

MAGNETNA MEMORIJA METALA (MMM) METODA ZA BEZRAZORNO ISPITIVANJE I RANU DIJAGNOSTIKU DEGRADIRAJUĆIH PROCESA, TE USPOREDBA S KLASIČNOM METODOM ISPITIVANJA PRIMJENOM ULTRAZVUKA

Fran, JARNJAK, *HRID – Non destructive testing d.o.o.*, Zagreb, HRVATSKA,
fran.jarnjak@hrid-ndt.hr

SAŽETAK – Opisana je metoda i oprema za inspekciju zavara i osnovnog materijala koriseći Magnetnu Memoriju Metala (MMM), metode standardizirane po ISO24497, za pronalazak zona koncentracije stresa (naprezanja) kao mjesta začetka razvoja defekata i prije nego što se one mogu otkriti klasičnim metodama. Metoda MMM i njeni rezultati su također uspoređeni sa klasičnom metodom ispitivanja ultrazvukom (UT) na uzorcima, gdje je utvrđena vrlo dobra korelacija između tih dviju metoda.

Ključne riječi: magnetna memorija metala, rana dijagnostika, ISO 24497, zone koncentracije stresa, naprezanje

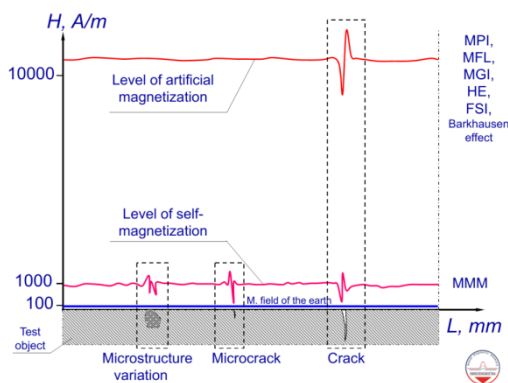
METAL MAGNETIC MEMORY (MMM) METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING AND EARLY DIAGNOSTICS OF DEGRADATION PROCESSES AND COMPARISON WITH ULTRASONIC INSPECTION, A REPRESENTATIVE OF A CLASSICAL NON-DESTRUCTIVE TESTING METHOD

ABSTRACT – This paper presents a Metal Magnetic Memory (MMM) method to inspect welds and base metal, which is standardized as per ISO 24497. MMM method is used to find stress concentration zones on the test object, them being locations where defects would be either already present or most likely to start occurring even before they can be confirmed with the conventional NDT methods. MMM method and its results are compared with the conventional ultrasonic (UT) testing method on weld samples, where a quite good correlation between their results is confirmed.

Key words: metal magnetic memory, early diagnosis, ISO 24497, stress concentration zones

1. UVOD

U ovom članku biti će opisana nova metoda Magnetne Memorije Metala (MMM) za provedbu bezrazornog ispitivanja u svrhu pronalaženja zona koncentracije stresa, odnosno povećanog naprezanja, kao lokalizirana mjesta nastanka defekata i rane dijagnostike započetih degradacijskih procesa. Metoda MMM je primjenjiva kako na osnovnom materijalu tako i na zavarenim spojevima. Rezultati metode MMM će također biti uspoređeni s rezultatima ultrazvučnog ispitivanja, kao predstavnika klasičnih KBR metoda.



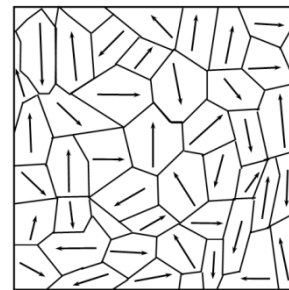
Slika 1 Usporedba MMM metode i ostalih magnetskih metoda. MMM metoda je jedina pasivna metoda i ne koristi umjetno magnetno polje za provedbu ispitivanja. MMM metoda može detektirati promjene na mikrostrukturi materijala kao i mikropukotine koje klasične metode ne mogu detektirati, čime je MMM metoda idealna i za ranu dijagnostiku (izvor slike: Energodiagnostika)

2.1. Magnetna Memorija Metala

Magnetna Memorija Metala (MMM) pripada u klasu metoda koje koriste magnetske principe za provedbu bezrazornog ispitivanja. Razlikom da je MMM pasivna metoda, odnosno metoda koja koristi već postojeće magnetno polje objekta koji se ispituje, jer su u njemu već formirane magnetske domene tijekom proizvodnje i tijekom same uporabe objekta. Metoda je razvijena od strane Prof. A.A. Dubova i prvi puta je kao termin MMM bila uvedena 1994. godine, te se kontinuirano razvija od strane tvrtke Energodiagnostika (Moskva, Rusija).

ujedno i njen standard. Glavni cilj metode je pronaći zone koncentriranog stresa, a koje su nastale zbog određenih procesa u proizvodnji i eksploataciji objekta i na kojima je znatno veća vjerojatnost pojave defekata.

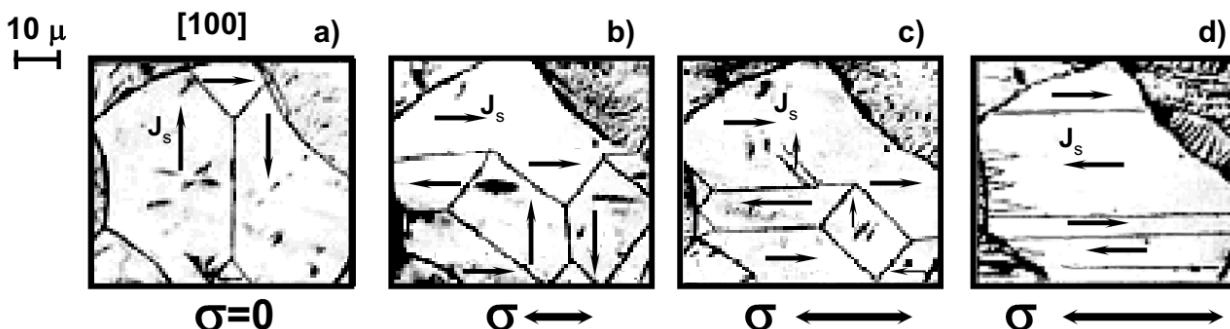
Metoda za svoj rad koristi principe inverzne magnetorestricije (engl. inverse magnetorestrictive effect - Villari effect) gdje dolazi do promjene u magnetizaciji materijala kod promjene u naprezanju, magnetoplastičnosti (povećano samo-magnetiziranje u zonama povećane plastične deformacije) i curenja magnetnog toka na nivou (jačini) prirodne magnetizacije (engl. magnetic flux leakage). Samim time, magnetske domene u objektu su izraženije na područjima povećanog naprezanja i deformacije (engl. stress, strain) i na njima dolazi do povećane magnetizacije pod utjecajem magnetnog polja zemlje, zbog gore navedenih principa.



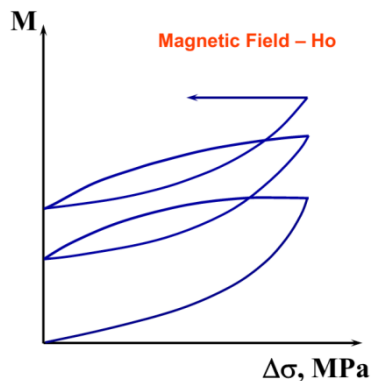
Slika 1.2 Primjer magnetne domene feromagnetičnog materijala. (izvor slike: Energodiagnostika)

Na slici 1.2 je prikazan raspored magnetnih domena feromagnetičnog materijala, npr. čelika. Svaka od tih domena se ponaša kao mali magnet i globalno gledajući, polja se međusobno poništavaju, te je metal nemagnetiziran. Raspodjela domena u nekom konkretnom materijalu se može vidjeti pomoću praha i mikroskopa s velikim povećanjem (mikrograf). Kod elastičnog naprezanja u materijalu, dolazi do preraspodjele magnetnih domena uključujući i njihovo spajanje, tako da se materijal magnetizira, što opisuje Villari efekt.

Slika 1.3 Eksperiment prikaza promjene na magnetnim domenama materijal pod utjecajem elastičnog naprezanja – Villari efekt (izvor slike: Energodiagnostika)

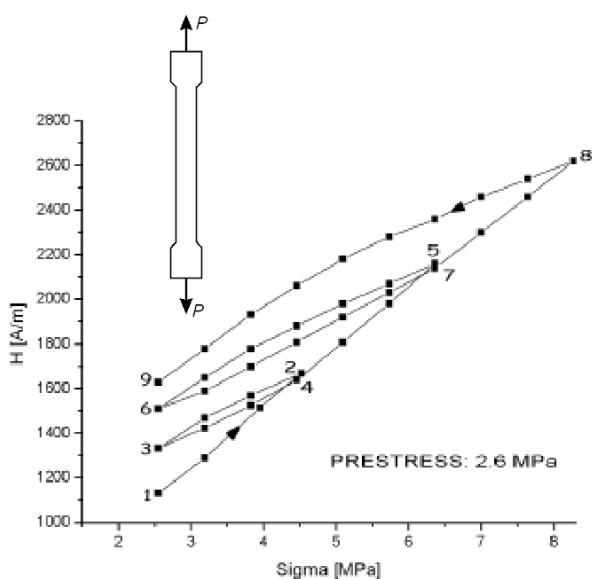


Slika 1.3 prikazuje rezultate eksperimenta vidljivog pod elektronskim mikroskopom materijala kod elastičnog napreznja u koracima od a) do d), gdje je vektor J_s rezultatni vektor spontane magnetizacije. Sama magnetizacija pod utjecajem elastičnog napreznja prati krivulju prikazanu na slici 1.4



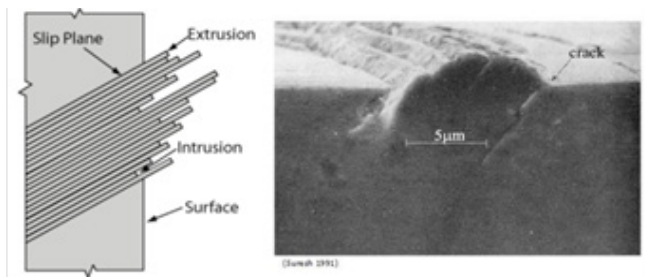
Slika 1.4 Eksperiment prikaza promjene na magnetnim domenama materijal pod utjecajem elastičnog napreznja – Villari efekt (izvor slike: Energodiagnostika)

Gledajući sliku 1.4, materijal je na ishodišnoj točki i nije magnetiziran. Povećanim napreznjem dolazi do magnetizacije materijala te opuštanjem napreznja, materijal se demagnetizira, ali ne dolazi do ishodišne točke nego zadržava određeni dio magnetizacije. Cikličkim ponavljanjem intenzitet magnetizacije sve više raste. U praksi, npr. to može biti zbog vibracija, varijacija tlakova u cjevovodima i posudama pod tlakom i drugo. Rezultat laboratorijskog eksperimenta Villari efekta je prikazan na slici 1.5.

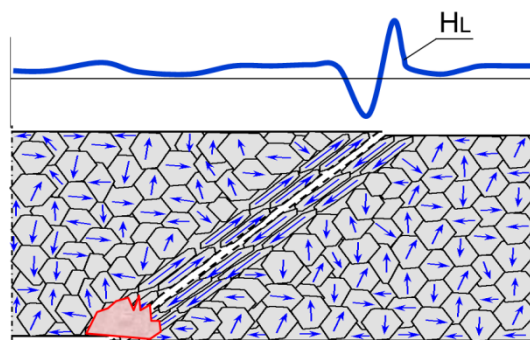


Slika 1.5 Eksperiment magnetoplastičnosti kontroliranim napreznjem i mjerenjem magnetnog polja H . (izvor slike: Energodiagnostika)

Drugi princip metode MMM je magnetoplastičnost, odnosno povećanje samo-magnetizacije u zonama plastične deformacije, dakle zonama oštećenja u materijalu ispitnog objekta. Te magnetne domene se zbog smičnog pomaka u strukturi materijala javljaju pod kutom od 45° , tako da se kod debljih materijala mora voditi računa kod analize da lokacija uzroka i lokacija detektirane zona koncentracije stresa mogu biti u pomaku od funkcije kuta od 45° i debljine materijala, te se za daljnju provjeru preporuča ispitati cijelu moguću zonu. Magnetoplastičnost je prikazana na slikama 1.6 i 1.7.



Slika 1.6 Smični pomak (engl. slip plane) i prikaz elektronskog mikroskopa, dok pukotine nastaju na njihovom sučelju. (izvor slike: Energodiagnostika)



Slika 1.7 Detektirana zona koncentracije stresa je pod 45° kao funkcija debljine ispitnog objekta, što se mora uvažiti kod daljnjih ispitivanja nakon metode MMM, posebice kod debljih ispitnih objekata. (izvor slike: Energodiagnostika)

Treći princip metode MMM je curenje magnetnog polja na nivou (jačini) prirodne magnetizacije na mjestu defekta koji se može detektirati sensorima i instrumentom zbog izuzetne osjetljivosti i preciznosti mjerenja.

Moramo napomenuti da je MMM metoda, uz metodu akustičke emisije, jedna od metoda za ranu dijagnostiku stanja metala odnosno objekta još u elastičnoj zoni po krivulji plastičnog tečenja materijala, tako da se tek u plastičnoj zoni defekti mogu potvrditi primjenom klasičnih metoda, kao na primjer ultrazvukom. Isto tako, MMM metoda može detektirati i mikropukotine koji zbog svoje male veličine još nije moguće detektirati primjenom ultrazvuka, tako da se preporučuje pojačano praćenje tih područja

tijekom eksploatacije. MMM je moguće primijeniti na feromagnetičnim i paramagnetičnim materijalima tijekom same proizvodnje (npr. prije i poslije toplinske obrade radi potvrde o smanjenju naprezanja, nakon zavarivanja i dr.) kao i tijekom eksploatacije. MMM metoda je primjenjiva za ispitivanje osnovnog materijala, zavarenih spojeva, cijevi, izmjenjivača topline, vijaka na prirubnicama tijekom samog rada postrojenja kao i tijekom remonta, čeličnih kablova (dizala, strojevi), lopatica turbina, statora, željezničkih tračnica i drugo. MMM metoda je standardizirana kao ISO 24497, međunarodni standard za osnovnu primjenu i za primjenu na zavarenim spojevima. Za primjenu metode nije potrebna prethodna priprema ispitnog objekta, prikupljanje podataka se vrši skeniranjem površine bez nekih posebnih ograničenja brzine (cca. do 300 mm/s, a i brže u nekim slučajevima), te je samim time MMM jedna od brzih metoda bezrazornog ispitivanja.

2. OPREMA ZA PROVEDBU MMM ISPITIVANJA

Za primjenu metode MMM koristi se ručni instrument napajan baterijama, te uređaj za skeniranje koji sadrži senzore (visoko osjetljivi 2-osni flux-gate magnetometri). Postoje razni modeli uređaja za skeniranje, primjenjivi na raznim geometrijama koji se mogu spojiti na instrument. Osim samih senzora, uređaj za skeniranje sadrži i odošetar, odnosno mjerac udaljenosti pomoću enkodera i kotača, te memoriju koja pamti kalibraciju odošetra i senzora. Samim time u praksi tijekom ispitivanja



Slika 2.1 Instrument za primjenu metode MMM model TSC-7M-16 proizvođača Energodiagnostika, Moskva, Rusija

olakšana je izmjena uređaja za skeniranje, jer nije potrebno vršiti ponovnu kalibraciju nego samo izvršiti provjeru. Sami senzori se kalibriraju na Y komponentu magnetnog polja zemlje (normala), na način da se u pojedinoj orijentaciji uređaja za skeniranje podese da mjereno polje iznosi 40 A/m, što je otprilike vrijednost magnetnog polja zemlje na ovom zemljopisnom području. Kalibracija se mora vršiti na području sa što manje vanjskog utjecaja na magnetno polje, dakle najbolje na otvorenom prostoru, što dalje od dalekovoda i slično.



Slika 2.2 Uređaj za skeniranje SD-1 (univerzalna namjena) s 4 senzorska modula koji svaki mjeri magnetno polje u smjeru Y (normala na ispitni objekt) i X komponentu (u smjeru skeniranja). Uređaj ima kotače za mjerenje udaljenosti, podesiv razmak senzora ovisno o vrsti skeniranog objekta kao i podesivu udaljenost senzora od ispitnog objekta

3. PRIMJENA METODE MMM I USPOREDBA S REZULTATIMA KLASIČNE METODE ULTRAZVUKA

3.1 Uzorci i provedba ispitivanja

Metoda MMM je primijenjena na uzorcima za vježbu za metodu ultrazvuka kod Hrvatskog društva za kontrolu bez razaranja (HDKBR), kako bi se dobiveni rezultati mogli usporediti s rezultatima primjene metode ultrazvuka, kao pripadna dokumentacija uz uzorak.

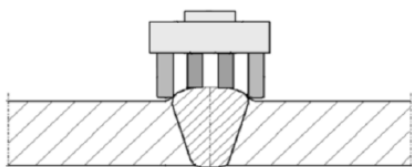
Sveukupno je bilo ispitano 6 uzoraka od toga je 5 uzoraka zavareni spoj, a jedan uzorak je čelični otkivak okruglog profila. Osnovne dimenzije i tip su prikazani u Tablici 3.1 dolje.

Tablica 3.1 Uzorci na kojima je primijenjena metoda MMM

Uzorak	Dimenzije (DxŠxV u mm)	Tip
UT27	285x295x20	lim. zavareni spoj
UT30	Ø50x240	čelični otkivak. okrugli profil
UT47	350x410x15	lim. zavareni spoj
UT50	295x245x15	lim. zavareni spoj
UT51	300x200x12	lim. zavareni spoj
UT52	335x250x12	lim. zavareni spoj

Prije skeniranja potrebno je podesiti senzore za svaki uzorak, na način da se rubni MMM senzori postavljaju na zonu utjecaja topline (ZUT), a srednja dva senzora se postavljaju na sam zavar, te se podešava isti razmak između svih senzora, što ovisi o samoj širini zavarenog spoja. U slučaju uzorka UT27, taj razmak je bio 12 mm, dok je za sve druge uzorke uključujući i UT30 razmak bio 7 mm. Senzori su također bili podešeni da prate zakrivljenost krune zavara i na kraju se senzori odižu da se dobije 1 mm razmak od uzorka prilikom skeniranja. Samo skeniranje je bilo vršeno uzduž zavara, bez ikakve posebne pripreme površine uzorka, s time da se prvih 30-40 mm nije ispitalo zbog dimenzija senzorskog uređaja, pošto je prednji kotač morao biti na uzorku radi mjerenja puta pomoću enkodera. Zadnjih 20 mm isto tako nije bilo ispitano da se izbjegnu lažne indikacije zbog rubnog efekta, pošto su uzorci izrezani iz samih komponenti i/ili limova. U praksi rijetko će doći do ograničenja zbog rubnog efekta, a mogu se koristiti i drugi modeli uređaja za skeniranje za optimiranje područja ispitivanja.

Na slici 3 se može vidjeti skica postavljanja senzora, dok se na slikama 3.1.2 - 3.1.5 se može vidjeti način podešavanja i provedba skeniranja na uzorcima.



Slika 3.1.1 Skica postavljanja i prilagodbe senzora za ispitivanje zavarenog spoja debljine preko 10 mm



Slika 3.1.2 Uređaj za skeniranje na UT27 uzorku. Razmak između senzora je 12 mm zbog veće širine zavara. Rubni senzori su postavljeni na ZUT, a središnji na zavar



Slika 3.1.3 Uređaj za skeniranje na UT50 uzorku. Zbog izraženije krune zavara, senzori su podešeni da prate zakrivljenost krune s time da su rubni senzori postavljeni na ZUT, a središnji na zavar i sam razmak između senzora je 7 mm



Slika 3.1.4 Način skeniranja zavarenog spoja – uzdužno. Lijeva oznaka crvenom kredom je početak skeniranja (cca. 40 mm od ruba) kako bi kotač uređaja za skeniranje bio na uzorku radi mjerenja puta preko enkodera, a desna oznaka crvenom kredom je kraj skeniranja radi izbjegavanja rubnog efekta



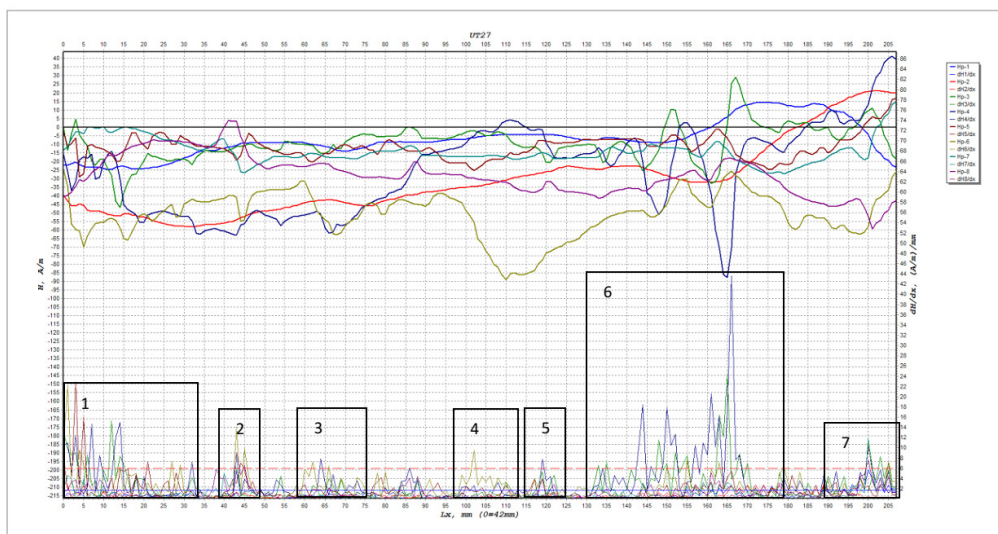
Slika 3.1.5 Skeniranje uzorka UT30. U praksi na ekranu instrumenta, operater može odmah vidjeti distribuciju magnetnog polja, udaljenost i gradijent, te označiti ta područja za daljnja ispitivanja. Zbog toga se metoda MMM smatra brzom metodom

3.2 Rezultati MMM

Nakon provedbe skeniranja, vršena je analiza prikupljenih MMM podataka preko softvera na računalu MMM-System, koji omogućuje komotniju analizu podataka, iako je i na samom instrumentu analiza u potpunosti moguća preko ekrana i tipkovnice, npr. kod primjene na terenu.

Magnetogrami će biti prikazani za svaki ispitani uzorak, a analiza se zatim vrši na način da se gleda distribucija magnetnog polja (gornji grafovi), te ponajviše gradijent promjene polja (modulo) - $|\Delta H/\Delta x|$ (donji grafovi). Plava linija označuje srednju vrijednost vrijednosti gradijenta, dok crvena iscrtna linija prikazuje prag kriterija odabira, a postavljena je na 4x vrijednost plave linije. Svi gradijenti koji prelaze crvenu iscrtnu liniju se odabiru kao zona koncentracije stresa, te se veličina (od-do) mjeri do nivoa šuma što iznosi 2x vrijednost plave linije. Isto tako je moguće gledati i gradijente u smjeru postavljanja senzora, $|\Delta H/\Delta z|$, koji također detektiraju zone koncentracije stresa ili potvrđuju značaj onih u smjeru skeniranja. U praksi, ako ima puno zona koncentracije stresa na nekom području koje su blizu jedna drugoj, one se mogu grupirati u jednu zonu kako bi se odredilo sveobuhvatno područje za daljnje ispitivanje primjenom klasičnih metoda. Opisani način analize je općenitog tipa, dok za dosta komponenti u industriji postoje upute za ispitivanje i odabir kriterija. Također, sami kriteriji se mogu korigirati za specifične slučajeve, nakon potvrde razornim metodama ili bezrazornim metodama ispitivanja.

3.2.1 Uzorak UT27



Slika 3.2.1.1 Magnetogram za uzorak UT27. Gornji grafovi prikazuju distribuciju magnetnog polja H (skala za očitavanje na lijevoj strani), donji grafovi prikazuju gradijent (skala za očitavanje na desnoj strani). Donja os je dužina. Instrument kao ishodišnu točku uzima 0, iako je to 42 mm na samom uzorku, tako da je nužno vršiti korekciju

Na magnetogramu uzorka UT27 na slici 3.2.1.1, moguće je vidjeti 7 zona koncentracije stresa:

Tablica 3.2.1.1 Zone koncentracije stresa UT27 uzorka

Zona Koncentracije Stresa (ZKS)	Od - bez korekcije (mm)	Do - bez korekcije (mm)
1	0	33
2	40	47
3	60	73
4	98	112
5	116	123
6	130	173
7	196	204

Kod skeniranja uzoraka, na početku je samo jedan kotač uređaja za skeniranje bio na limu pa je došlo do pomaka kada je i drugi kotač došao na lim, što je moguć uzrok povećanog gradijenta u dužini od cca. 30 mm kao ZKS 1. ZKS 3-5 zone koje tek prelaze prag kriterija. U njima dolazi do povećanog naprezanja i tijekom eksploatacije, velika je vjerojatnost da nastanu defekti na tim dijelovima koji se mogu detektirati klasičnim metodama kao što je ultrazvuk. No, i prije toga metodom MMM je moguće praćenje rasta naprezanja tih zona kao i vršenje korektivnih zahvata, što je prednost same metode. ZKS 2,6 i 7 su izraženije zone u kojima je nužna daljnja provjera. Također, gledajući gornje grafove distribucije magnetnog polja, H, u zoni 6 je primijećena velika divergencija komponenti magnetnog polja što ukazuje na defekt većeg značaja u materijalu.

Za uzorak UT27 provedena je ultrazvučna kontrola i nađene su sljedeće indikacije:

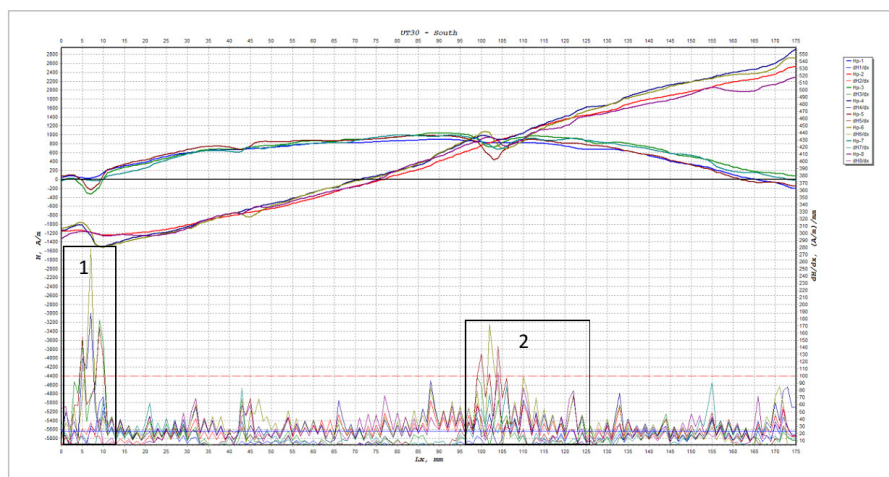
Tablica 3.2.1.2 Zone koncentracije stresa UT27 uzorka

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Duljina (mm)	ISO 6520 kat.
5	+5	17	-	300
160	-10	16.5	-	300

Indikacija na udaljenosti 5 mm po osi X od ishodišne točke nije bila skenirana metodom MMM, jer je skeniranje vršeno tek od 42 mm. Indikacija na 160 mm odgovara detektiranoj ZKS 6. Naime, ZKS 6 se proteže od 172 mm do 215 mm. Ako gledamo zonu smičnog pomakapodkutomod 45° , indikacijase napovršini javlja do 176,5 mm (160+16,5 mm), a pošto indikacija ima svoju visinu i dužinu, time također i ZKS ima svoju dužinu. Gledajući na vrijednost gradijenta, zona gdje je i UT indikacija ima znatno veći gradijent nego zone 2 i 7.

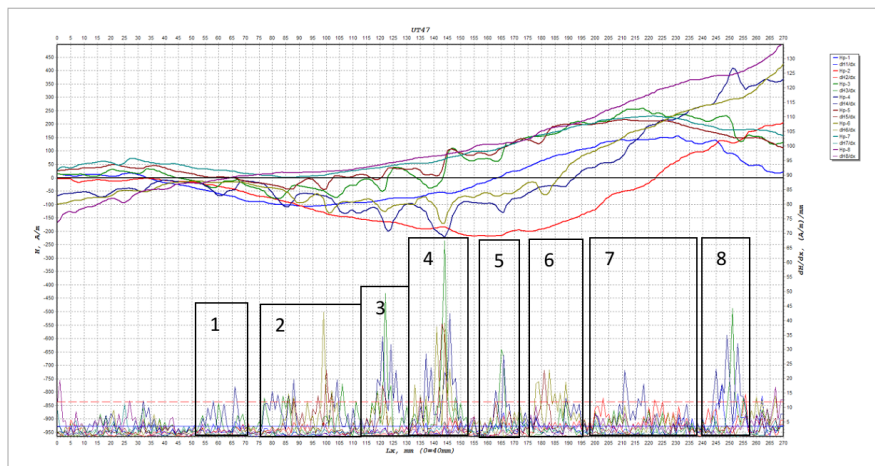
Analiza UT27 uzorka je bila prikazana detaljno. Radi smanjenja dužine ovog članka, magnetogram će biti prikazan u potpunosti, dok će analiza biti vršena samo za značajne ZKS. Uzorak UT30 je valjkastog oblika prikazan na slici 3.4. Na jednom čelu je markirano ime UT30. Gledajući obodno, gdje je oznaka, koordinata je sjever, u smjeru kazaljke na satu je istok, jug te na kraju zapad. Prilikom skeniranja drugi slični uzorak je stavljen kao nastavak radi prihvata kotača uređaja za skeniranje. Slika 3.2.2.1 prikazuje magnetogram ispitivanja. Gledajući gradijent na donjim grafovima, prva ZKS od 2 do 12 mm je uzrokovana zbog prelaska kotača i rubnog efekta. Druga ZKS je od 97 do 125 mm ukupne dužine 28 mm, a uzrok je stvarna indikacija u sredini uzorka dužine 65 mm, potvrđena primjenom ultrazvučnog ispitivanja. Isto tako moguće je primijetiti znatnu promjenu na distribuciji magnetnog polja na području defekta (gornji grafovi).

3.2.2 Uzorak UT30



Slika 3.2.2.1 Magnetogram uzorka UT30. Prikaz magnetograma prikupljenog s južne strane

3.2.3 Uzorak UT47



Detektirane ZKS su prikazane u tablici 3.2.3.1.

Tablica 3.2.3.1 Zone koncentracije stresa UT47 uzorka

Zona Koncentracije Stresa (ZKS)	Od - bez korekcije (mm)	Do - bez korekcije (mm)
1	51	70
2	75	112
3	114	129
4	131	152
5	157	172
6	176	195
7	198	237
8	240	257

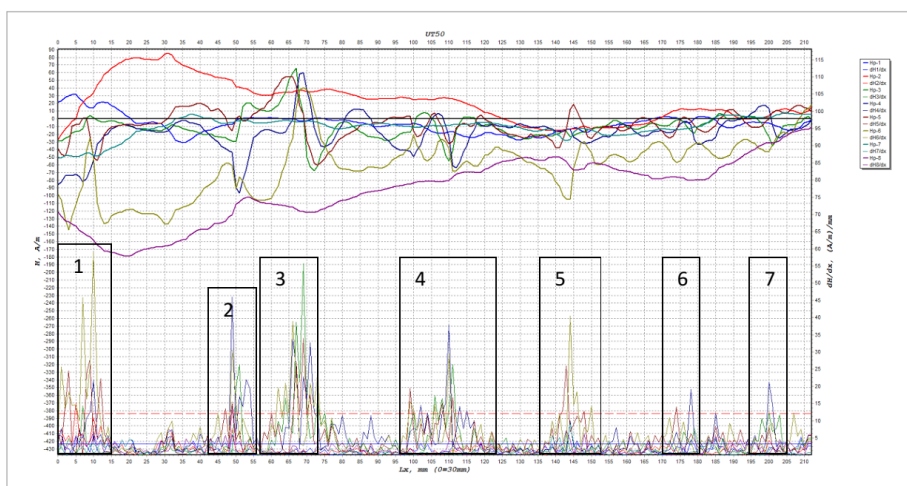
Primjenom korekcije od 40 mm na koordinate ZKS iz tablice 3.2.3.1, ZKS 1 se proteže od 91 do 110 mm te odgovara pronađenoj indikaciji ultrazvučnog ispitivanja. Moramo napomenuti da ZKS 2-8 imaju znatno izraženiju vrijednost gradijenta, te na tim dijelovima zavarenog spoja dolazi do znatno većeg naprezanja od ZKS 1 gdje je i ultrazvučna indikacija. Moguće je za očekivati da bi se pronašle indikacije ultrazvukom i u tim zonama ako bi se primijenila neka druga metoda baždarenja i kriterija prihvatljivosti, a također je velika vjerojatnost za pronalazak defekata u tim zonama primjenom drugih metoda, npr. metalografije.

Ultrazvučnim ispitivanjem uzorka UT47 pronađena je sljedeća indikacija:

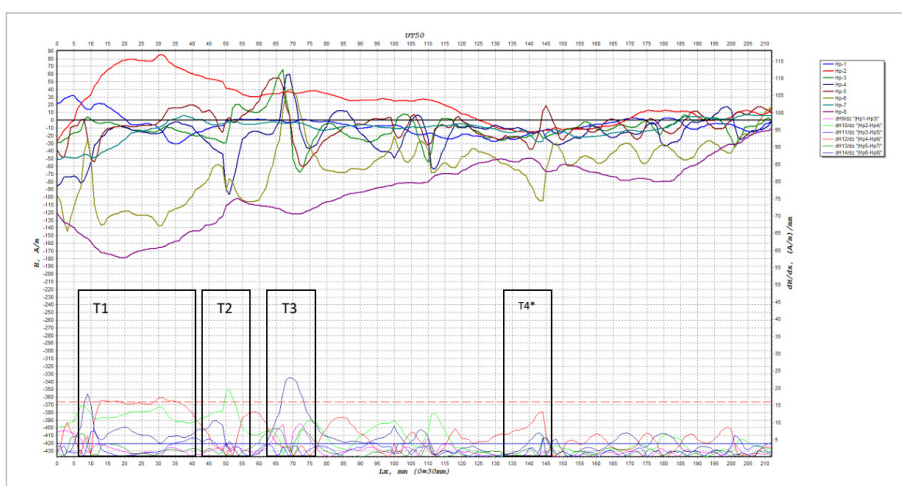
Tablica 3.2.3.2 Rezultati UT ispitivanja uzorka UT47. Os X je uzduž zavora

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Duljina (mm)	ISO 6520 kat.
103	5	10-12	5	300

3.2.4 Uzorak UT50



Slika 3.2.4.1 Magnetogram za uzorak UT50. Gradijent $|\Delta H/\Delta x|$



Slika 3.2.4.2 Magnetogram za uzorak UT50. Gradijent $|\Delta H/\Delta z|$

Tablica 3.2.4.1 Zone koncentracije stresa UT50 uzorka

Zona Koncentracije Stresa (ZKS)	Od - bez korekcije (mm)	Do - bez korekcije (mm)
1	0	15
2	42	55
3	57	73
4	96	123
5	135	153
6	170	180
7	195	205
T1 $I\Delta H/\Delta zI$	7	41
T2 $I\Delta H/\Delta zI$	43	56
T3 $I\Delta H/\Delta zI$	63	77
T4 $I\Delta H/\Delta zI$ - ispod kriterija.	133	147

Rezultati UT ispitivanja su prikazani u tablici 3.2.4.2.

Tablica 3.2.4.2 Rezultati UT ispitivanja uzorka UT50. Os X je uzduž zavora

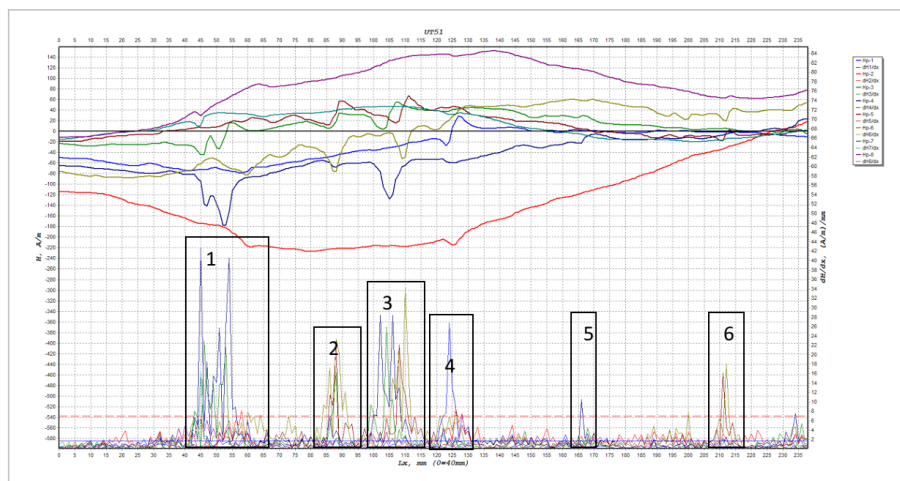
X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Duljina (mm)	ISO 6520 kat.
50	+5	10	57	400
70	-5	9.5	8	300
125	+5	9.5	160	400
135	-5	10	12	300
220	-5	10	20	300
255	-5	11.5	-	300

3.2.5 Uzorak UT51

Gledajući tablicu detektiranih ZKS i dodavši korekciju od 30 mm na koordinate magnetograma, UT indicacija na 50mm je detektirana na ZKS 1, UT indicacija je detektirana na gradijentu u smjeru senzora $I\Delta H/\Delta zI$, ZKS T1. Indikacije na 125 i 135 mm su detektirane unutar ZKS 4 dok je indicacija na 220 mm detektirana u ZKS 6 ako uzmemo u obzir zonu smičnog pomaka pod 45° , indicacija na 255 nije detektirana vjerojatno zbog nedostatne dužine skeniranja. Postoji još nekoliko zona povećanog stresa koja još nemaju potvrdu ultrazvukom ali kod kojih je zaključak isti kao i kod uzorka UT47 da bi se vjerojatno otkrile indikacije primjenom drugih kriterija baždarenja ultrazvučnog instrumenta i kriterija prihvatljivosti odnosno primjene druge metode kao npr. metalografije. Isto tako, vidljiva je dobra korelacija lokacije indikacija gledajući gradijent u smjeru skeniranja ($I\Delta H/\Delta xI$) i okomito na smjer u smjeru razmaka senzora ($I\Delta H/\Delta zI$), od toga zona T4 je ispod kriterija ali korelira sa zonom 5.

Tablica 3.2.5.1 Zone koncentracije stresa UT51 uzorka

Zona Koncentracije Stresa (ZKS)	Od - bez korekcije (mm)	Do - bez korekcije (mm)
1	40	66
2	82	95
3	97	116
4	117	132
5	162	170
6	204	217



Slika 3.2.5.1 Magnetogram za uzorak UT51

Tablica 3.2.5.2 Rezultati UT ispitivanja uzorka UT51. Os X je uzduž zavora

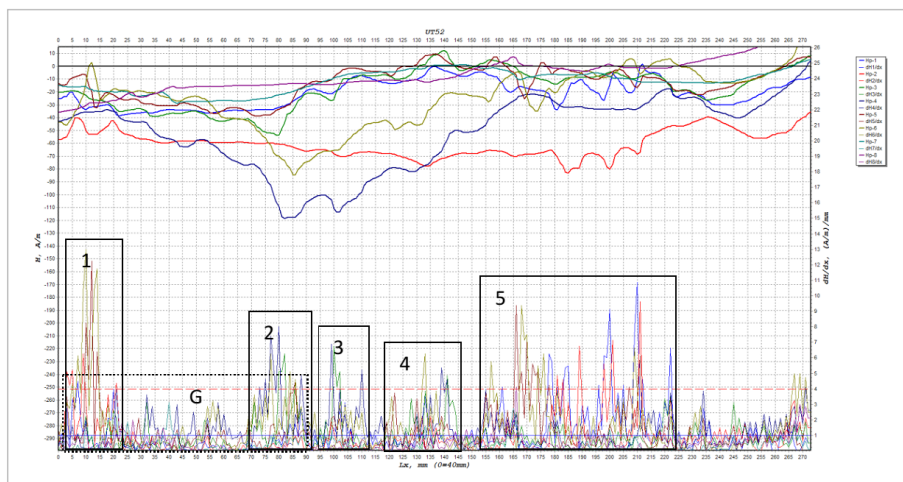
X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Duljina (mm)	ISO 6520 kat.
5	-5	5.5	-	300
85	+3	10	-	300
245	-7	9	-	300
295	0	5	-	300

Indikacija pronađena na 5mm ultrazvukom nije skenirana pošto je skeniranje provedeno od 30mm dužine zavora. ZKS 1 se korigirano proteže od 80 do 106 mm dužine i odgovara indikaciji na 85 mm metodom ultrazvuka. ZKS 6 se korigirano proteže od 244 do 257 mm i odgovara indikaciji na 245 mm metodom

ultrazvuka. Indikacija na 295 mm ultrazvukom nije skenirana jer je skeniranje zaustavljeno prije kraja uzorka radi efekta ruba. ZKS 2-5 također

pokazuju zone velikog naprezanja gdje je vrlo vjerojatno moguće utvrditi postojanje indikacija kao i u slučaju uzorka UT47 i UT50.

3.2.6 Uzorak UT52



Slika 3.2.6.1 Magnetogram za uzorak UT52

Tablica 3.2.6.1 Rezultati UT ispitivanja uzorka UT52. Os X je uzduž zavara

Zona Koncentracije Stresa (ZKS)	Od - bez korekcije (mm)	Do - bez korekcije (mm)
1	3	23
2	68	91
3	94	112
4	118	145
5	152	224
G	3	91

Rezultati UT ispitivanja dati su u tablici 3.2.6.2

Tablica 3.2.6.2 Rezultati UT ispitivanja uzorka UT52. Os X je uzduž zavara

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Duljina (mm)	ISO 6520 kat.
0	-5	4-5	90	400
247	-5	4-5	25	400

Indikacija pronađena ultrazvukom od 0 do 90mm dužine zavara odgovara ZKS 1 i 2 koje se mogu osim izrazitim signalom gradijenta na tim mjestima mogu grupirati u skupnu zonu ZKS G jer su i tamo amplitude gradijenta iznad nivoa šuma, tako da bi cijeli taj segment zavara bio označen za dodatno ispitivanje. Indikacija na 247 mm odgovara ZKS 5 koja se proteže korigirano od 192 do 264 mm. ZKS 3 i 4 su također zone pojačanog naprezanja te bi se vjerojatno našle indikacije u slučaju dodatnog ispitivanja kao što je bio slučaj na uzorcima UT47, UT50 i UT51.

4. ZAKLJUČAK

Metoda MMM je bila primijenjena na uzorcima za metodu ultrazvuka gdje su defekti poznati

kao dokumentacija uz uzorak. Metoda MMM je uspješno detektirala zone povećanog naprezanja na mjestima gdje se i nalaze defekti potvrđeni ultrazvukom, a i detektirala je druge zone povećanog naprezanja gdje ultrazvuk nije pronašao indikacije. Od interesa bi bilo provesti dodatna ispitivanja tih zona, kako bi se utvrdio i okarakterizirao sam proces koji se trenutno odvija u zavaru na tom mjestu i usporedio sa MMM rezultatima. U svakom slučaju, metoda MMM je obećavajuća za ranu dijagnostiku procesa degradacije u ispitnim objektima, te je brza i lagana za samu primjenu bez nekih specijalnih priprema ispitnog objekta.

Ovom prilikom bi se htjeli zahvaliti tvrtki Energodiagnostika (Moskva, Rusija) na pravu za korištenje grafičkih dijagrama oko objašnjenja principa metode MMM.

5. LITERATURA

- [1] Technical guideline for engineering diagnostics of welded joints on pipelines and vessels (GD 34.17.437-95). Energodiagnostika, Moskva, Rusija.
- [2] A. A. Dubow, Physical Base of the Method of Metal Magnetic Memory. Proceedings of the Workshop on Non-Destructive Testing of Materials and Structures, NTM'02 Warsaw, IPPT PAN, 2002, 1-9.
- [3] ISO 24497 standard
- [4] Tester of Stress Concentration (TSC) User Manual. Energodiagnostika, Moskva, Rusija
- [5] Scanning device Type 1 User Manual. Energodiagnostika, Moskva, Rusija.