetism*. Van Nostrand.
- [12] Brzoska, Z. (1972). *Wytrzymałość materiałów*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- [13] Burggräf, P. (2006). *Design and development of bamboo bridges for the specific circumstances in developing countries* [Thesis, Institut für Allgemeine Mechanik], DOI: 10.13140/RG.2.2.35399.60326
- [14] Carrizo, R. (27.09.2022). *Materials selection for special services*. Arveng training & engineering. <https://arvengtraining.com/en/materials-selection-for-special-services/>
- [15] Cui, J., Shield, T., Wuttig, M. (2004). Magnetostriction of stress-induced martensite. *Applied Physics Letters*, 85(9), 1642–1644. DOI: 10.1063/1.1785853s
- [16] Chady, T., Sikora, R. (2013). Badania nieniszczące: historia, stan obecny i perspektywy rozwoju. *Przegląd Spawalnictwa*, 12, 13-15.
- [17] Chikazumi, S. (2009). *Physics of ferromagnetism*. Oxford Science Publications.

- [18] Chmielewski, M., Piotrowski, L., Augustyniak, B. (2016). Procedura szybkiego wyznaczania stanu naprężeń własnych za pomocą sondy z wirującym przemiennym polem magnetycznym – przypadek złączy spawanych ze stali magnetycznie anizotropowej. *Energetyka*, 6, 318-325.
- [19] Chodor, L., Malik, Ł. (2014). Optimization of the supporting structure of steel hall. Short Papers. *Scientific-Technical Conference ZK2014- Metal Structures*, 195–198.
- [20] Chwastek, K. (2012). *Makroskopowe modele magnesowania oparte na koncepcji pola efektywnego*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [21] Cullity, B., Graham, C. (2009). *Introduction to Magnetic Materials*. IEEE Press. John Wiley and Sons.
- [22] Dapino, M. (2002). *Magnetosrtrictive Materials*. Encyclopedia of Smart Materials. John Wiley and Sons. DOI: 10.1002/0471216275.esm051
- [23] Das, S., Abraham, A., Chakraborty, U. K., Konar, A. (2009). Differential evolution using a neighborhood-based mutation operator. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(3), 526–553. DOI: 10.1109/tevc.2008.2009457
- [24] Dybała, J., Nadulicz, K. (2015). Zastosowanie metody magnetycznej pamięci metalu w diagnostyce obiektów technicznych. *Problemy Techniki Uzbrojenia*, 133, 63-80.
- [25] Eifler D., Smaga M, Klein M. (2016). Fatigue monitoring of metals based on mechanical hysteresis, electromagnetic ultrasonic, electrical resistance and temperature measurements. *Mechanical Engineering Journal*, 3(6). DOI: 10.1299/mej.16-00303
- [26] Feng, B., Wu, J., Tu, H., Tang, J., Kang, Y. (2022). A review of magnetic flux leakage nondestructive testing. *Materials*, 15(20), 7362. DOI:10.3390/ma15207362
- [27] Feoktistov, V. (2006). *Differential Evolution. Optimization and Its Applications*. Springer. DOI: 10.1007/978-0-387-36896-2
- [28] García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E. (2011). Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11(3), 2525-2565. DOI: 10.3390/s110302525
- [29] Garikepati, P., Chang, T., Jiles, D. (1988). Theory of ferromagnetic hysteresis: evaluation of Sstress from hysteresis curves. *IEEE Transactionson Magnetics*, 24(6), 2922-2924. DOI: 10.1109/20.92289
- [30] Glinka, T., Szymaniec, S. (2020). Diagnostyka maszyn i urządzeń – uwagi ogólne. *Napędy i Sterowanie*, 22(5), 36–49.
- [31] Grattan, K., Sun, T. (1999). Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators A: Physical*, 82(1-3), 40-61. DOI: 10.1016/S0924-4247(99)00368-4
- [32] Hansen, N., Ostermeier, A. (2001). Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies. *Journal Evolutionary Computation*, 9(2), 159-195. DOI: 10.1162/106365601750190398
- [33] Heinzl, J., Sackmann, D., Karpuschewski, B. (2019). Micromagnetic Analysis of Thermally Induced Influences on Surface Integrity Using the Burning Limit Approach. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(4), 93. DOI: 10.3390/jmmp3040093

- [34] Hsieh, J. (1974). Thickness and surface morphology of GaAs LPE layers grown by supercooling, step-cooling, equilibrium-cooling, and two-phase solution techniques. *Journal of Crystal Growth*, 27, 49-61. DOI: 10.1016/S0022-0248(74)80049-7
- [35] Inaudi, D., Conte, J., Perregaux, N., Vurpillot, S. (1998). Statistical analysis of under-sampled dynamic displacement measurement. *Proceedings of the SPIE*, 3325, 104-110. DOI: 10.1117/12.310599
- [36] Ivanova, Y. (2018). Non-destructive monitoring of tensile of mild steel samples by magnetic Barkhausen and ultrasonic methods. *MATEC Web of Conferences*, 145, 05007. EDP Sciences.
- [37] Jackiewicz, D. (2015). Stress assessment in steel truss structures on the basis of magnetoelastic effects. In R. Jabłoński & T. Březina (Eds.), *Advanced Mechatronics Solutions*, 467–472. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-23923-1_68
- [38] Jackiewicz, D., Juś, A., Szewczyk, R., Bieńkowski, A. (2017). Two methods of magnetoelastic effect utilization to evaluate mechanical strain in the truss structures. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1, 31–33. DOI: 10.15199/48.2017.07.08
- [39] Jackiewicz, D., Kachniarz, M., Bieńkowski, A. (2017). Investigation of the Magnetoelastic Villari Effect in Steel Truss. In R. Jabłoński & R. Szewczyk (Eds.), *Recent Global Research and Education: Technological Challenges*, 519, 63–70. DOI: 10.1007/978-3-319-46490-9_9
- [40] Jackiewicz, D., Kachniarz, M., Roźniatowski, K., Dworecka, J., Szewczyk, R., Salach, J., Bieńkowski, A., Winiarski, W. (2015). Temperature Resistance of Magnetoelastic Characteristics of 13CrMo4-5 Constructional Steel. *Acta Physica Polonica A*, 127, 614–616. DOI: 10.12693/APhysPolA.127.614
- [41] Jackiewicz, D., Nowicki, M., Szewczyk, R., Bieńkowski, A., Kachniarz, M., Salach, J., Kamiński, M. (2015). Application of Magnetoelastic Effects for Stress Assessment and Risk Mitigation in Constructions. *Journal of Engineering Studies and Research*, 21, 65–70.
- [42] Jackiewicz, D., Salach, J., Szewczyk, R., Bieńkowski, A. (2014). Application of Extended Jiles-Atherton Model for Modelling the Influence of Stresses on Magnetic Characteristics of the Construction Steel. *Acta Physica Polonica A*, 126, 392–393. DOI: 10.12693/APhysPolA.126.392
- [43] Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Bieńkowski, A. (2015). Utilizing magnetoelastic effect to monitor the stress in the steel truss structures. *Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis*, 66, 178–181.
- [44] Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Bieńkowski, A., Kachniarz, M. (2015). New methodology of testing the stress dependence of magnetic hysteresis loop of the L17HMF heat resistant steel casting. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 9, 52–55. DOI: 10.14313/JAMRIS_2-2015/18
- [45] Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Kachniarz, M., Biedrzycki, R. (2017). Modelling the influence of stresses on magnetic characteristics of the elements of the truss using extended Jiles-Atherton model. *Acta Physica Polonica A*, 131(4), 1189–1191. DOI: 10.12693/aphyspolA.131.1189
- [46] Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Salach, J. (2012). Modelowanie charakterystyk magnesowania stali konstrukcyjnych. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 16(2), 552-555.

- [47] Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Salach, J. (2013). Mathematical and computer modelling of the influence of stress on magnetic characteristics of the construction steels. *Theoretical and Applied Informatics*, 25, 17–27. DOI: 10.2478/thai-2013-0002
- [48] Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Salach, J. (2013). Modelling the magnetic characteristics and temperature influence on construction steels. *Solid State Phenomena*, 199, 466–471. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.199.466
- [49] Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Salach, J., Bieńkowski, A., Kachniarz, M. (2014). Influence of stresses on magnetic B-H characteristics of X30Cr13 corrosion resisting martensitic steel. In R. Szewczyk, C. Zieliński, & M. Kaliczyńska (Eds.), *Recent Advances in Automation, Robotics and Measuring Techniques*, 267, 607–614. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-05353-0_57
- [50] Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Salach, J., Bieńkowski, A., Wolski, K. (2014). Investigation method for the magnetoelastic characteristics of construction steels in nondestructive testing. In T. Březina & R. Jabłoński (Eds.), *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*, 479–486. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-02294-9_61
- [51] James, R., Wuttig, M. (1998). Magnetostriction of martensite. *Philosophical Magazine A*, 77(5), 1273–1299. DOI: 10.1080/01418619808214252
- [52] Jiles D. (2015). Introduction to magnetism and magnetic materials. CRC Press. DOI: doi.org/10.1201/b18948
- [53] Jiles, D., Atherton, D. (1984). Theory of ferromagnetic hysteresis (invited). *Journal of Applied Physics*, 55(6), 2115–2120. DOI: 10.1063/1.333582
- [54] Jiles, D., Atherton, D. (1986). Theory of ferromagnetic hysteresis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 61, 48–60. DOI: 10.1016/0304-8853(86)90066-1
- [55] Jiles, D., Ramesh, A. , Shi Y., Fang X. (1997). Application of the anisotropic extension of the theory of hysteresis to the magnetization curves of crystalline and textured magnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 33(5), 3961–3963. DOI: 10.1109/20.619629
- [56] Johny, J., Amos, S. and Prabhu, R. (2021). Optical fibre-based sensors for oil and gas applications. *Sensors*, 21(18), 6047. DOI: 10.3390/s21186047
- [57] Kachniarz, M., Jackiewicz, D. (2017). Study on the magnetizing frequency dependence of magnetic characteristics and power losses in the ferromagnetic materials. In R. Jabłoński & R. Szewczyk (Eds.), *Recent Global Research and Education: Technological Challenges*, 519, 39–45. DOI: 10.1007/978-3-319-46490-9_6
- [58] Kachniarz, M., Jackiewicz, D., Nowicki, M., Bieńkowski, A., Szewczyk, R., Winiarski, W. (2015). Magnetoelastic Characteristics of Constructional Steel Materials. In J. Awrejcewicz, R. Szewczyk, M. Trojnecki, & M. Kaliczyńska (Eds.), *Mechatronics - Ideas for Industrial Application*, 317, 307–315. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-10990-9_28
- [59] Kachniarz, M., Jackiewicz, D., Roźniatowski, K., Dworecka, J., Szewczyk, R., Salach, J., Bieńkowski, A., Winiarski, W. (2014). Charakterystyki temperaturowe i magnetoelastyczne stali 13CrMo4-5 z uwzględnieniem step-cooling test. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 98, 119–128.
- [60] Kaczkowski, Z. (1978). *Materiały piezomagnetyczne i ich zastosowania*. Wydawnictwo Naukowe PWN.

- [61] Kaczmarek, Z. (2006). Światłowodowy czujnik ciśnień impulsowych z siatką Bragga. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 52(4), 24-28.
- [62] Kawka, A. (2022). *Doświadczenia z badania stanu zmienności naprężeń w ciągłych nośnych naczyń wyciągowych metodą magnetycznej pamięci metalu*. Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego Sp. z o. o. – Łędziny, cbid.pl.
- [63] Kluth, R., Watley D., Farhadiroushan, M., Park, D., Lee, S., Kim, J., Kim, Y. (2006). Case Studies on Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS) by using optic fibre. *Proceedings of the International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2-5.
- [64] Kłysz, S. (2015). *Podstawy wytrzymałości materiałów*. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych.
- [65] Kowalewski, Z., Szymczak, T. (2013). Podstawy tensometrii elektrooporowej oraz praktyczne jej zastosowania. *Dziewiętnaste Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów*, 69-91.
- [66] Kownacki, C. (2008). Estymacja rozkładu naprężeń w funkcji głębokości warstwy wierzchniej łopatkę sprężarki osiowej metodą analizy falkowej sygnału efektu Barkhausena. *Acta Mechanica et Automatica*, 2(1), 51-56.
- [67] Kwun, H. (1985). Investigation of the dependence of Barkhausen noise on stress and the angle between the stress and magnetization directions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 49(3), 235-240.
- [68] Langman, R. (1985). The effect of stress on the magnetization of mild steel at moderate field strengths. *IEEE Transactions on Magnetics*, 21(4), 1314-1320. DOI: 10.1109/TMAG.1985.1063901.
- [69] Langman, R. (1990). Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26(4), 1246-1251. DOI: 10.1109/20.54015
- [70] Lewińska-Romicka, A. (1998). *Badania magnetyczne*. Wydawnictwo Biuro Gamma.
- [71] Lewińska-Romicka, A. (2001). *Badania nieniszczące*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [72] Lewińska-Romicka, A. (2009). Metody diagnostyki urządzeń energetycznych w elektrowniach. *Badania nieniszczące. Część I. Metody wykrywania powierzchniowych nieciągłości materiałów*. *Elektro info*, 72, 94-100.
- [73] Liorzou F., Phelps B., Atherton D. (2000). Macroscopic models of magnetization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36, 418-428. DOI: 10.1109/20.825802
- [74] Liu J-G, Becker W-J. (2001). Force and stress measurements with eddy current sensors. *The 10. International Sensor Fairs and Conference*, 2, 23-28. DOI: 10.13140/2.1.4425.7285
- [75] Mikulski S. (2013). Metody triangulacji laserowej w skanerach trójwymiarowych. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 75, 239-245.
- [76] Mohri, K., Sudoh, E. (1981). New extensometers using amorphous magnetostrictive ribbon wound cores. *IEEE Transactions on Magnetics*, 17(3), 1317-1319. DOI: 10.1109/TMAG.1981.1061216

- [77] Montgomery, A., Wild, P., Clapham, L. (2006). Factors Affecting Magnetic Flux Leakage Inspection of Tailor-Welded Blanks, *Research in Nondestructive Evaluation*, 17, 85-99, DOI: 10.1080/09349840600689509
- [78] Nelder, J. A., Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7(4), 308–313. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308
- [79] Nowak P, Szewczyk R, Ostaszewska-Liżewska A. (2021). Inverse transformation in eddy current tomography with continuous optimization of reference defect parameters. *Materials*, 14(17), 4778. DOI: 10.3390/ma14174778
- [80] Nowicki, M., Szewczyk, R. (2012). Magnetowizja słabych pól magnetycznych w systemach zapewnienia bezpieczeństwa publicznego. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 12, 181-186.
- [81] Opara, K. (2014). *Analiza algorytmu ewolucji różnicowej i jego zastosowanie w wyznaczaniu zależności statystycznych*. [Rozprawa doktorska, Polska Akademia Nauk].
- [82] Pałkowski, S. (2009). *Konstrukcje stalowe: wybrane zagadnienia obliczania i projektowania*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [83] Pashagin, A., Benklevskaya, N. (2000). Magnetic-powder testing of components using magnetic indicator packages. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 36(9), 640-646. DOI: 10.1007/BF02759441
- [84] Pietruszewicz, T. (2008). Badanie struktur słaboprzewodzących metodą magnetycznej tomografii indukcyjnej. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 236, 117- 128.
- [85] Qu, Z., Jiang, P. and Zhang, W. (2020). Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques. *Sensors* 20(14), 3851. DOI: 10.3390/s20143851
- [86] Ramesh, A., Jiles D., Roderick, J. (1996) A model of anisotropic anhysteretic magnetization. *IEEE Transactions on Magnetism*, 32(5), 4234-4236. DOI: 10.1109/20.539344
- [87] Ricci, M. (2021). Temperature-compensated strain gauges using metal-semiconductor nanocomposites. [praca magisterska, University of Rhode Island].
- [88] Riley, W., Sturges, L., Morris, D. (2006). *Mechanics of Materials*. Wiley.
- [89] Runkiewicz, L. (2018). Historia metod nieniszczących stosowanych w budownictwie polskim. *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, 3, 19-23. DOI: 10.26357/BNiD.2018.017
- [90] Sablik, M., Burkhardt, G., Kwun, H., Jiles, D. (1988). A model for the effect of stress on the low-frequency harmonic content of the magnetic induction in ferromagnetic materials. *Journal of Applied Physics*, 63, 3930-3932. DOI: 10.1063/1.340609
- [91] Salach, J. (2007). *Magnetosprężysty sensor momentu skręcającego z amorficznym rdzeniem pierścieniowym* [Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska]. Oficyna Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej.
- [92] Salach, J., Jackiewicz, D., Bieńkowski, A. (2014). Amorphous soft magnetic Fe₈₀B₁₁Si₉ Alloy in Tensile Stress Sensors application. *Acta Physica Polonica A*, 126(1), 102-103. DOI: 10.12693/APhysPolA.126.102

- [93] Salach, J., Szewczyk, R. (2013). Układ tomografu wiroprowodowego wysokiej rozdzielczości oraz możliwości filtracji sygnału pomiarowego. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 3, 112-115.
- [94] Sikora, R., Chady, T. (2016). Badania nieniszczące metodami elektromagnetycznymi. *Przegląd elektrotechniczny*, 9, 1-7. DOI: 10.15199/48.2016.09.01
- [95] Skłodowski, M. (2009). Współczesny monitoring obiektów budowlanych. *Przegląd Budowlany*, 80(3), 37-46.
- [96] Soleimani, M., Tamburrino, A. (2006). Shape reconstruction in magnetic induction tomography using multifrequency data. *International Journal for Information & Systems Sciences*, 2(3), 343-353.
- [97] Storn, R., Price, K. (1997). Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359. DOI: 10.1023/A:1008202821328
- [98] Studnik, K., Król, M. (2017). Wykrywanie nieciągłości materiałów metalowych za pomocą badań nieniszczących. *Prace instytutu materiałów inżynierskich i biomedycznych*, 2, 255-270.
- [99] Szewczyk, R. (2007). Extension of the model of the magnetic characteristics of anisotropic metallic glasses. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(14), 4109-4113. DOI: 10.1088/0022-3727/40/14/002
- [100] Szewczyk, R. (2008). Modelling of the magnetic characteristics of isotropic and anisotropic materials for sensor applications. *Acta Physica Polonica A*, 113(1), 67-70. DOI: 10.12693/aphyspola.113.67
- [101] Szewczyk, R. (2009). *Modele charakterystyk materiałów magnetycznie miękkich stosowanych w budowie czujników*. Oficyna Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej.
- [102] Szewczyk, R. (2014). Validation of the anhysteretic magnetization model for soft magnetic materials with perpendicular anisotropy. *Materials*, 7(7), 5109-5116. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma7075109>
- [103] Szewczyk, R. (2020). Generalization of the model of magnetoelastic effect: 3D mechanical stress dependence of magnetic permeability tensor in soft magnetic materials. *Materials*, 13(18), 4070. DOI: 10.3390/ma13184070
- [104] Szewczyk, R. (2015). Application of Jiles-Atherton model for modelling magnetization characteristics of textured electrical steel magnetized in easy or hard axis. In: Szewczyk, R., Zieliński, C., Kaliczyńska, M. (eds.) *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques. ICA 2015. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 350, 293-302. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-15796-2_30
- [105] Szewczyk R., Bieńkowski A. (2002). Nowe możliwości wykorzystania amorficznych rdzeni pierścieniowych jako sensorów naprężeń i sił ściskających. *Joint IMEKO TC-1 & XXXIV MKM Conference*, 128-134.
- [106] Szewczyk, R., Jackiewicz, D. (2015). The application of the extended Jiles-Atherton model for simulating the magnetic characteristics of X30CR13 steel. *Solid State Phenomena*, 220-221, 725-730. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.220-221.725
- [107] Takacs, J. (2001). A phenomenological mathematical model of hysteresis. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 20(4), 1002-1015. DOI: 10.1108/EUM0000000005771

- [108] Takacs, J. (2006). Mathematical proof of the definition of an hysteretic state. *Physica B Condensed Matter*, 372, 57-60. DOI: 10.1016/j.physb.2005.10.019
- [109] *Tensometr*. Conrad Electronic (2022.01.10) <https://www.conrad.pl/pl/p/tensometr-ecf-350-1-5aa-23-o-sp-1207591.html>
- [110] Teodorescu P., Stanescu N., Pandrea N., (2013). *Optimizations*, Wiley-IEEE Press.
- [111] The instrument guru. (2022.08.24). *Semiconductor strain gauge*. <https://theinstrumentguru.com/semiconductor-strain-gauge>
- [112] Tumański, S., Stabrowski M. (1998). The magnetovision method as a tool to investigate the quality of electrical steel. *Measurement Science and Technology*, 9(3), 488–495. DOI: 10.1088/0957-0233/9/3/025
- [113] Tumański, S. (2011). *Handbook of magnetic measurements*. Taylor & Francis Group.
- [114] Uhl, T. (2010). *Współczesne metody monitorowania i diagnozowania konstrukcji*. Wydawnictwo Fundacja im. Wojciecha Świątosławskiego na Rzecz Wspierania Nauki i Rozwoju Potencjału Naukowego w Polsce, 193-254.
- [115] Vidal, F., Pineiro, E., Mato, J., Besteiro, R., Varela, R., Rodriguez, M., Meizoso, F. (2010). Defect characterization in tailor welded blanks using an eddy current and harmonic flux leakage integration. *10th European Conference on Non-Destructive Testing*.
- [116] VIRGAMET (2022). 15HM, 13CRMO4-5, 1.7335 – stal kotłowa. <https://virgamet.pl/stal-15hm-13crmo45-1-7335-13crmo44-13crmosi55-15cd4-05-kotlowa>
- [117] VIRGAMET (2022). 3H13, X30CR13, 1.4028 - stal nierdzewna. <https://virgamet.pl/3h13-3h14-x30cr13-4028-sus-420j2-z33c13-420s45-stal-nierdzewna>
- [118] Whelan, M.P., Albrecht, D., Capsoni, A. (2002). Remote structural monitoring of the cathedral of Como using an optical fibre Bragg sensor system. *Proceedings of SPIE*, 4694, 242-252.
- [119] Wierzbicki, S. (2016). Monitoring konstrukcji stalowych. Część 1. *Builder*, 20(7), 92-94.
- [120] Witoś, M., Roskosz, M., Fryczowski, K. (2016). Bezdotykowy pomiar naprężeń metodą elektromagnetyczną. *Autobusy*, 12, 1479-1486.