

mgr inż. Andrzej KAWKA

Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego Sp. z o. o. – Łędziny

DOŚWIADCZENIA Z BADANIA STANU ZMIENNOŚCI NAPRĘŻEŃ W CIĘGLACH NOŚNYCH NACZYŃ WYCIĄGOWYCH METODĄ MAGNETYCZNEJ PAMIĘCI METALU

Streszczenie

Omówione zostały ogólne podstawy metody magnetycznej pamięci metalu (MMM – Metal Magnetic Memory), przedstawiono sprzęt pomiarowy oraz oprogramowanie komputerowe służące do analizy wyników badań. Przytoczono przykłady wyników badań z ich interpretacją.

Celem niniejszego opracowania jest wykazanie, że badanie rzeczywistego stanu naprężeń w ciągłach nośnych naczyń wyciągowych metodą magnetycznej pamięci metalu (MMM) stanowi alternatywę dla innych metod w zakresie diagnostyki i prognozowania niezawodności konstrukcji naczyń wyciągowych podczas eksploatacji.

Andrzej KAWKA, MSc. Eng.

The Research and Supervisory Centre of Underground Mining Co. Ltd - Łędziny

EXPERIENCE FROM EXAMINATIONS OF THE STRESS VARIATIONS IN PULLING LINKS OF HOISTING CONVEYANCES BY MEANS OF THE METAL MAGNETIC MEMORY METHOD

Abstract

The paper discloses general background for the method of Metal Magnetic Memory (MMM), describes the measuring equipment and computer software that is used for analysis of the examination results. Some examples of the research output are disclosed with further interpretation thereof.

This study is intended to give the proof that examination of actual stress level by means of the Metal Magnetic Memory method can be considered as an alternative to conventional techniques used for diagnostics and prediction of dependability attributable to structures of hoisting conveyances during operation of that equipment.

1. WSTĘP

Zgodnie z wymaganiami polskich przepisów górniczych, nie rzadziej niż co trzy lata rzeczoznawca bada stan zmienności naprężeń w cięgłach nośnych naczynia wyciągowego powodowany nierównościami torów prowadzenia.

CBiDGP, jako upoważniony rzeczoznawca ds. ruchu zakładu górniczego m.in. w zakresie badania naczyń wyciągowych, przystąpiło do poszukiwań metody badania stanu naprężeń w cięgłach nośnych naczyń wyciągowych, która:

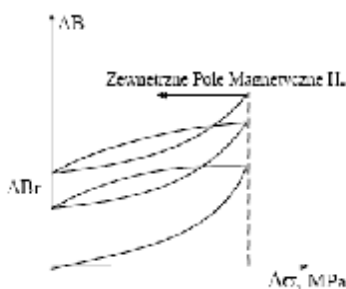
- zapewni określenie rzeczywistego stanu naprężeń w cięgłach nośnych poprzez pomiary wykonywane bezpośrednio na cięgłach nośnych;
- umożliwi szybkie wykonanie pomiarów w warunkach ruchu zakładu górniczego;
- pozwoli na ilościową ocenę rzeczywistego wyężenia zmęczeniowego cięgła nośnych w odniesieniu do granicznych parametrów wytrzymałościowych materiału z którego wykonano cięgła nośne;
- umożliwi szacunkowe wyznaczenie bezawaryjnego okresu eksploatacji badanych naczyń wyciągowych.

Opierając się na analizie możliwych do zastosowania metod badawczych oraz po przeprowadzeniu prób badawczych m.in. z wykorzystaniem tensometrii, zdecydowano się na zastosowanie metody magnetycznej pamięci metalu MMM¹ stanowiącej nową metodę diagnostycznych badań nieniszczących, opracowaną i stosowaną przez firmę „Energodiagnostyka”- Moskwa, Rosja.

2. OGÓLNE PODSTAWY FIZYCZNE, PARAMETRY MAGNETYCZNE I SPRZĘT POMIAROWY WYKORZYSTYWANE PODCZAS BADAŃ METODĄ MMM.

2.1. Podstawy fizyczne.

Zjawisko „samonomagnesowania” materiałów ferromagnetycznych pod wpływem zmiennych obciążeń (roboczych) w stałym magnetycznym polu Ziemi jest powszechnie znane i nazwane efektem magnetosprężystym. Działanie efektu magnetosprężystego (rys.1) polega na tym, że jeżeli w jakimkolwiek miejscu konstrukcji działa obciążenie cykliczne i występuje zewnętrzne pole magnetyczne (np. pole Ziemi), to w tym miejscu dochodzi do wzrostu indukcji szczątkowej i pozostałości magnetycznej.



Rys. 1. Schemat działania efektu magnetosprężystego: ΔB_r – zmiana indukcji szczątkowej; $\Delta \sigma$ – zmiana obciążenia cyklicznego; H_0 – zewnętrzne pole magnetyczne.



Fot.1. Urywany pręt przyciągający opiłki metalu.

Magnetyczna pamięć metalu MMM (Metal Magnetic Memory) – jest to nieodwracalna zmiana stanu namagnesowania materiałów ferromagnetycznych pod działaniem zmiennych obciążeń w stałym magnetycznym polu Ziemi.

Dla elementów urządzeń i konstrukcji stalowych oraz połączeń spawanych, magnetyczna pamięć metalu przejawia się w postaci nieodwracalnej zmiany namagnesowania w obszarach koncentracji naprężeń i uszkodzeń powstałych w trakcie procesu wytwarzania i eksploatacji.

2.2. Stosowana terminologia i parametry magnetyczne.

Metoda magnetycznej pamięci metalu – jest metodą badań nieniszczących opartą na rejestracji i analizie rozkładu składowych pola magnetycznego powstającego na powierzchni badanych elementów.

Własne magnetyczne pole rozproszenia wyrobu WMPR – to pole magnetyczne powstające na powierzchni badanego elementu w obszarach stałych pasów poślizgu dyslokacji pod działaniem naprężeń roboczych lub szczątkowych w obszarach koncentracji naprężeń (SKN) oraz niejednorodności ich struktury (wad materiałowych).

Natężenie własnego pola rozproszenia wyrobu H_p [A/m] – jest to wartość liczbową składowej stycznej i normalnej natężenia magnetycznego pola rozproszenia, mierzona na powierzchni elementu i rejestrowana zgodnie z metodą magnetycznej pamięci metalu.

¹ MMM – (Metal Magnetic Memory – nazwa metody wg)

Gradient własnego pola rozproszenia wyrobu K_{in} [A/m^2] (magnetyczny współczynnik intensywności naprężeń) – stanowi podstawowe, ilościowe kryterium w tej metodzie kontroli. Jest to iloraz modułu różnicy magnetycznego pola rozproszenia, mierzonego w dwóch punktach kontroli i odległości między tymi punktami.

$$K_{in} = \frac{|\Delta H_p^y|}{\Delta l}$$

gdzie Δl – odległość między punktami kontroli.

Wartość gradientu K_{in} charakteryzuje gęstość skupienia dyslokacji w obszarze koncentracji naprężeń i jest proporcjonalna do gęstości dyslokacji oraz kwadratu naprężeń wewnętrznych (σ_i)² [1].

Wykres WMPR – magnetogram przedstawiający zmianę WMPR wzdłuż kontrolowanego odcinka.

Graniczny magnetyczny wskaźnik podatności na uszkodzenia (m_{gr}) – jest to stosunek maksymalnej wartości gradientu WMPR, odpowiadającego granicy wytrzymałości, do średniej wartości gradientu WMPR, odpowiadającego granicy plastyczności. Wskaźnik ten wyznacza się laboratoryjnie dla określonego gatunku stali. Podczas badań próbki określa się na jej powierzchni gradient składowej normalnej pola K_T , odpowiadający granicy płynięcia oraz K_B , odpowiadający granicy wytrzymałości.

$$m_{gr} = \frac{K_B}{K_T}$$

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych [1,3] wynika następująca zależność pomiędzy magnetycznymi parametrami m_{gr} , K_B , K_T a mechanicznymi właściwościami ferromagnetyka R_m i R_e .

$$m_{gr} = \frac{K_B}{K_T} = \left(\frac{R_m}{R_e} \right)^2$$

Wskaźnik m_{gr} charakteryzuje stadium umocnienia metalu przed powstaniem uszkodzenia i jest magnetyczną miarą granicznego wyężenia zmęczeniowego materiału.

Rzeczywisty magnetyczny wskaźnik podatności na uszkodzenia (m) – jest to stosunek maksymalnej wartości gradientu WMPR do wartości średniej, określający stopień wyężenia zmęczeniowego badanego elementu w wyznaczonej strefie koncentracji naprężeń KN.

$$\frac{K_{in}^{max}}{K_{in}^{sr}} = m$$

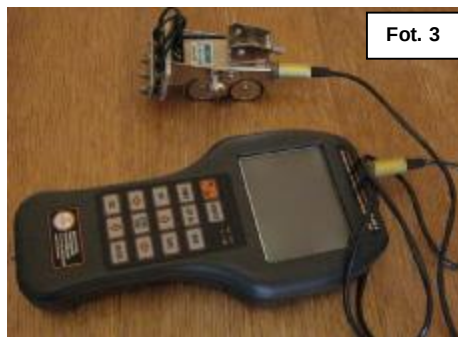
Wyznaczony rzeczywisty wskaźnik m , jest magnetyczną miarą rzeczywistego, aktualnego w dniu badania, wyężenia zmęczeniowego badanego elementu.

2.3. Stosowane aparatura pomiarowa i oprogramowanie.

Do wykonywania badań CBIDGP stosuje 8-mio i 12-to kanałowe mierniki koncentracji naprężeń z różnego typu głowicami skanującymi produkowane przez firmę „Energodiagnostyka” - Moskwa. Mierniki wyposażone są w wewnętrzną pamięć pozwalającą na zapisywanie wyników badania oraz złącza PC umożliwiające przesłanie zapisanych plików do komputera.



Fot. 2. Miernik koncentracji naprężeń typ IKN-2M-8



Fot. 3. Miernik koncentracji naprężeń typ IKN-2M-8

Do przesyłania zapisanych w pamięci miernika plików oraz ich obróbki i analizy wykorzystywane są dwa programy komputerowe opracowane przez firmę „Energodiagnostyka”:

- „Program Transfer” – transfer plików z miernika do komputera;
- „MMP-System” - obróbka i analiza magnetogramów.

3. MOŻLIWOŚCI DIAGNOSTYCZNE METODY MMM

Na podstawie 3-letnich doświadczeń wynikających z przeprowadzonych badań naczyni wyciągowych można stwierdzić, że zastosowanie metody MMM do oceny stanu naprężeń w ciągach nośnych naczyni wyciągowych umożliwia dla każdego ciągu nośnego:

- dokładne umiejscowienie obszarów koncentracji naprężeń stanowiących główne źródła rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych;
- określenie (z wykorzystaniem parametrów magnetycznych metody MMM) rzeczywistego stanu wyężenia zmęczeniowego ciągów nośnych w odniesieniu do własności mechanicznych materiału z którego są wykonane;
- wykrycie istniejących pęknięć;
- szacunkowe określenie przewidywanego czasu bezawaryjnej wg poniższych kryteriów:

L.p.	Uzyskane wyniki, ujawnione wady	Przewidywany czas pracy bezawaryjnej
1	Niedopuszczalnych wad nie stwierdzono (pęknięcia, odkształcenia trwałe itd.) $m \leq 0,5m_{gr}$	6 lat
2	Niedopuszczalnych wad nie stwierdzono (pęknięcia, odkształcenia trwałe itd.) $0,5m_{gr} \leq m \leq 0,75m_{gr}$	5 lat
3	Niedopuszczalnych wad nie stwierdzono (pęknięcia, odkształcenia trwałe itd.) $0,75m_{gr} < m \leq m_{gr}$	3 lata
4	Niedopuszczalnych wad nie stwierdzono (pęknięcia, odkształcenia trwałe itd.) $m > m_{gr}$	1 rok Zalecenie szczególnej kontroli w miejscach SKN
5	Występują niedopuszczalne wady (pęknięcia, odkształcenia trwałe itd.)	Wymiana lub naprawa**

W związku z faktem, że metoda MMM jest stosowana od niedawna (szacowany czas bezawaryjnej pracy ciągów nośnych przekracza czas stosowania tej metody), powyższe kryteria przyjęto i na bieżąco modyfikowano opierając się na kryteriach stosowanych przez firmę „Energodiagnostyka” do oceny stanu technicznego konstrukcji nośnych wind osobowych.

Należy również nadmienić, że szacowany czas bezawaryjnej pracy nie uwzględnia:

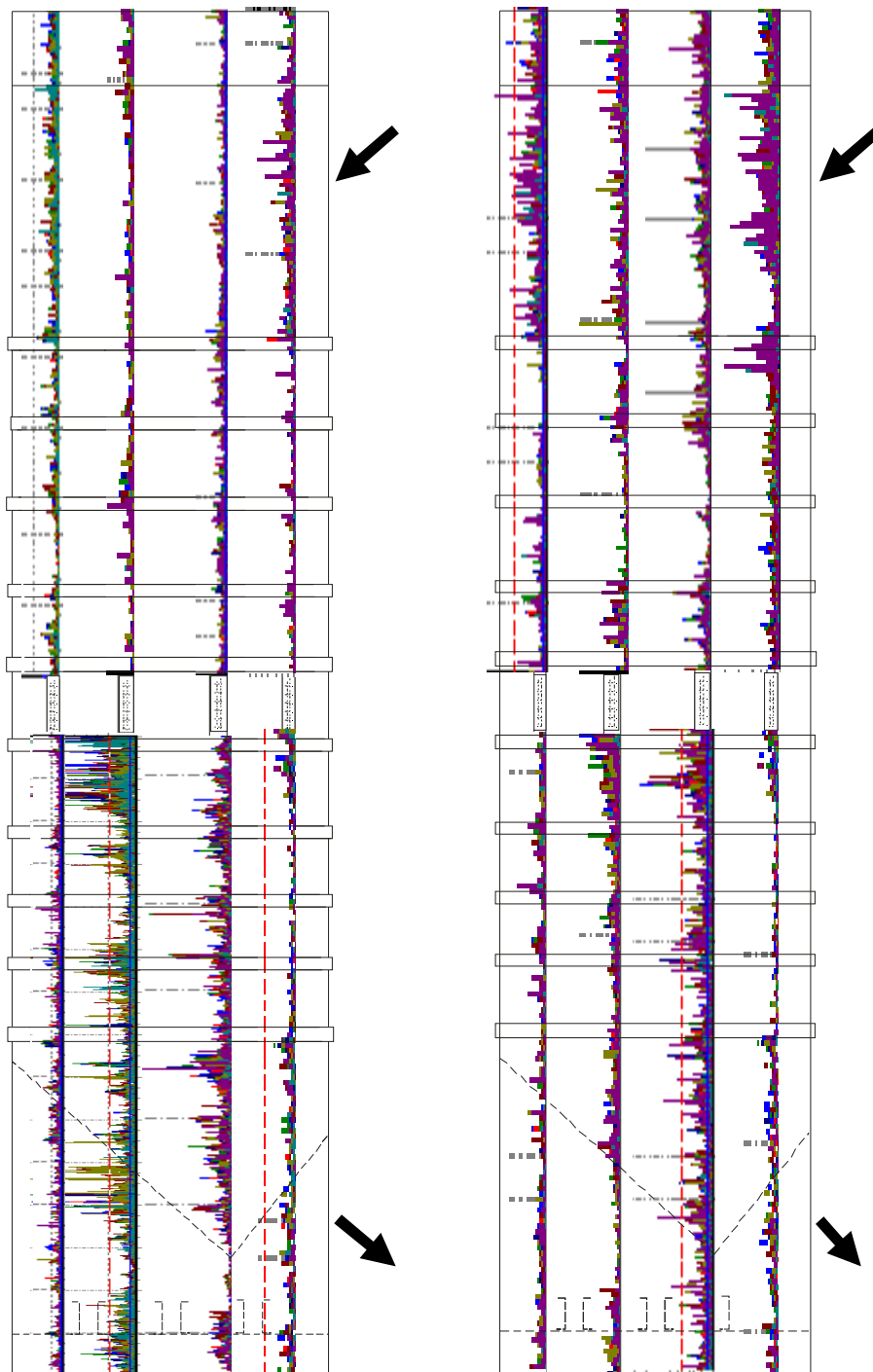
- postępu korozji badanych ciągów;
- obciążeń awaryjnych, itp.;

w związku z powyższym należy go traktować orientacyjnie.

Aktualnie, *CBiDGP* prowadzi badania laboratoryjne dotyczące porównania parametrów magnetycznych stosowanych w metodzie MMM z innymi metodami badań służącymi do określenia stanu naprężeń w elementach konstrukcyjnych maszyn i urządzeń.

4. PRZYKŁADY WYNIKÓW BADANIA CIĘGIEŁ NOŚNYCH METODĄ MMM

4.1. Wyniki badania ciągów nośnych skipu 270 kN.



Strona południowa

Strona północna

Rys.2. Rozkład gradientu pola magnetycznego w ciągach nośnych.

Jak widać z rozkładu gradientu pola magnetycznego, ciąga nośne badanego skipu nie są obciążone równomiernie. Stwierdzono wyraźną koncentrację naprężeń w dolnych odcinkach ciągów środkowych oraz górnych odcinkach ciągów po stronie północnej. Wyznaczony dla ciągów środkowych maksymalny wskaźnik „m”, będący miarą aktualnego wyężenia zmęczeniowego materiału ciągu wynosi

$$m = 1,91 < m_{gr} = 2,7$$

i jest aktualnie niższy od wskaźnika granicznego „m_{gr}” (dla stali w gat. 18G2A) charakteryzującego stadium umocnienia stali przed uszkodzeniem.

Pozwala to stwierdzić, że aktualny stan wyężenia zmęczeniowego badanych ciągów nie stwarza zagrożenia powstania pęknięć.

Zgodnie ze stosowaną metodyką i kryteriami oceny, dla wyznaczonej wartości rzeczywistego współczynnika „m” mieszczącej się w przedziale:

$$0,5m_{gr} < m \leq 0,75 m_{gr}$$

szacunkowy czas bezawaryjnej pracy ciągłych nośnych określono się na 5 lat.

4.2. Wyniki badania ciągłych nośnych klatki 4-piętrowej.

Jako przykład nietypowego rozkładu stref koncentracji naprężeń w ciągłych nośnych, na rysunku Nr 3 przedstawiono rozkład gradientu pola magnetycznego wzdłuż ciągłych nośnych klatki 4-piętrowej. Analizując rozkład stref koncentracji naprężeń w ciągłych skrajnych stwierdzono wyraźną koncentrację naprężeń w miejscach mocowania zawiasów drzwi pięter (zaznaczone na rysunku). Powodem takiego rozkładu koncentracji naprężeń jest fakt, że klatka pełni rolę przeciwcieżaru i jazda w szybie prowadzona jest zawsze z zabudowanymi i zamkniętymi drzwiami pięter, usztywniającymi konstrukcję klatki pomiędzy piętrami.

4.3. Wyniki badania ciągłych nośnych skipoklatki 17/15 Mg.

Ze względu na nietypową konstrukcję badanego naczynia wyciągowego oraz bardzo czytelne wyniki badania, na rysunkach nr 4÷6 przedstawiono wyniki badania skipoklatki 17/15 Mg (17 Mg skip/15 Mg klatka) eksploatowanej w kopalni wapienia „Mina Navio” w Chile. Badania prowadzone były w lutym 2008 roku.

Na podstawie analizy magnetogramów wyznaczono maksymalny wskaźnik „m”, będący miarą aktualnego wyężenia zmęczeniowego materiału ciągłych:

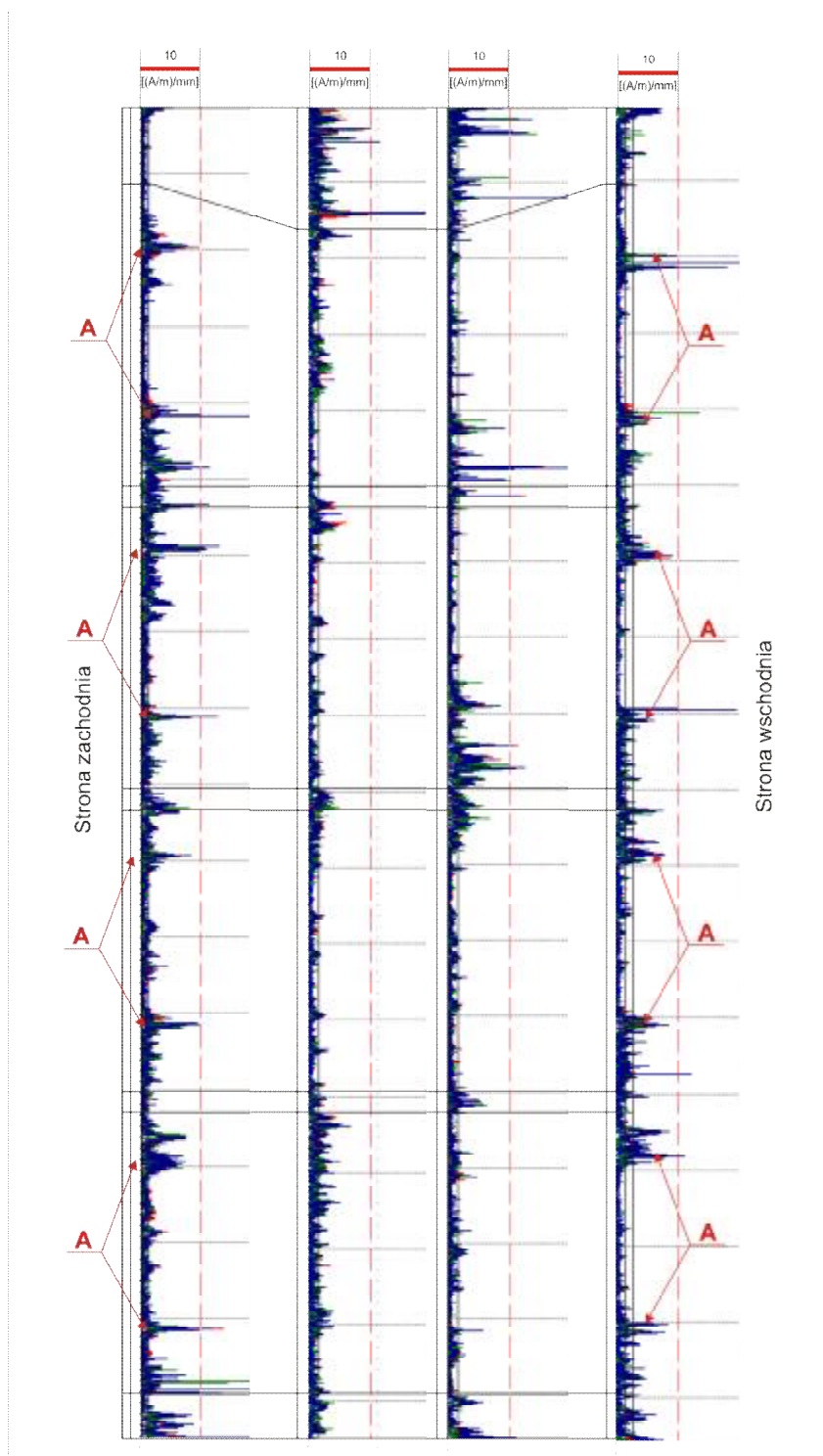
$$m = 1,69 < m_{gr} = 2,4 - \text{skip}$$

$$m = 1,47 < m_{gr} = 2,4 - \text{klatka}$$

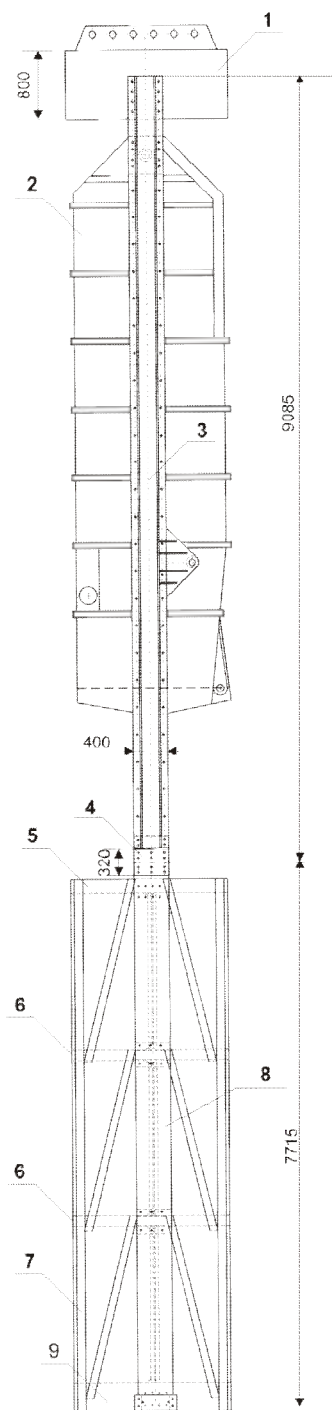
Zgodnie z przyjętymi kryteriami oceny oszacowano czas bezawaryjnej pracy na 5 lat.

4.4. Przykłady zastosowania metody MMM do badania blach trzonowych skipu.

Na rysunku nr 7 przedstawiono wyniki badania blach trzonowych (g=35 mm w gat. 35) skipu 20 Mg. Uzyskane magnetogramy jednoznacznie wskazują na nierównomierne obciążenie blach trzonowych. Większe wyężenie zmęczeniowe wykazują części blach po stronie przeciwnej do zasypu. Badania zostały wykorzystane przy ponownej zabudowie w/w blach po regeneracji tzn. zostały zabudowane odwrotnie w odniesieniu do poprzedniej zabudowy.



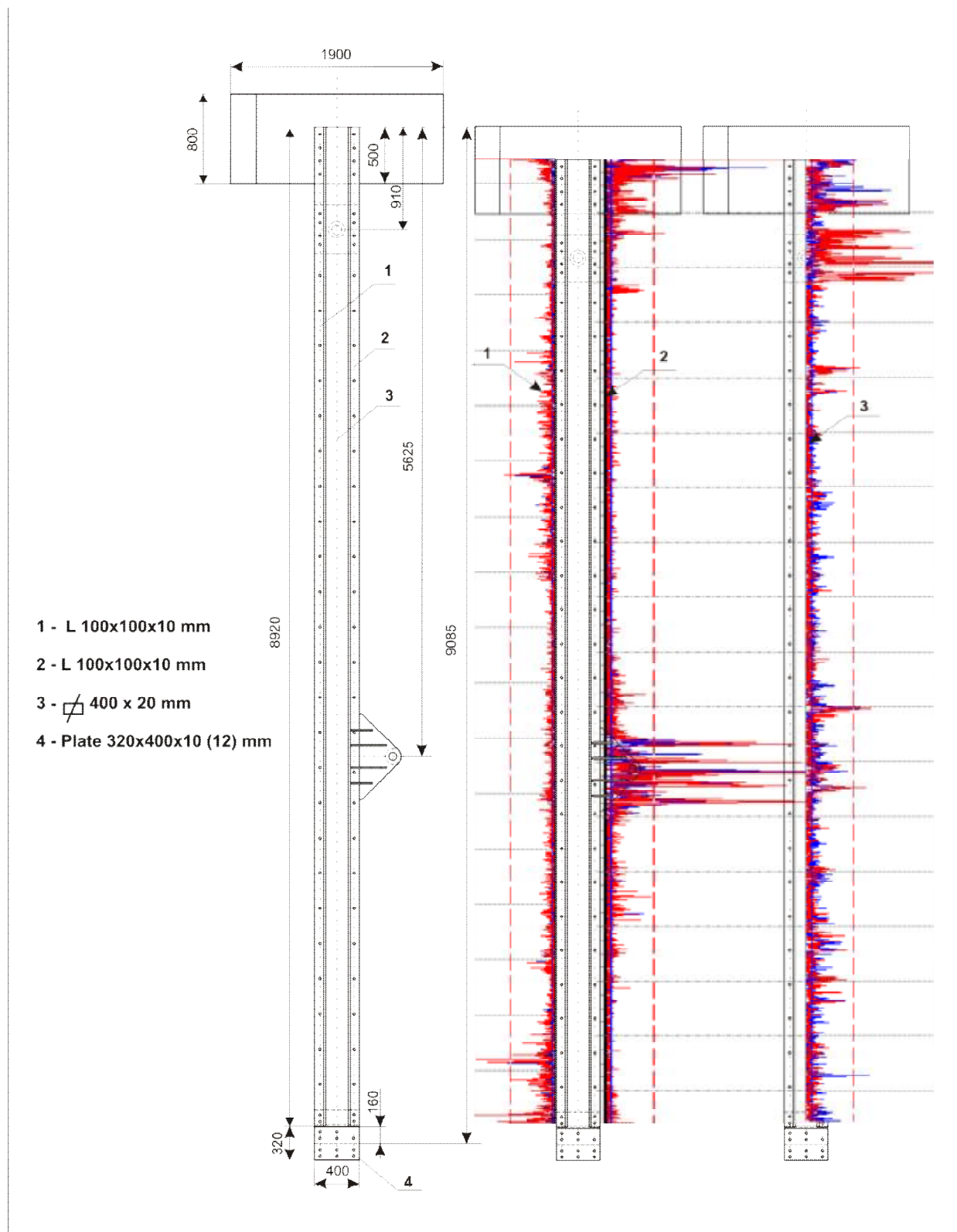
Rys. 3. Rozkład gradientu pola magnetycznego w cięgłach nośnych klatki 4-piętrowej.



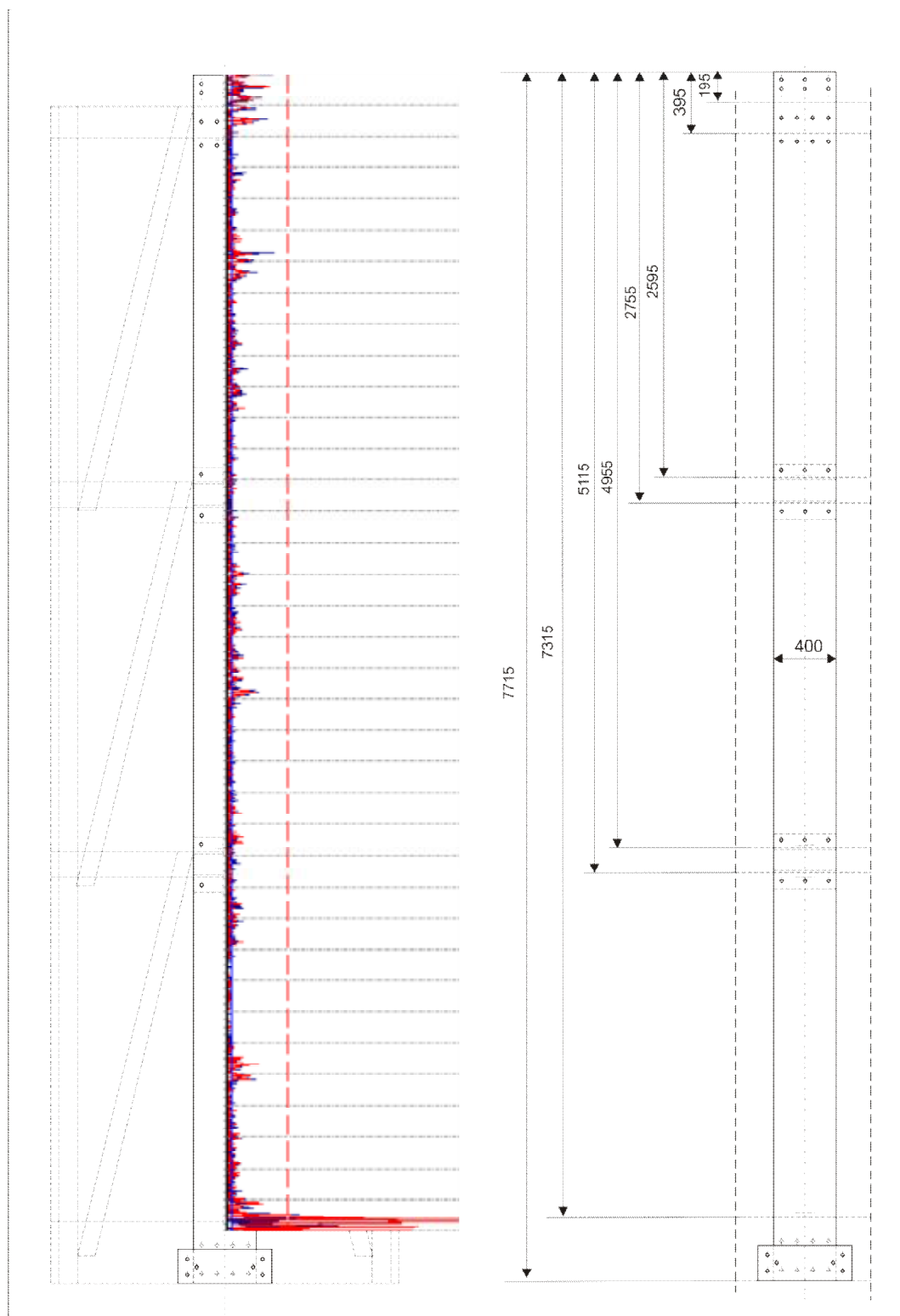
- 1 - HEAD
- 2 - CONTAINER
- 3,8 - LOAD BEARINGS OF SKIP/CAGE
- 4 - CONNECTION LOAD BEARINGS
- 5 - HEAD OF CAGE
- 6 - FLOORS OF CAGE
- 7 - LOAD BEARINGS OF CAGE
- 9 - BOTTOM OF SKIP/CAGE

Client:	Mina Navio	Date
Shaft:	Production Shaft Main Hoist	February 2008
APPENDIX 1	Number:	Drawing Nr 1
CBiDGP		SKIP/CAGE

Rys.4. Konstrukcja skipoklatki 17/15 Mg.

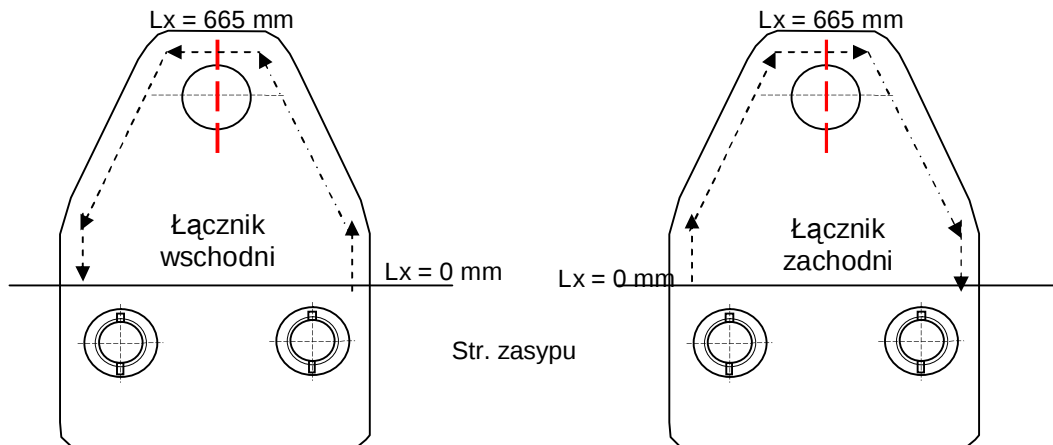


Rys.5. Rozkład gradientu pola wzdłuż ciągu skipu.

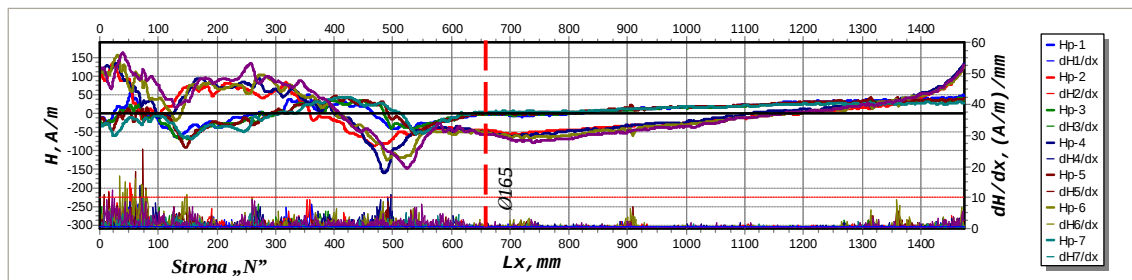


Rys.6. Rozkład gradientu pola wzdłuż cięgła klatki.

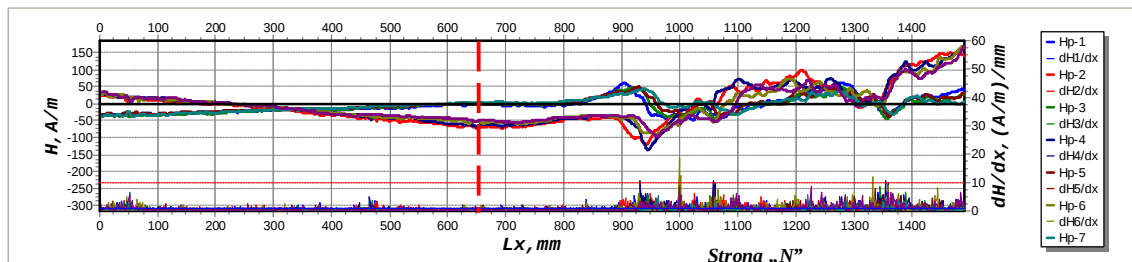
Kierunek ruchu głowicy pomiarowej



Łącznik płaski wschodni – górna część badana po obwodzie
Otwór na sworzeń nośny $\varnothing 165$ mm na długości $L_x = 665$ mm



Łącznik płaski zachodni – górna część badana po obwodzie
Otwór na sworzeń nośny $\varnothing 165$ mm na długości $L_x = 665$ mm

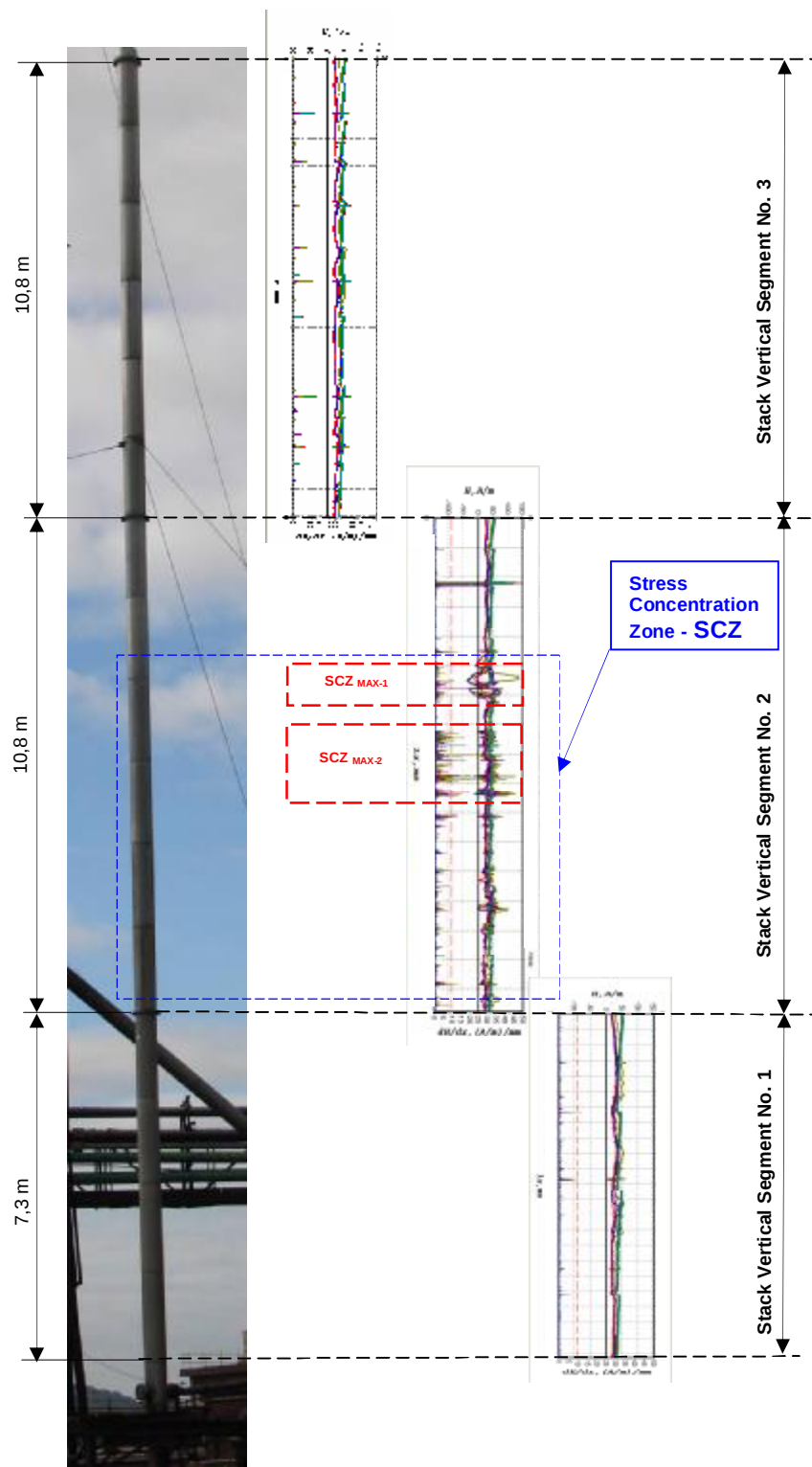


Rys. 7. Rozkład gradientu pola po obwodzie blach trzonowych.

4.5. Przykłady zastosowania metody MMM do badania innych konstrukcji.

4.5.1. Badania komina stalowego.

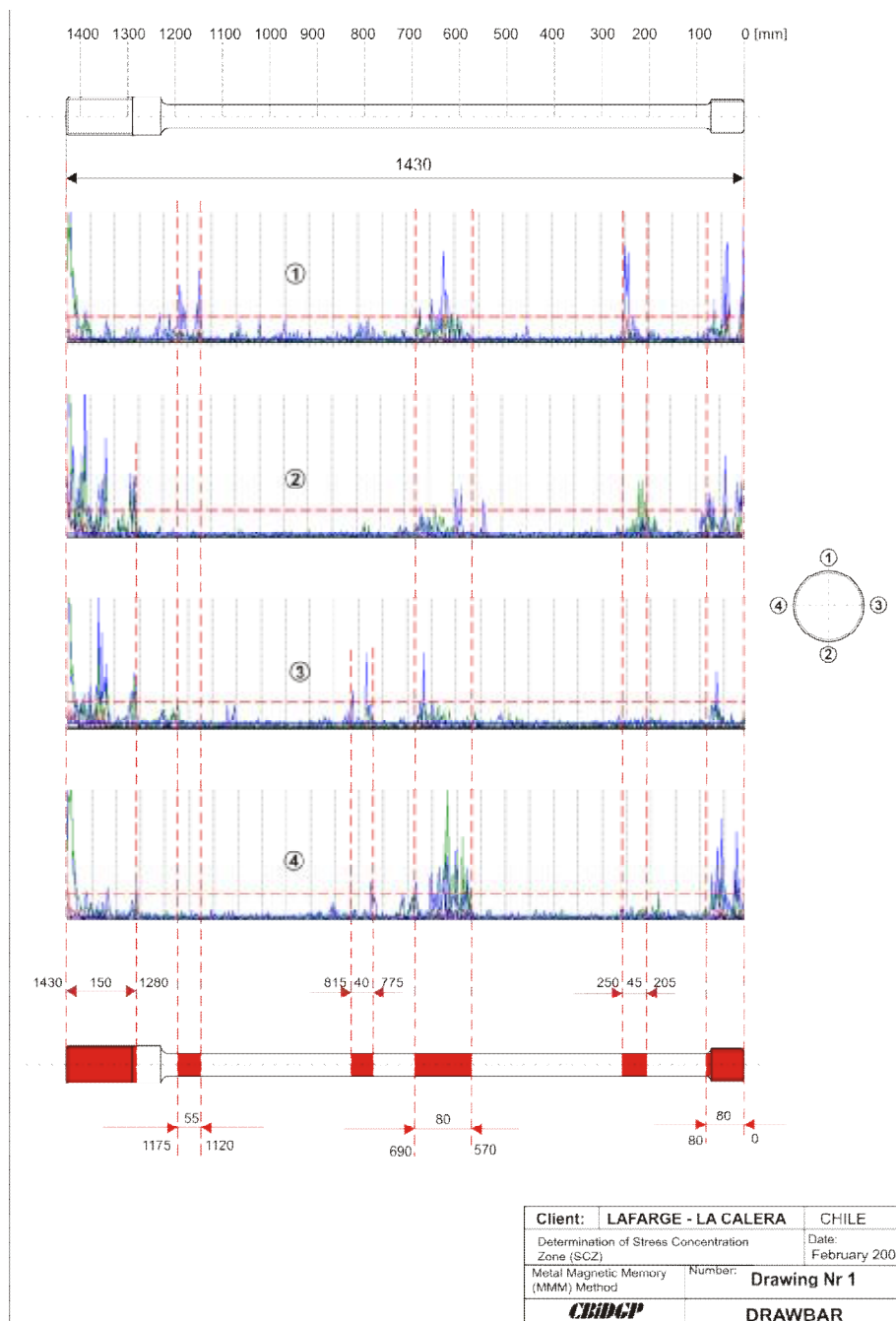
Na rysunku nr 8 przedstawiono wyniki badania komina stalowego w rafinerii „Invista” – Anglia. Badania prowadzono w październiku 2007r. Badania miały na celu wyznaczenie stref koncentracji naprężeń w konstrukcji komina. Stwierdzono maksymalną koncentrację naprężeń w II-gim (środkowym) segmencie komina co obrazują przedstawione magnetogramy.



Rys.8. Rozkład gradient pola w konstrukcji komina stalowego.

4.5.2. Badania cięga śrubowego.

Na rysunku nr 9 przedstawiono wyniki badania cięga śrubowego eksploatowanego w stołach potrząsanych cementowni „LAFARGE” – La Calera, Chile. W/w cięga często ulegają pęknięciom zmęczeniowym. Badania prowadzono w lutym 2008r. Na podstawie przeprowadzonych badań określono strefy koncentracji naprężeń, wyznaczono magnetyczny wskaźnik podatności na uszkodzenia „m” i określono przewidywany czas bezawaryjnej pracy.



Rys.9. Wyznaczenie stref koncentracji naprężeń w ciągnie śrubowym.

5. WNIOSKI

Zastosowanie metody magnetycznej pamięci metalu *MMM* do badania stanu naprężeń w ciągach nośnych naczyń wyciągowych pozwala uzyskać szereg znaczących informacji, których nie dawały dotychczas stosowane metody badań diagnostycznych a mianowicie umożliwia:

- określenie i umiejscowienie stref koncentracji naprężeń w ciągach nośnych powstałych na skutek:
 - obciążeń powodowanych nierównościami torów prowadzenia podczas jazdy naczynia wyciągowego w szybie;
 - obciążeń występujących podczas za- i rozładunku naczynia, podszadzenia naczyń wyciągowych przy wymianie lin i zawieszach, opuszczania ciężkich i wielkogabarytowych materiałów pod naczyniem wyciągowym, hamowania awaryjnego naczyń w szybie, w wieży i rzapiu;
 - nierównomierności rozkładu obciążeń w ciągach nośnych spowodowanych niedokładnością wykonania naczynia wyciągowego, odkształceniami elementów powstałych podczas transportu, zabudowy lub w czasie eksploatacji.
- wczesną diagnostykę uszkodzeń zmęczeniowych (pęknięć) ciągów nośnych;
- wyznaczenie dla badanego ciągu, rzeczywistego wyężenia zmęczeniowego materiału z zastosowaniem parametrów magnetycznych stosowanych w tej metodzie;

- d) szacunkowe określenie przewidywanego czasu bezawaryjnej pracy ciągłej nośnych.

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- a) Głównymi zaletami metody *MMM* w warunkach ruchu wyciągów szybowych są:
- brak konieczności aktywnego namagnesowania, montażu czujników, zabudowy okablowania i podłączenia do aparatury rejestrującej itd.;
 - szybki pomiar bez konieczności prowadzenia przejazdu naczyń na całej długości szybu;
 - pomiary można wykonywać z miejsc przystosowanych do prowadzenia rewizji naczyń wyciągowych;
 - informacje dotyczące lokalizacji miejsc koncentracji naprężeń w ciągłach, aktualnego stanu wyęteżenia zmęczeniowego oraz szacunkowego czasu bezawaryjnej pracy wydają się być przydatne dla użytkownika i praktycznie wykorzystane do ustalania zakresu kontroli naczyń wyciągowych.
- b) Zakres stosowania i ograniczenia metody *MMM*:
- badania wyrobów z ferro- i paramagnetycznych stali i stopów, żeliw, bez ograniczenia kontrolowanych wymiarów i grubości.
 - temperaturowy zakres stosowania metody *MMM* – od -20°C do $+60^{\circ}\text{C}$.
 - pomiary mogą być wykonywane przy obciążonych lub nie, naczyniach wyciągowych.
 - nie wymaga się specjalnego (szlifowania) przygotowania powierzchni ciągłej nośnych. Zaleca się zgrubne oczyszczenie z przepadu, zanieczyszczeń i korozji płytowej.
 - metoda *MMM* nie może być stosowana w miejscach w pobliżu (mniej niż 1m) źródła pola magnetycznego (magnesy stałe) oraz pola związanego ze spawaniem elektrycznym.
 - prędkość skanowania nie powinna przekroczyć 0,5 m/s.

6. PODSUMOWANIE.

Podsumowując można stwierdzić, że metoda magnetycznej pamięci metalu *MMM* stosowana do badania naczyń wyciągowych:

- stanowi alternatywę dla innych metod w zakresie diagnostyki i prognozowania niezawodności konstrukcji naczyń wyciągowych podczas eksploatacji;
- jest przydatna do badania stanu technicznego pozostałych elementów nośnych naczyń wyciągowych oraz połączeń spawanych;
- może być wykorzystywana do badań nieniszczących innych elementów i urządzeń stanowiących wyposażenie wyciągów szybowych np. koła linowe, zawieszenia naczyń wyciągowych oraz zawieszenia lin wyrównawczych, prowadniczych i odbojowych, zbrojenie szybowe, wieże szybowe, rurociągi itp.

Należy podkreślić, że metoda pamięci magnetycznej *MMM* jest ciągle rozwijana w kierunku otrzymania ilościowych charakterystyk stanu naprężeń i deformacji materiałów konstrukcyjnych oraz wskaźników określających stopień zagrożenia powstania uszkodzeń zmęczeniowych.

LITERATURA

- [1] A.A.Dubow, A.Radziszewski: Prognozowanie resursu oprzyrządowania z wykorzystaniem metody magnetycznej pamięci metalu – materiały 31-szej krajowej konferencji badań nieniszczących – Szczyrk 2002 – R-10
- [2] M.Roskosz: Zastosowanie metody magnetycznej pamięci metalu do badań kół zębatach – Politechnika Śląska w Gliwicach – Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
- [3] A.A.Dubow: Sposób określenia stanu granicznego metalu w obszarach koncentracji naprężeń na podstawie gradientu magnetycznego pola rozproszenia – materiały z II-giej międzynarodowej konferencji „Diagnostyka oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu – Moskwa 2001. Tłumaczenie – „Resurs” W-wa
- [4] A.A.Dubow: Diagnostyka wytrzymałości oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu – Dozór techniczny 1/2002 s/14-18, 2/2002 s.37-40
- [5] J.Deputat: Podstawy metody magnetycznej pamięci metalu – Dozór Techniczny 2/2002 s.97-105
- [6] A.A.Dubow, E.A. Demin: Wyniki badań charakterystyk magnetomechanicznych metalu próbek z wykorzystaniem metody magnetycznej pamięci metalu. – materiały z I-szej międzynarodowej konferencji „Diagnostyka oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu” Moskwa, 24-26 lutego 1999. Tłumaczenie „Resurs” W-wa
- [7] A.P. Niczupuruk, N.I.Noskova, E.S.Gorkunow, E.G.Ponomariewa: Wpływ dyslokacji struktury formowanej poprzez deformację plastyczną na magnetyczne i magnetosprężyste właściwości żeliwa i stali niskowęglowych – *Физика металлов и металловедение* № 12, 1992. s. 81-87
- [8] A.A.Dubow – Zapytania o fizyczne podstawy metody magnetycznej pamięci metalu – materiały z II-giej międzynarodowej konferencji „Diagnostyka oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu – Moskwa 2001. Tłumaczenie „Resurs” W-wa