

## Az MMM vizsgálati módszer alapjai, hazai és nemzetközi gyakorlata Az ipari károsodások korai kimutatásának módszere

Ladányi Péter<sup>1</sup>, A.A.Dubov<sup>2</sup>, Trampus Péter<sup>3</sup>, Dande Kristóf<sup>4</sup>, Magyar Lajos<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Interproject Europe Kft., ügyvezető, tulajdonos, interproject.eu@gmail.com

<sup>2</sup>Energodiagnostika Ltd., ügyvezető, tulajdonos, mail@energodiagnostika.ru

<sup>3</sup>Dunaújvárosi Egyetem, professor emeritus, trampus@uniduna.hu

<sup>4</sup>Trans Lex Work Kft., laborvezető, dande.kristof@tlw.hu

<sup>5</sup>Trans Lex Work Kft., tulajdonos, c. egyetemi docens, magyar.lajos@tlw.hu

### Összefoglaló

Az MMM módszer az elmúlt évtizedben rohamos fejlődésnek indult. Megjelent az új ISO szabvány, tudományos cikkek sorát publikálták neves szakmai lapok, több doktori munkát írtak. A világ egyre több országában kezdték alkalmazni.

A módszer lényege az, hogy a munkadarab felszíne mentén lévő szórt mágneses fluxushoz kötődik az indikáció. Más fizikai jelenség áll a szórt fluxus keletkezésének hátterében, mint a hagyományos mágnesezhető poros és egyéb mágneses vizsgálatoknál. Az MMM kimutaja a fémszerkezetben meglévő feszültséggyűjtő helyeket, valamint a mikro- és makroszerkezeti hibákat. Felhasználható a berendezésekben kialakulóban levő repedések korai előrejelzésére. Földbe fektetett távvezetékek feltárás nélküli vizsgálatára ugyanúgy alkalmazható, mint berendezések szigetelésen keresztüli ellenőrzésére.

### Kulcsszavak

Roncsolásmentes anyagvizsgálat, szórt mágneses fluxus, maradó feszültségek, feszültség-alakváltozás, ipari károsodások megelőzése

### 1. Bevezetés

Az MMM (Metal Magnetic Memory) roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerről az elmúlt évtizedben számos konferencián hangzott el magyar nyelven előadás és megjelentek rövidebb hazai publikációk is. Ez a cikk az első Magyarországon, amely egy összefoglalást ad a módszer történetéről, fizikai alapjairól, hazai és nemzetközi gyakorlatáról, referenciáiról és arról, hogy miben különbözik a jelenleg használt hibakereső módszerektől, illetve miben közös azokkal.

E cikknek az ad igazán aktualitást, hogy most jelentek meg az ISO 24497-1:2020 [1] és ISO 24497-2:2020 [2] jelű szabványok, melyek felváltották az e témakörben már 2007-ben kiadottakat. Az új szabványkettős

három évig készült, és közel tíz ország szakemberei fejtették ki észrevételeiket, javasolataikat, melyeket bedolgoztak az új szabványba.

A 2007-es verziót a Nemzetközi Hegesztési Intézet (International Institute of Welding, IIW) Roncsolásmentes Anyagvizsgálatokkal és Minőségellenőrzéssel foglalkozó bizottsága (Commission V) készítette elő és terjesztette az ISO szakbizottsága elé jóváhagyásra. Sajnos ezekben a szabványokban több fogalmi pontatlanság maradt benne, ami félreértésekre és véletlen vagy szándékos félremagyarázásokra adott okot. Ezeket az új szabványokban már kiküszöbölték.

Az általános mechanikával foglalkozók számára az volt nehezen elfogadható, hogy az MMM a fémszerkezeteket nem tekinti homogénnek és izotrópnak, a részletesen kidolgozott törésmechanikán felnőtt szakember gárda pedig úgy véli, hogy a szerkezetet akkor kell vizsgálni, amikor már kimutatható benne a repedés, míg az MMM módszer már ezt megelőzően méri és elemzi a fémszerkezetek inhomogenitását, feszültséggyűjtő helyeit ott, ahol még nem jelent meg repedés.

Az MMM koncepció lényegét Anatolij Dubov professzor először 1994-ben a Nemzetközi Hegesztési Intézet 47. pekingi éves közgyűlésén mutatta be, majd 1996-ban a párizsi IIW konferencián és később a 7. WCNDT-n ismertette részletesen a szakembereknek. Ekkorra már bő évtizedes kutatómunka állt mögötte e téren. Ő vezette több, mint húsz évig azt a műszaki-tudományos bizottságot, amely a nagyszámú orosz erőmű megbízhatóságának, meghibásodásainak okát volt hivatott vizsgálni és elemezni. E tevékenysége alatt figyeltek fel arra a jelenségre, hogy a károsodások, törések felületén megnövekedett mágnesesség mérhető.

Az oroszországi rendszerváltozás bekövetkeztével Dubov professzor otthagya komoly beosztását és jól fizető állását és megalakította az Energo-diagnostika nevű cégét (egyedül, üres kasszával, ahogy jellemezte az akkori körülményeket)[3],

hogyan a módszer elméleti alapjainak és gyakorlatának megalapozására szentelje élete további részét. E téren írt tudományos könyvei mellett számtalan szabvány és iparági előírás kidolgozásában vett részt, 1994-től 2019-ig 50 elfogadott IIW dokumentumot készített, létrehozott cégén belül egy gyártó bázist, ahol az MMM berendezéseket maguk tervezik és állítják elő, illetve szervizelik mind a mai napig. Az Energiadiagnosztika elkezdte az MMM-en alapuló széleskörű ipari vizsgálatokat. A JSC Gazprom és más ismert olaj- és gázipari óriásvállalat megrendelése, illetve az a tény, hogy az Orosz Műszaki Biztonságttechnikai Hatóság (Rostekhnadzor Szluzsbű) beemelte az általa elfogadott vizsgálati eljárások körébe, hozta meg a módszer számára a döntő áttörést. Létrejött egy ma már nemzetközileg elfogadott oktató és tanúsító intézet, amely az ISO 9712 szabvány alapján dolgozik. Mára több mint 3000 fő a vizsgázottak létszáma, ebből 500 fő kínai és 300 fő egyéb külföldi országból érkezett.

A módszer először Oroszországban terjedt el, ahol sok száz vállalat képezte ki anyagvizsgálóit, majd a Baltikum országaiban, Ukrajnában, ezután egy Lengyelországban létrehozott leányvállalatán keresztül megindult az alkalmazás Lengyelországban, majd a közép-kelet-európai országokban, Csehországban és Magyarországon. Nagy előrelépés volt Kínában egy bázist létrehozni az MMM berendezések értékesítésére és oktatásra. Ma ebben az országban (valamint Dél-Kelet Ázsiában és Dél-Amerikában) terjed a módszer leggyorsabban, kínai tudományos cikkek sora és doktori disszertációk szinte havonta jelennek meg az MMM módszer alapjairól és használhatóságáról nemzetközileg elismert szaklapokban. A módszer hazai elterjedésének krónikája az 1. mellékletben (Az MMM eljárás hazai bevezetésnek főbb eseményei) található. Az itthoni vizsgálatok elterjedésében élenjáró szerepe volt a Trans Lex Work Kft.-nek és a TÜV Rheinland InterCert Kft.-nek, valamint a MAROVISZ támogatásának, mely szervezésében három nemzetközi MMM konferenciát tartottak Budapesten (2014, 2016, 2018) az elmúlt évtizedben.

Az MMM a Metal Magnetic Memory szavak rövidítése. Azért használjuk az MMM elnevezést, mert nemzetközileg ismert és rendszeresen használt, másrészt nincsen még hivatalos magyar megfelelője. A szó szerinti fordítás, fémek mágneses memóriája talán furcsán hangzana, jobb lenne az emlékezete kifejezés, de már az angol verzió is vitatható. Sok magyarázat és félremagyarázat jelent meg az MMM megnevezéséről, de legjobb lesz, ha a szerzőt idézzük:

“A módszer kidolgozásakor sok szakember tévesen úgy vélte, hogy ez az új technika egy, a már meglévő mágneses vizsgálatok sorában, holott ebben az esetben a munkadarab felszíne mentén lévő szórt mágneses fluxushoz kötődik az indikáció.

Itt más fizikai jelenség áll a szórt fluxus keletkezésének hátterében, mint a hagyományos mágnesezhető poros és egyéb vizsgálatoknál. A módszer alapjaiban más fizikai alapokon nyugszik és hogy azonnal megkülönböztethető legyen a “hagyományos mágneses vizsgálatoktól”, adtam ezt a sajátos megnevezést, ami bizonyos reklám előnyökkel is járt a módszer elterjesztésénél.” tárja fel a szerző [3].

## 2. Az MMM módszer fizikai alapjai

Általánosságban véve, egy ismert anyagból készült termék M mágnesezettsége az alábbi tényezőktől függ:

$$M(H_e, T, \sigma, V, m), \quad (1)$$

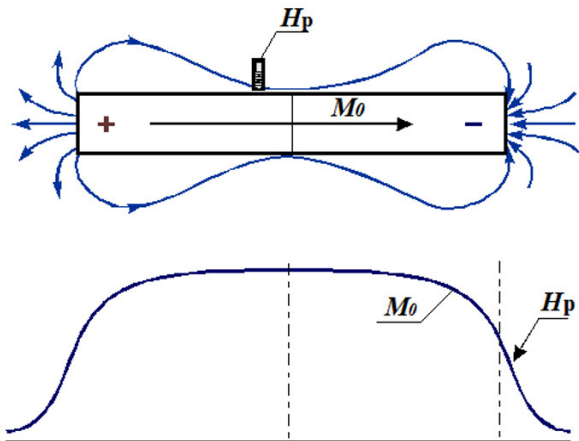
ahol:

- $H_e$  - a külső mágneses tér (általában a Föld mágneses tere  $\pm 45 \div 50$  A/m);
- $T$  - hőmérséklet;
- $\sigma$  - a ferromágneses anyagú testen belüli feszültség;
- $V$  - a ferromágneses anyagú testek térfogata;
- $m$  - tömeg;
- $V, m$  - a térfogat és a tömeg, illetve a termék geometriai méretei egy meghatározott termék-típus vonatkozásában állandó értéknek számítanak.

A terméken belüli feszültségek elsősorban az adott gyártási technológiától függő (olvasztás, kovácslás, sajtolás, hengerlés, hegesztés, hőkezelés stb.) valós környezeti körülmények között történő lehűlése során keletkeznek. Az öntvény külső felülete gyorsabban hűl, mint a belső részei, így hőmérséklet gradiens keletkezik, ami szintén létrehoz belső feszültségeket.

Az ily módon a termékekben létrejött maradandó mágnesezettség mértékét és irányát a következő tényezők befolyásolják: a termék alakja, a termékben meglévő belső (maradó) feszültségek mértéke és iránya, illetve a termék elhelyezkedése a Föld vagy az adott gyártóüzem gyenge mágneses teréhez viszonyítva.

A fémekben, természetes körülmények során létrejövő maradó mágnesezettség miatt kapta önkényes megnevezését – MMM, azaz Metal Magnetic Memory. Számos kísérleti tanulmány kimutatta,

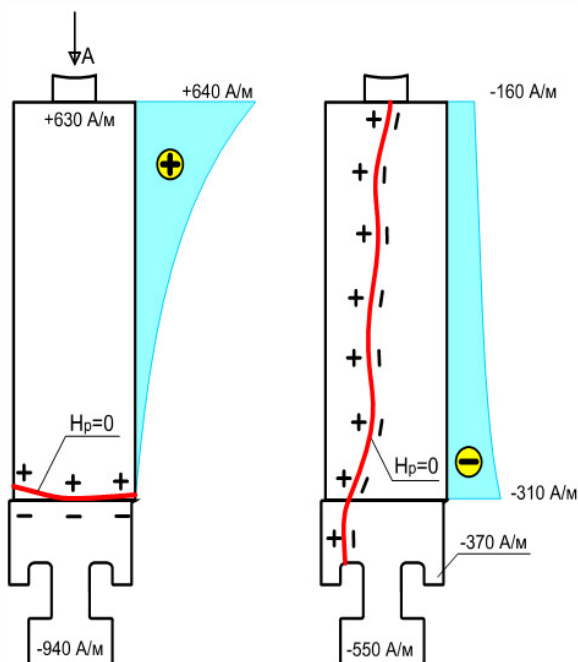


1. ábra: A mágneses térerősség ( $H_p$ ) és mágnesezettség ( $M_o$ ) hagyományos ábrázolása

hogyan a „fémek mágneses memóriája” tükrözi a termék szerkezeti és technológiai átalakítását.

A jelenlegi tudományos álláspont szerint a ferromágneses termékek mágneses térerősségét ( $H_p$ ) és mágnesezettségét ( $M_o$ ) csak a geometriai alak és a külső mágneses tér iránya határozza meg, lásd . A szerkezeti egyenlőtlenséget (inhomogenitást) és a maradó feszültségek jelenlétét az  $M_o$  hagyományos meghatározásánál nem veszik figyelembe.

A 2. ábrán 2 db azonos típusú, új gyártású turbinalapát saját mágneses terének  $H_p$  eloszlása található. A képen jól látható, hogy a két turbinalapát  $H_p$  eloszlása élesen eltér egymástól az anyagszerkezeti inhomogenitásuk és a különböző belső feszültségeik miatt. A turbinalapátok mikroszkopikus repedéseit



2. ábra: MMM módszerrel meghatározott saját mágneses térerősség kimutatása ( $H_p$ ) két egyforma turbina lapáton

az MMM módszer gyorsan és hatékonyan tudja kimutatni, ezért széles körben elterjedt a használata. A kutatások megállapították, hogy a termékek üzemeltetés közben létrejövő mágnesezettségének változását a magneto-elasztikus és a magneto-plasztikus hatás befolyásolja. Az is kiderült, hogy a termékek (például ferromágneses csövek) mágneses térerősség gradiens ( $\Delta H_p$ ) és mágnesezettség változás ( $\Delta M_o$ ) értékei egyértelműen a gyártási (húzás, nyomás, csavarás) és üzemeltetési körülmények (például ciklikus terhelés) során bekövetkezett feszültségekkel állnak kapcsolatban, ami lehetővé teszi ezen paraméterek felhasználását egyfajta „memória elemként” az MMM metódus kidolgozásához. Tehát, az üzemeltetés során a termékek mágnesezettsége ( $\Delta M$ ) megváltozik azon paraméterek hatására, amelyekre már utaltunk az (1) képletben, valamint figyelembe kell venni a termék gyártása és szerelése során keletkező változásokat. Ugyanakkor, olyan paraméterek, mint a  $H_e$  külső mágneses tér, térfogat, tömeg, anyag és a geometriai méretek azonos típusú termékek vonatkozásában állandó értékeknek tekinthetők. Csak a hőmérséklet és a termékekben, szerkezeti elemekben jelenlévő feszültségek és deformációk változnak. Figyelembe véve azt, hogy az üzemeltetés során a termékben történő hőmérsékletváltozás hőmérséklet-gradiens formájában jelenik meg ( $\Delta T$ ), ez a termék feszültségi állapotának változását is ( $\Delta \sigma$ ) okozza.

A mágneses rugalmasság hatására létrejövő mágnesezettség növekedést az alábbi függvénnyel lehet bemutatni:

$$\Delta M_\sigma(H_e, \Delta \sigma) = \Delta M(H_e) + \Delta M_\sigma(H_e, \Delta \sigma), \quad (2)$$

ahol  $H_e$  a gyenge külső térerő (általában a Föld mágneses tereként értelmezzük):

$$\Delta M_\sigma \gg \Delta M(H_e). \quad (3)$$

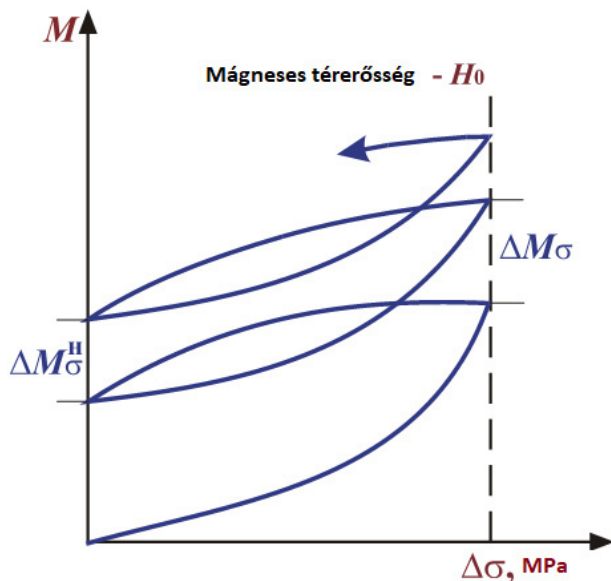
Itt meg kell jegyeznünk, hogy a mágnesezettség  $\Delta M_\sigma$  változása terhelt állapotban és a terhelés megszűnése után eltérő értékeket képez.

Terhelt állapotban ( $\Delta \sigma$  lehet visszafordítható és visszafordíthatatlan komponens) a képlet a következő:

$$\Delta M_\sigma = \Delta M_\sigma^{\text{rev.}} + \Delta M_\sigma^{\text{irrev.}}. \quad (4)$$

A terhelés megszűnése után a reverzibilis komponens  $\Delta M_\sigma^{\text{rev.}}$  megszűnik és akkor (3. ábra):

$$\Delta M_\sigma = \Delta M_\sigma^{\text{irrev.}} \approx \Delta M_{\text{maradó}}. \quad (5)$$



3. ábra: Histerézis görbe. A  $\Delta M\sigma$  – maradó mágnesezettség változása, terhelt és terheletlen állapotban

$\Delta M\sigma$  – maradó mágnesezettség változása, értelemszerűen terhelt és terhelés nélküli állapotban;  
 $\Delta\sigma$  – a ciklikus terhelés változása;  
 $H_0$  – külső mágneses tér.

A Föld mágneses terében a mágneses momentumok elmozdulása tapasztalható. Egy vas mintadarab kristályrácsait alkotó atomok mágneses momentumainak kialakulását és deformációját a [4] és [5] könyvek mutatják be részletesen. A tanulmány alapján megállapítható, hogy a mágneses síkok és a csúszási síkok, melyek energetikailag jöttek létre a kristályrács szintjén, teljesen megegyeznek. Feltételezhető, hogy a mágneses és mechanikai momentumok közötti szög ( $\theta$ ), atom, kristályrács, szerkezeti vagy makroszinten vizsgálva, megegyezik a diszlokációk okozta csúszási szöggel ( $\alpha$ ).

A momentumok közötti szög kiváltó oka az anyag saját rezgési frekvenciája. A mágneses és mechanikai momentumok között létrejövő szög a termékre gyakorolt külső mechanikai terhelés által kiváltott rugalmas és plasztikus rezgéseknek köszönhető.

Belső feszültség – az anyag belső energiaváltozásának integráns jellemzője egy anyagszerkezeti elem belül, melyhez az elem formájának, geometriai méretének és szög orientációjának változása járul a külső mezők hatására, és amelyet a feszültség-alakváltozás állapot paramétereivel lehet jellemezni.

Integráns jellemző – olyan kumulatív, egységes anyagjellemző, amely az anyag fő tulajdonságát tükrözi, azaz a saját energiakapacitást.

Anyagszerkezeti elem – az anyag olyan minimális mennyisége, amely rendelkezik geometriai alakkal, méretekkel, térbeli irányultsággal a rá ható erőterhez

viszonyítva, hordozza az anyag minden mechanikai tulajdonságát, tükrözi a belső energiasűrűség-változásokat és a belső feszültségek eloszlását. Összegezve, a belső feszültség (bizonyos korlátozásokkal) az anyag belső energiájának a sűrűsége.

A magneto-plasztikus hatás a ferromágneses anyagokban a mágneses permeabilitás ( $\mu$ ) és a diszlokációk sűrűségének ( $\rho$ ) függvényében, külső mágneses- és mechanikai erőterekkel történő kölcsönhatás során jelentkezik.

A gyenge külső mágneses tér nem képes megváltoztatni az atomok mágneses momentumainak sűrűségét és a hatása a ferromágneses anyagokban csupán a mágneses momentum vektorjainak ugrászerű, a lehető legjobb pozícióba történő elfordulásában jelentkezik.

A mechanikai erőterek viszont fordítva, nem képesek megfordítani a mágneses momentum vektorjainak irányát, de közvetlenül növelik azok sűrűségét, mindezt másféle módon, attól függően, hogy hogyan vannak orientálva egymáshoz képest a mágneses- és az erőter vektorjai (pontosan emiatt a „mágneses memória” maximális értéket mutat próbatetek kivágása esetén, például egy csődarab kimunkálása a Föld mágneses teréhez viszonyítva abban az irányban, amelyben a cső terhelése volt).

Az MMM energetikai elmélete azon alapszik, hogy minden ferromágneses anyag, amelynek meghatározott alakja van és meghatározott anyagból készült, saját energiakapacitással rendelkezik, ami meghatározza az ellenálló képességét a külső hatásokkal és károsodásokkal szemben. A kutatások azt az eredményt adták, hogy a határállapot, amikor a ferromágneses anyag degradációja fellép, ugyanazokat az energetikai jellemzőket adja, azaz a ferromágneses anyagok degradációs energiája, függetlenül a különböző körülmények és fizikai hatások kombinációjától, ugyanazt az energetikai konstanst képezi. Például, a vázolt eredményt úgy lehet elérni, hogy azonos mintákat tesztlünk a Föld gyenge mágneses terében, statikus és ciklikus húzó terhelések mellett (azaz általános laboratóriumi körülmények között) és ezt követően megmérjük a saját szórt mágneses fluxus értékét a károsodott felületek mentén. A mért értékek gyakorlatilag azonos eredményeket fognak adni, függetlenül a terhelés jellegétől.

Az MMM módszer kidolgozása során kapott eredmények természetesen összhangban vannak az energiamegmaradás törvényével. Az energiamegmaradási törvény a termodinamikai és erőhatás-deformációs konstansok között feltárt kapcsolatban

is megmutatkozik [4]. Az erőtérhatás-deformáció paraméterek átstrukturálják a diszlokációk sűrűségét ( $\rho$ ). Következésképpen átrendeződik a próbatest mágnesezettsége. Függetlenül a lokális deformációktól és  $\rho$  lokálisan jelentkező változásaitól, a minta teljes térfogata és tömege változatlan marad. A ferromágnesben létrejövő belső feszültség olyan lokális energetikai jellemző, ami az anyag saját belső energiájának változását tükrözi az adott szerkezeti elemen belül vagy annak lokális környezetében, külső behatás következtében, és amely változást a feszültség-deformált állapot és annak mágneses paraméterei határozzák meg. A mágneses paraméterek a kísérleti és elméleti kutatások során feltárt, a mágneses és az erőtéri energiák közti mágneses-mechanikai összefüggés által meghatározott mágneses energiát tükrözik, lásd (6) és (7) képletet:

$$m = \frac{K_{\max}}{K_{\text{ave}}}, \quad (6)$$

ahol az  $m$  paraméter az anyag nyúlási kapacitásának határértéke [4].

A képletben  $K_{\max}$  az erőtér gradiens ( $dH/dx$ ) határértékét jelenti, mely az MMM módszer által a feszültséggyűjtő helyeken kerül meghatározásra közvetlenül a mikro repedések keletkezése előtti fázisban, (vagy a repedésterjedés kezdeti szakaszán), a  $K_{\text{ave}}$  pedig a térerő gradiens átlagolt értéke, amit a feszültségkoncentrációs zónákban mért eredményekből számítások alapján határoznak meg. Ipari és laboratóriumi kísérletekből a próbatestek mágneses és mechanikai paraméterei között az alábbi egyszerűsített összefüggés állapítható meg [4][5]:

$$m_{\text{lim}} = \frac{K_{\max}}{K_{\text{ave}}} \approx \frac{K_{\text{lim}}}{K_t} \approx \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\sigma_t}. \quad (7)$$

A  $K_{\max}$  and  $K_{\text{ave}}$  értékek az azonos típusú berendezéseken mérési eredményekből nyerhetők, megfeleltethetők a  $K_{\text{lim}}$  és  $K_t$  értékeknek, amelyeket azonos anyagú szakítópróbatesteken nyerünk, ezek úgyszintén megfeleltethetők mért valódi feszültségének a szakadás pillanatában  $\sigma_{\text{lim}}$  és a szakítószilárdságnak  $\sigma_t$ .

A (7) képlet egy egyszerűsített modell, nagyon fontos a ferromágneses anyagok mágneses és mechanikai paramétereinek és ezek összefüggéseinek MMM útján történő meghatározásához, további kutatások alapvető kiindulási pontja.

A károsodás növekedésének sebességét a kölcsönösen összefüggésben lévő termodinamikai

(hőtárolási kapacitás, hővezető képesség) és a belső feszültségek erőtér-deformáció (fizikai deformációk és a deformációkkal szembeni ellenálló képesség) paraméterei határozzák meg.

A kísérleti és elméleti tanulmányok eredményeire támaszkodva, a végállapotok, illetve azokkal szervesen összefüggő kritériumok és alapvető fogalmak a következők:

- Az anyag végső állapota – ez egy végpotenciál, amit csak a belső energia átlagolt sűrűségének értéke határoz meg, amely az anyag individuális tulajdonságát képezi, és amely nem függ sem a szerkezeti elem méreteitől, konstrukciójától, sem a terhelési körülményektől.
- Az anyag tényleges állapota a lokális térfogatban – a belső energia tényleges sűrűségének értéke – az a tényleges potenciál, amit az anyag egyedi tulajdonságai, a vizsgált térfogat elhelyezkedése az anyagszerkezeti elemen belül, az elem méretei és terhelése határoznak meg.
- A létrejövő károsodás lokális méreteit az anyag egyedi tulajdonságai, a vizsgált anyagszerkezeti elem méretei és terhelése határoznak meg, amelyek következtében meghatározzák a lokális deformációk tényleges eloszlását a szerkezeti elemekben. Méretük általában 0,01 és 5 mm között mozog.

### 3. Az MMM módszer gyakorlati alkalmazása

#### 3.1 Feszültséggyűjtő helyek

Köztudott, hogy a gépek üzemeltetése során keletkező károsodások elsődleges forrását a feszültséggyűjtő helyek kialakulása jelenti, mely zónák az üzemeltetési terhelések során elsősorban kohászati és technológiai eredetű hibák helyein alakulnak ki.

A fémkohászati és technológiai eredetű gyártási hibák a termékek lokális zónáiban nagymértékű maradó feszültséget okoznak. A termékek maradó feszültségének ellenőrzése az egyes gyártóknál szelektíven történik. Az ellenőrzés során a maradó feszültség átlagolt (térfogati) szintjét mérik, a lokális maradó feszültségeket viszont nem veszik figyelembe, azokat kihagyják az ellenőrzésből. Ezen kívül az sem ismert, hogy hol vannak ezek a helyi zónák és hogyan lehet őket észlelni.

#### 3.2 Az MMM módszer alkalmazásának fő feladatai

- A feszültségkoncentrációs helyek, mint a károsodások fő kiindulási forrásainak feltárása, mind

a fémipari gyártmányokban, mind a hegesztett kötésekben;

- Fáradásos károsodások korai szintű előrejelzése, illetve a gépek és szerkezetek maradék élettartamának előzetes megbecsülése;
- A gépek és szerkezetek feszültség-deformációs állapotának és annak eloszlásának meghatározása;
- Vizsgálati költségek csökkentése az MMM és a hagyományos roncsolásmentes vizsgálati módszerek kombinált alkalmazásával;
- Új, illetve üzemeltetésben lévő gépgyártási termékek gyors minőségi ellenőrzése az anyag-szerkezet inhomogenitásának mérése alapján.

### 3.3 Mit határoznak meg az MMM vizsgálati módszer során?

- Feszültséggyűjtő helyeket – mint a későbbi károsodások fő forrásait;
- A fémek felületén és belsejében keletkezett mikro- és makro eltéréseket (hibákat).

### 3.4 A vizsgálati módszer jellegzetessége

Az MMM módszer célja a többi, iparilag gyakran használt roncsolásmentes anyagvizsgálati módszertől eltérően a feszültségkoncentráció meghatározása a próbatesten vagy a fémszerkezeten. A módszer segítségével megbecsülhető a hiba veszélyességi szintje a további károsodásfejlődés szempontjából, és a vizsgálat eredménye általános képet ad a fémek és hegesztési varratok feszültség-alkváltozás állapotáról.

A vizsgálatok során nem mágnesezik fel a munkadarabot, azokra csak a földi mágneses tér hat.

A vizsgálatához igen érzékeny mágneses térmérő szondák szükségesek.

A technológia a fémszerkezet saját mágneses mező eloszlásának mérésén és elemzésén alapszik.

A vizsgálat alapján kimutatott feszültséggyűjtő és hibahelyek az alapanyag és hegesztési varratok inhomogenitásai, melyeket hagyományos anyagvizsgálati eljárásokkal pontosítani lehet.

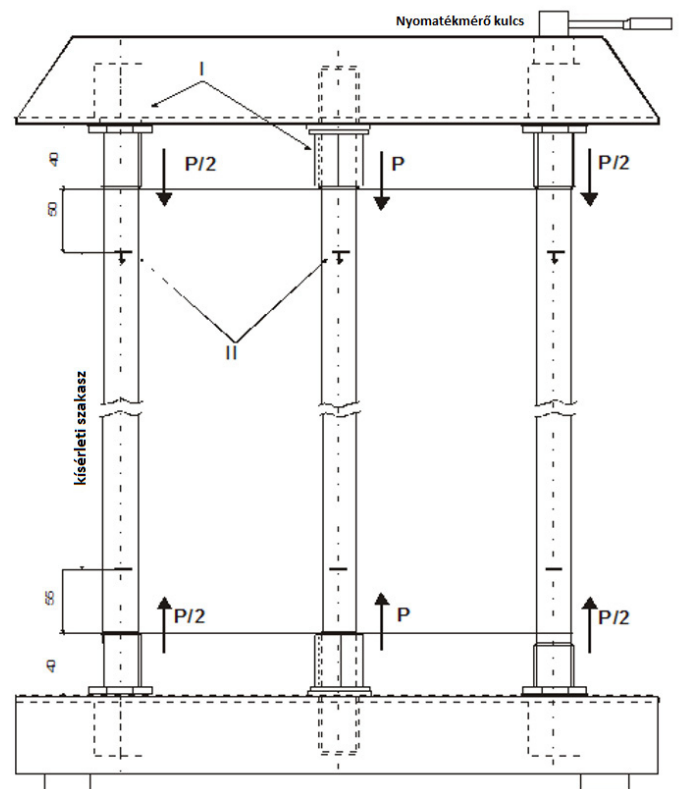
A feltételezett hibapontokban további ellenőrzés ajánlott, például a repedésmélység, falvastagság csökkenés mérése stb. ahhoz, hogy az anyaghiba jellege és mérete pontosan meghatározható legyen. Ugyanakkor bizonyos esetekben, például sorozatgyártás vagy azonos méretű csövezeték rendszerek szerelése és hegesztése esetén mennyiségi következtetés is levonható megfelelő kalibrálás után.

Ennek azonban a vizsgált objektumra vonatkozóan specifikusnak kell lennie, úgy az anyagminőséget és a geometriát, mint az üzemi terhelést és helyi mágneses teret illetően. A módszer kidolgozói az iparban található tipikus elemekre részletes eljárásokat készítettek, ezekből közel 50 féle eljárás van kész, és számuk egyre nő (például kazán csövek, turbina lapátok vizsgálatához), melyek a mérési technológiát és kalibrálási lehetőségeket tartalmazzák.

A módszer gyors és nem igényel felület előkészítést (például tisztítást, mesterséges mágnesezettség kialakítását, szigetelésbontást).

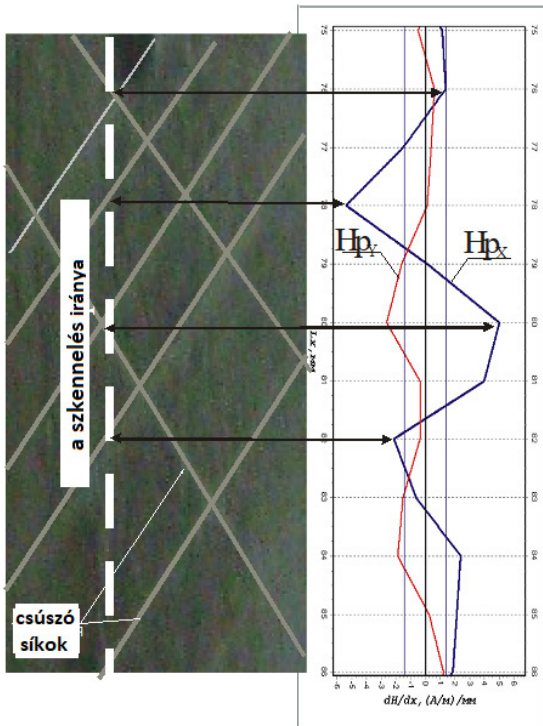
### 3.5 Az MMM és az ultrahangos vizsgálati módszer alkalmazásának összehasonlítása egy gyakorlati példán

Az MMM módszer lényegét, előnyeit és összehasonlítását más módszerekkel könnyen lehet szemléltetni a következő kísérlettel. Egy stabil acél befogószerkezetbe helyezünk egy ismert anyagú  $\varnothing 25 \times 3$  mm-es vizsgálandó csövet (lásd 4. ábra középső csövet), melyet előzetesen megröntgeneltünk és ultrahangoztunk, és ezen vizsgálatok alapján hibamentesnek tekintünk. A befogó acél-szerkezetet a jobb oldalon látható mechanikus szerkezettel lassan, folyamatosan nyomás alá helyezzük.

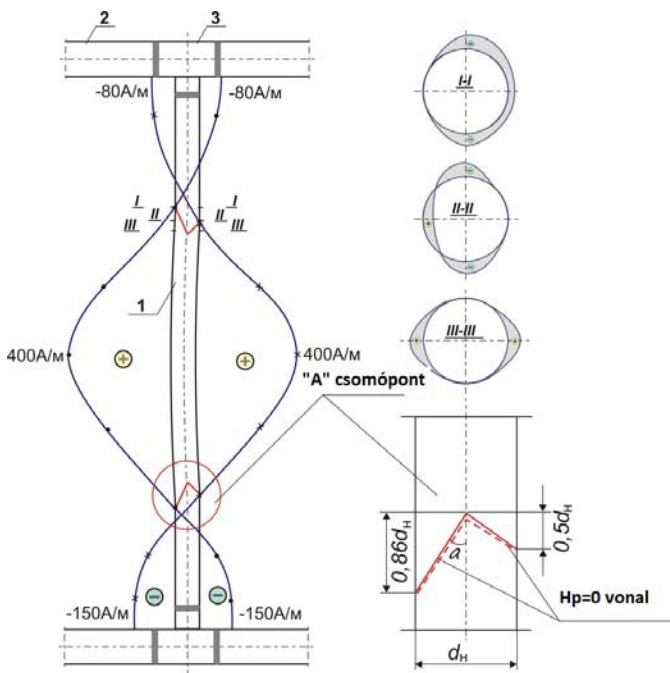


4. ábra: Az MMM módszert bemutató kísérleti berendezés és terhelése. I csavarok, II szkennelés iránya

A csövet rendszeresen MMM módszerrel és ultrahangos fejjel szkenneljük. Egy ideig semmilyen indikáció nem jelenik meg, majd az MMM módszerrel érzékelhető jeleket mutat a műszer, amelyek a nyomóerő növekedésével egyre szignifikánsabbá válnak. Láthatóak lesznek a cső felületére kijövő csúszási síkok, lásd 5. ábra.



5. ábra: A közepső, vizsgált csövön létrejövő csúszási síkok hálóját a mágneses mező  $dH_p/dx$  deriváltjának függvényében



6. ábra: A mágneses tér normál összetevőjének eloszlása ( $H_p$ ) a vizsgált cső húzott és nyomott felületén

Később a cső kezdődő repedése ezen a síkon (síkon) jelenik meg.

Hamarosan, de jóval az MMM műszer jelzése után az ultrahangos berendezés is indikációt jelez. Tehát az MMM módszerrel hamarabb kimutathatók a fém szerkezetben bekövetkezett anyagszerkezeti változások, mint az iparban hagyományosan alkalmazott egyéb anyagvizsgálati eljárásokkal.

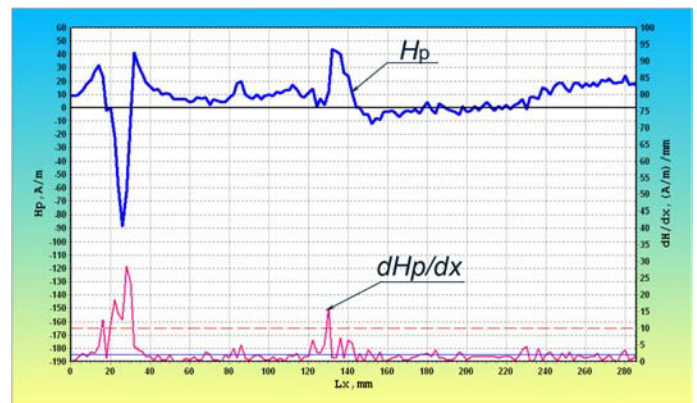
Az I-I a II-II és III-III metszetekben jól látható a húzó és nyomó feszültségek eloszlása. Az A csomópontban a csúszási sík és a  $H_p=0$  vonal van kivetítve, lásd 6. ábra.

### 3.6 Az MMM módszer magnetogramja

A mért indikációkat magnetogram jeleníti meg.

A 7. ábrán jellegzetes magnetogram látható, a paraméterek értelmezése:

- $H_p$  – a szórt mágneses fluxus normál és/vagy tangenciális összetevője.
- A mérési csatornák közötti mágneses térerősség gradiense,  $dH/dx$  és/vagy  $dH/dz$  bázis alapján.



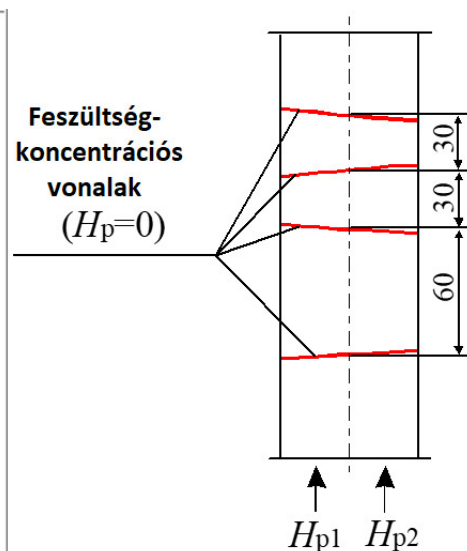
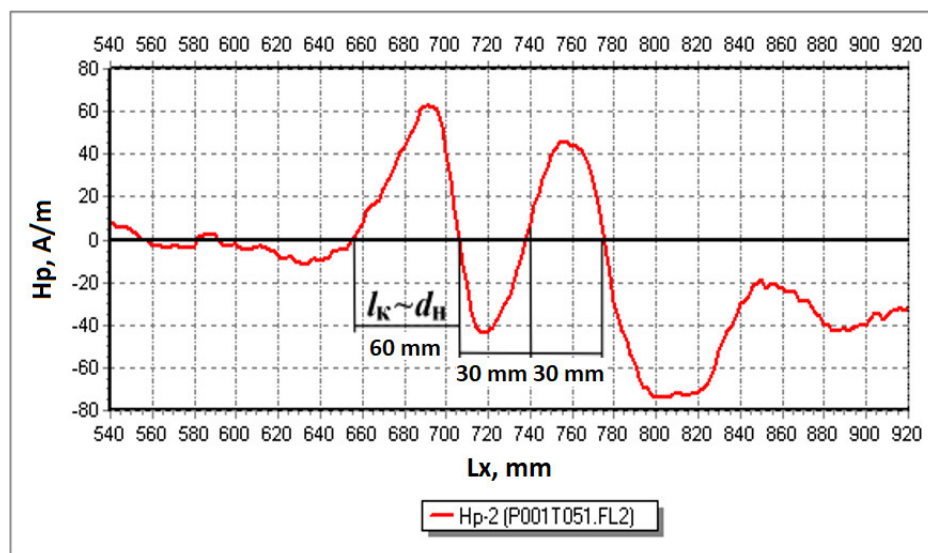
7. ábra: Az MMM magnetogram és a vizsgálati módszer során használt mágneses paraméterek

Ott, ahol hirtelen nagy változások regisztrálhatók a mágneses térerősség indikációjában, ott lehet anyaghibát, inhomogenitást, mikro-, makroméretű elváltozásokat feltételezni.

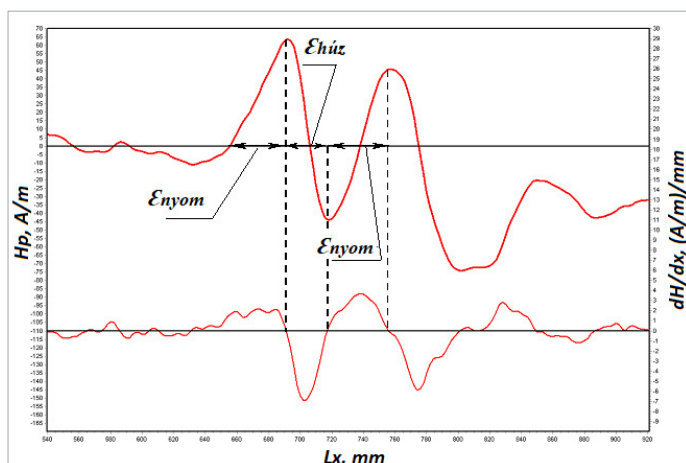
A 8. ábrán egy acélcső ( $\varnothing 60 \times 4$  mm-es) magnetogramja található, melynek konstrukciója folytán a hőmérséklet okozta alakváltozása korlátozott.

Ahol a  $H_p$  vonal metszi a tengelyt, azon a helyeken várható a szerkezetben a húzó és nyomófeszültségek váltakozása. A távolság, ahol  $H_p$  mért értékei előjelének változásai mérhetők, megegyeznek a cső külső átmérőjének és a cső felének hosszával.

A 9. ábrán a  $H_p$  eloszlása alatt a  $dH/dx$  látható az előzőekben említett acélcső ( $\varnothing 60 \times 4$  mm-es)



8. ábra: Magnetogram, a szórt fluxus váltakozása és a  $H_p=0$  vonalak



9. ábra: Feszültségkoncentrációs helyen  $H_p$  – a szórt mágneses fluxus és deriváltjának eloszlása a húzás, illetve nyomó terhelés függvényében

feszültségkoncentrációs helyén. A szaggatott vonal jelzi a húzó- és nyomófeszültség okozta deformáció határát. A gradiens előjelének változása megegyezik a deformáció előjelének változásával. A húzás okozta deformáció értéke kisebb, mint amit a nyomás okoz. A gyakorlati eredmények jól közelítik a számított értékeket. A 9. ábra az acélcső feszültségkoncentráció helyén mennyiségi összefüggést mutat ki a deformáció okozta mező és a mágneses mező eloszlásában.

Az Energodiagnostika és a TÜV InterCert Kft. 2011-ben az ISD Dunaferr laboratóriumában az alábbi kísérlet sorozatot végezte el.

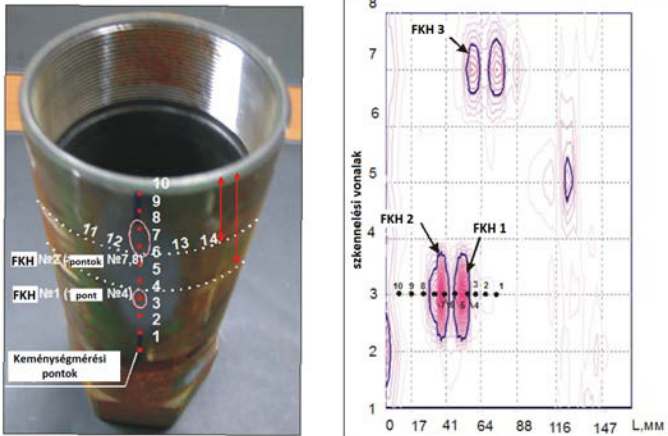
Lapos szénacél próbatesteket statikus húzásnak tették ki, közben MMM műszerrel mérték a mágneses térerősség változását. A vizsgálatok során létrejövő mechanikai ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) és mágneses ( $|\Delta H_x|$ - $\epsilon$ ) tulajdonság változások között meglepő törvényszerűség volt

tapasztalható [7], melyet különböző acéltípusokkal és próbatest formákkal dinamikus terheléssel is megismételtek [8] más laboratóriumokban.

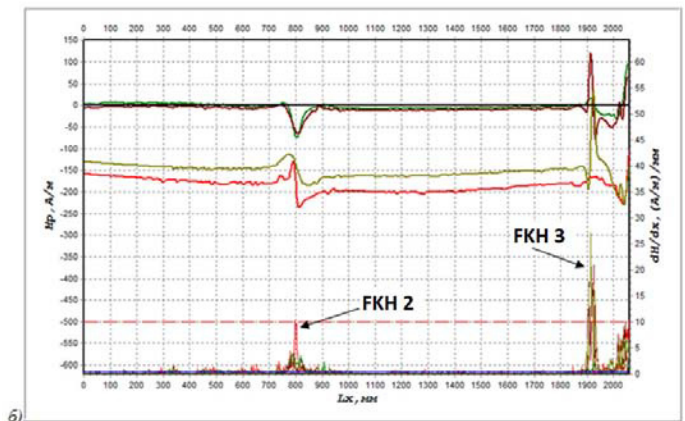
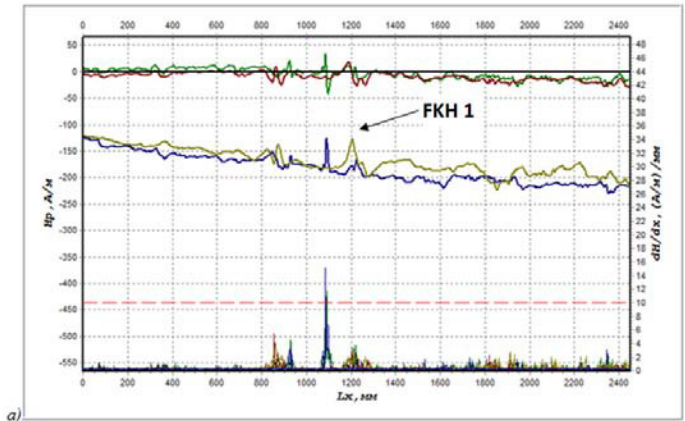
Az anyag mechanikai tulajdonságainak egy fontos jellemzője az arányossági határ (vagy rugalmassági határ). Ez a lényeges, azonban feltételesen megadott jellemző pontos fizikai értelemmel bír: a „feszültség-deformáció” görbén az általánosan elfogadott arányossági határ közelében létezik egy pont, amelyet az jellemez, hogy ebben a pontban a hosszirányú deformáció rugalmas és plasztikus összetevőinek növekménye a terhelés kismértékű változásánál egyenlő – vagyis, egyenlők a deformáció rugalmas és plasztikus összetevőinek feszültség szerinti deriváltjai. Az acélminták szokásos szabványos szakító vizsgálatánál a szakítógép regisztráló készülékén feszültség-alakváltozás ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) görbét kapjuk (a valóságban erőt és elmozdulást mérünk, amiből számoljuk a feszültség-alakváltozást), amelyen láthatók a  $\sigma_{0,2}$  és  $\sigma_m$  értékek. Az arányossági határértéket az említett diagramon nem lehet vagy igen nehéz kimutatni, viszont MMM módszer alkalmazásával ez a pont egyértelműen meghatározható.

Az MMM módszert először hőerőművek kazánjainak vizsgálatánál, később az erőművek többi eleménél, majd a gépiparban, a vegyiparban, acélszerkezeteken, vasúti berendezéseknél, a járműiparban és legfőképpen az olaj- és gáziparban alkalmazták. A következő példa (10. ábra) az olajiparban igen nagyszámban használt menetes fúrócsövek hibáinak gyors és egyszerű és megbízható vizsgálati módszerét mutatja be.





10. ábra: Olajipari menetes fúrócső MMM módszerrel történő vizsgálatának eredményei: a palástfelületen láthatóak a mágneses tér deriváltjának erővonalai, illetve a keménységmérési pontok (1-től 10-ig)

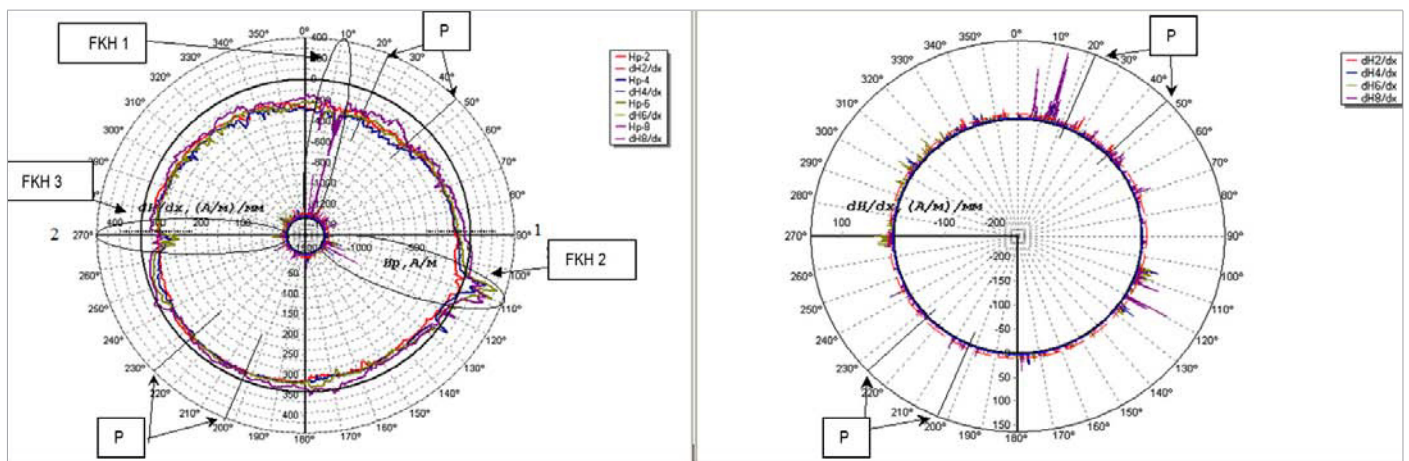


11. ábra: Hegesztett kőolajvezeték (D=1000x30mm) MMM vizsgálata

### 3.7 Az MMM módszer alkalmazása hegesztett kötések vizsgálatához

A hegesztési technológia már több mint 100 éve létezik, de az egyik legfontosabb tényezőt, ami a hegesztett kötések megbízhatóságát minősíti, azaz a maradó hegesztési feszültségeket, nem ellenőrzik, mivel hiányoznak azok a roncsolásmentes módszerek, amelyek képesek gyorsan megoldani ezt a feladatot. Az MMM módszer lehetővé teszi egyidejűleg elvégezni a hibakeresést és a maradó feszültségek vizsgálatát, 11. ábra.

Kőolajvezeték körvarratainak ellenőrzése MMM módszerrel a 12. ábrán látható.



12. ábra: Cső körvarrat vizsgálat MMM módszerrel: FKH1, FKH2, FKH3 feszültségkoncentrációs helyek, melyek a mágneses tér  $H_p$  és deriváltjának  $dH/dx$  anomáliáit mutatják; 1, 2 pontok a körvarrat induló és végkráterét jelzi; P pont a hosszvarrat és a keresztvarrat találkozási pontjai.

a. Magnetogram felvétel a hosszirányú varrat mentén;

b. Magnetogram felvétel a görbülés jobboldalán FKH1, FKH2, FKH3 – feszültségkoncentrációs helyek, melyek a mágneses tér  $H_p$  és gradienseének  $dH/dx$  anomáliáit (ugrásszerű változását) mutatják.

## 4. Érintkezés mentes magnetométeres diagnosztika

Az eddig leírtakban az úgynevezett kontakt, azaz érintkezéses magnetométeres eljárásról beszéltünk, ahol a mérőfejet az objektum felületéhez igen közel vezetik, persze tényleges érintkezés itt sincs. Létezik egy érintkezés mentes (non-kontakt) MMM módszer is [9].

Ezzel például a földbe fektetett, betemetett távvezetékek feszültségkoncentrációs helyeit lehet kimutatni a távvezeték feltárása nélkül. A módszer különbözik az intelligens csőgörényezéstől, ahol a meglévő repedéseket és falvastagság fogyásokat mutatják ki. Az MMM módszerrel a feszültségkoncentrációs helyeket, azaz a későbbi meghibásodások és folytonossági hiányok kiindulási helyeit is lokalizálni lehet. A vizsgálandó csövek felső palástja akár 2 méterrel is lehet a föld felszíne alatt. A párhuzamosan vagy keresztbe lefektetett földalatti csövekből származó indikáció kiszűrhető.

Az érintkezés mentes MMM vizsgálat (a föld gyenge mágneses mezejében) az érintkezéses vizsgálati módszer továbbfejlesztése érzékenyebb mágneses térmérő szondával. A módszer rohamos fejlesztés alatt áll, nagy szakmai érdeklődés mellett.

Még nem szabadalmaztatott és nem szabványosított módszer, lényegesen kevesebb publikáció áll rendelkezésre, mint a kontakt módszer esetében.

**A földbe fektetett** olaj- és gázvezetékek, vízvezetékek, városi hő ellátás feltárás nélküli gyors hiba meghatározására alkalmas magnetométeres diagnosztikai vizsgálat. Beépített üzemekben

pontos csőterv és villamos terv szükséges az MMM-es vizsgálatokhoz!

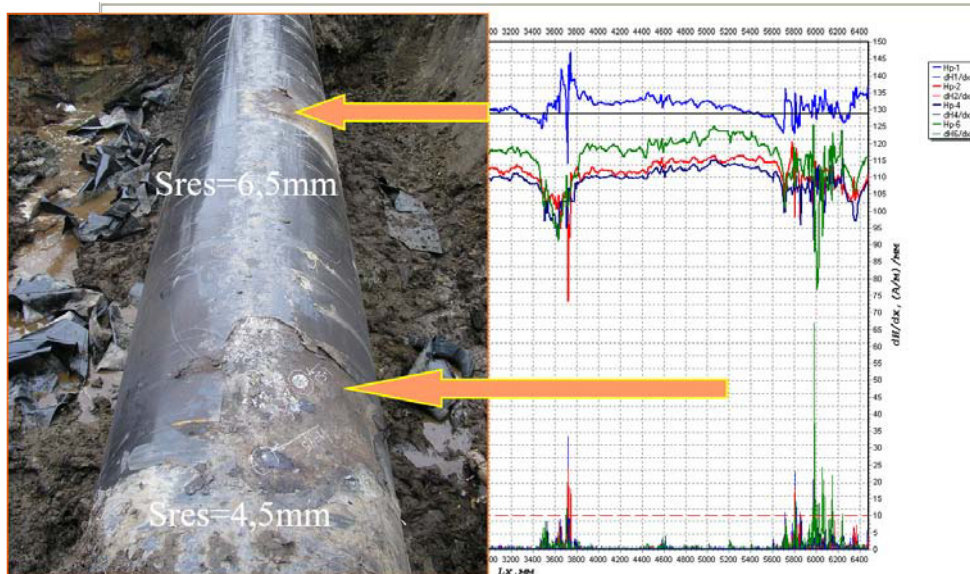
A szigetelésen keresztüli, megbontása nélküli vizsgálati eljárás fejlesztése és alkalmazása is évek óta sikeresen folyik.

Az 13. ábrán egy non-kontakt módszerrel kimutatott indikáció alapján feltárt csővezeték szakasz látható. A feltárt vezetéken megtalálhatók a korrózió okozta hibák.

## 5. Az MMM módszer, mint a károsodások korai detektálásának módszere

A mérnöki szerkezetek, berendezések biztonságos és gazdaságos üzemelésének a biztosítása a tervezési, üzemeltetési, karbantartási és ellenőrzési módszerek átértékelését igényli világszerte. A módszerek átértékelésének a folyamatához gyakran hozzájárul még a kényszerítő versenyhelyzet egyes iparágak között vagy éppen egyazon iparágon belül. A berendezések használójának, legyen az egy autó tulajdonosa vagy egy atomerőmű üzemeltetője vagy bármelyik más iparág képviselője, általában a következő elvárásai vannak:

- a lehető legnagyobb mértékben tudja kihasználni a berendezésében rejlő képességeket, azaz a használati tulajdonságokat,
- mindezt lehetőleg a leggazdaságosabb módon, azaz a legkisebb ráfordítással,
- a lehető legkevesebb tervezett, illetve váratlan használati idő kieséssel,
- a lehető legalacsonyabb karbantartási, javítási költség felhasználásával.



13. ábra: Érintkezés mentes magnetométeres diagnosztika. Egy (Ø1020×10 mm) olaj távvezeték szegmens vizsgálata a maximális feszültség koncentráció helyein (JSC Surgutneftegaz)

Ez több iparágban, de talán legjobban szembeöt-lő módon az energia iparban az „élettartam gaz-dálkodás (*life management, asset management*)” fogalommal leírható, szisztematikus tevékenység megjelenésében és egyre szélesebb körben való elterjedésében testesül meg. A világban üzemelő atomerőművek több, mint kétharmada már elérte vagy meghaladta az eredeti üzemeltetési engedély-ben meghatározott üzemidőt. Hasonló a helyzet sok ország, közöttük az Amerikai Egyesült Államok kőolaj- és földgázvezetékeinek a korával is; nagyobb hányaduk már 40-50 év közötti. Ezeket és más, első-sorban energia ipari létesítményeket a tulajdono-saik tovább kívánják használni. Ahogy növekszik az üzemidő, úgy növekszik a berendezések meghi-básodása bekövetkezésének a valószínűsége, ami egyenes arányban növeli a biztonsági kockázatot, de a hosszú távú üzemeltetés ugyanilyen szigorú gazdaságossági kérdés is. A meghosszabbodó kar-bantartási állásidők, a váratlan meghibásodások okozta termelés-kiesések, a fokozatosan növekvő javítási költségek mind-mind az említett átértékelé-si folyamatot alakító tényezők.

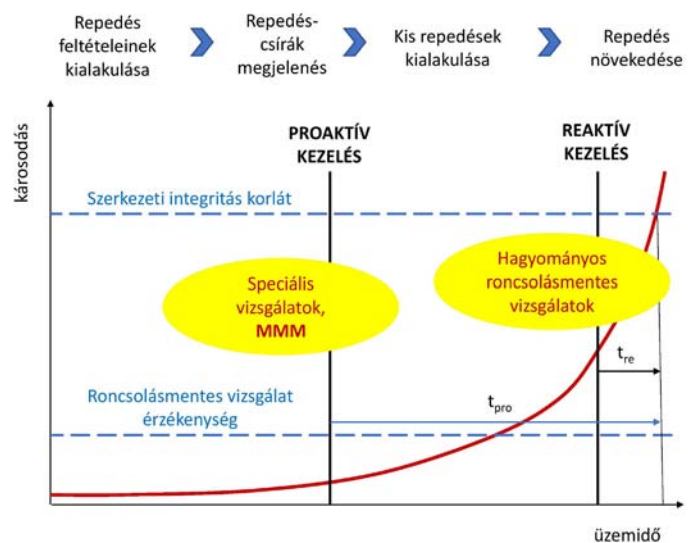
A berendezésekben az üzemi igénybevétel és a kör-nyezeti körülmények hatására jönnek létre és fej-lődnek az integritásukat veszélyeztető mértékűvé a károsodási folyamatok. A károsodási folyamatokat úgy lehet felfogni, mint az alkalmazott szerkezeti anyag választását ezekre a hatásokra (szokták ezeket összefoglalóan *stressor*-oknak nevezni). A tapasztalat azt mutatja, hogy a károsodási folyamatok igen összetett természetűek. Kialakulásukban szerepet játszanak az adott berendezés gyártási sajátossá-gai (metallurgia, alakítás, hőkezelés, felületkezelés), a mechanikai terhelés körülményei (statikus, dina-mikus, állandó, változó), a környezet (hőmérséklet, radioaktív sugárzás, korrozív ágensek) és sorolhat-nánk. Ezért követésük, magának a folyamatnak vagy a folyamat hatásának (repedés) a követése, azaz a detektálás sem egyszerű feladat.

Az előzőekben vázolt gazdasági folyamatok igé-nye hívta életre az elmúlt évtizedekben azt a gon-dolkodást, aminek a lényege a károsodások „pro-aktív” kezelése (*Proactive Materials Degradation Management, PMDM*). A PMDM jelentőségét elő-ször az amerikai nukleáris szabályozó hatóság ismerte fel, nyilván az atomerőműveket üzemelte-tőkkel teljes összhangban, és finanszírozott jelen-tős kutatási tevékenységet ezirányban [10][11]. Ha teljességében nézzük a PMDM koncepciót, akkor két jól elkülöníthető részét ismerhetjük fel.

Az egyik rész célja és lényege olyan intézkedések meghozatala, amelyek csökkentik vagy kizárják a berendezések vagy a berendezések kritikus részei-nek érzékenységét a károsodásokra (pl. anyag-választás, gyártási technológia optimalizálása). A másik rész, ami jelen cikk témájához kapcsolódik, célja és lényege a károsodások proaktív detektálása. Természetesen tartoznak ehhez a második részhez még további, az ellenőrzés, a roncsolásmentes vizsgálat, a diagnosztika optimalizálásával kapcsolatos feladatok is.

A PMDM lényege, hogy a hagyományos, azaz a „reaktív” viselkedést proaktív viselkedés váltja fel. Ennek a lényegét a 14. ábra mutatja be.

A reaktív kezelés esetében korlátozott idő ( $t_{re}$ ) áll rendelkezésre a károsodás (pl. egy folytonossági hiány) detektálását követően a szükséges intézke-dés, szélső esetben javítás vagy csere előkészítésére és végrehajtására a biztonságos üzemelés folytathatósága érdekében. Ez az időbeli korlát morális nyomást is eredményezhet, ami akár egy rosszul választott intézkedést is vonhat maga után. Amennyiben azonban a károsodás proaktív kezelési módját követjük, akkor elhárul az időbeli korlát ( $t_{pro} \gg t_{re}$ ), mert a detektálás még a károsodás kezdeti szakas-zában, az inkubációs időszak elején történik. A hagyományos és egyes esetekben még a korszerű roncsolásmentes vizsgálati eljárások és technikák a reaktív megoldást szolgálják. A károsodások proak-tív kezelésére speciális eljárások alkalmasak; nagy erőfeszítések folynak ezek kutatására és kifejlesz-tésére. Teljesen nyilvánvaló, hogy az MMM eljárás, amelyik a feszültségkoncentrációs zónák detektálá-sát végzi, egyike az ígéretes proaktív eljárásoknak.



14. ábra: A reaktív és proaktív viselkedés lényege

## 6. Az MMM hazai alkalmazása

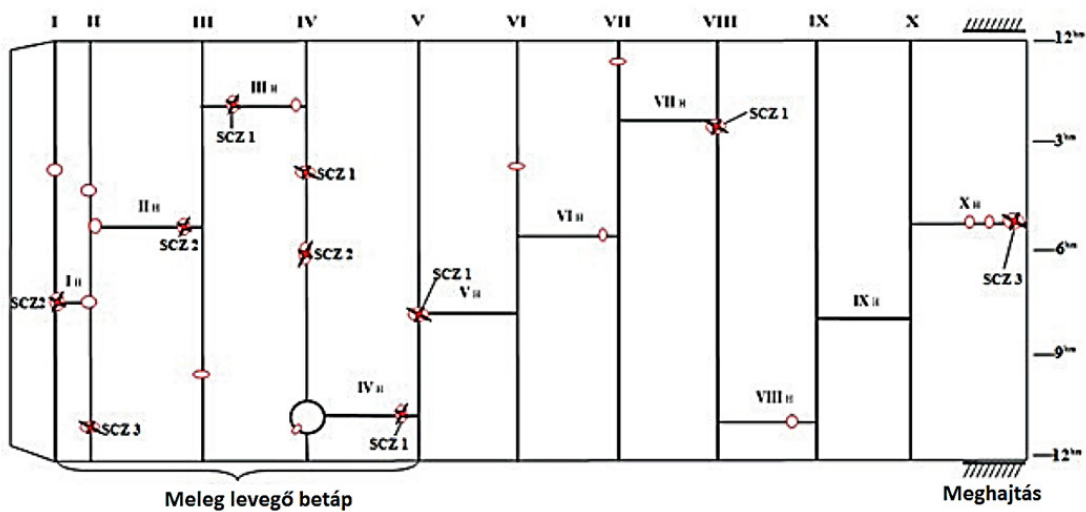
A következőkben konkrét vizsgálatokon keresztül láthatjuk az eljárás gyakorlati alkalmazását, azt, hogy szűrővizsgálatként miképpen funkcionál, milyen módon tudja a károsodásokat előre jelezni, valamint szigetelésen keresztül mi a vizsgálat menete.

### 6.1 Forgó koromszárító vizsgálata

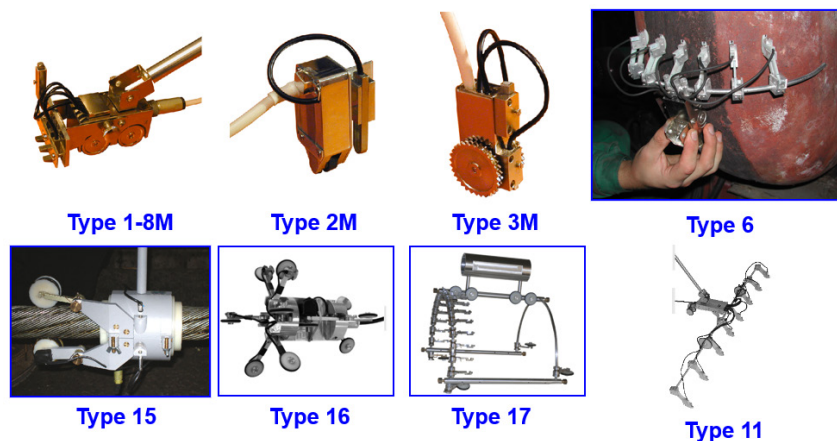
Az MMM eljárás egyik első hazai próbatétele 2012-ben volt, egy 2,5 m átmérőjű, 20 m hosszú, 35 tonna súlyú, mintegy 3 fordulat/perccel üzemelő koromszárító dob varratainak a belső vizsgálata. A berendezés dob része 316 és 317L anyagminőségű, 16-25 mm vastagságú lemezekből került összehegesztésre a 15. ábrán látható varratátérkép szerint. A varratoknál az elmúlt 25 év vizsgálata során jellemzőek volt a fáradásos repedések megjelenése. A berendezés vizsgálhatósága azonban igen korlátos: csak belülről hozzáférhető, erősen szennyezett felület nagymértékű lerakódásokkal, nem

mágnesezhető, nem röntgenozható. A hatalmas készülék egy speciális, kerámia paplanos szigeteléssel és lemezburkolattal van ellátva, amelyen belül 1300°C-os füstgáz áramlik. Ez magyarázza, hogy a hegesztési varratok csak belülről, a készülékbe (a dobba) beszállva vizsgálhatók.

A különböző vizsgálófejek (16. ábra) logikai felépítése hasonló. Minden vizsgálófej tartalmaz egy útmérő rendszert, valamint mérőszondákat, jellemzően olyanokat, amelyek a mágneses tér egy normális és egyik tangenciális alkotóját képesek mérni. A szondák beállítása a varrat méreteit követik, azaz a szondák a hőhatás övezetre, valamint a varratra vannak állítva. Mivel minden szonda külön csatornán méri a mágneses teret, melyet a feldolgozó egység külön-külön tárol, így a vizsgáló megtudja különböztetni a varrat bal-, illetve jobb széléről, valamint a hőhatásövezetről vagy a varratkoronáról érkező értékeket. A vizsgálófejet kézzel kell mozgatni, melynek a sebessége beállítás függő, de jellemzően 2-5 cm/s.



15. ábra: Koromszárító kiterített varratátérképe, jelölve a FKH helyekkel (az eredeti dokumentumban még SCZ-vel)



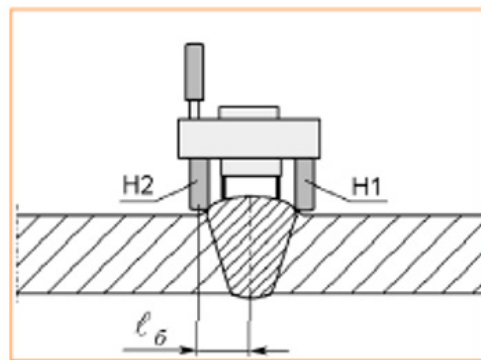
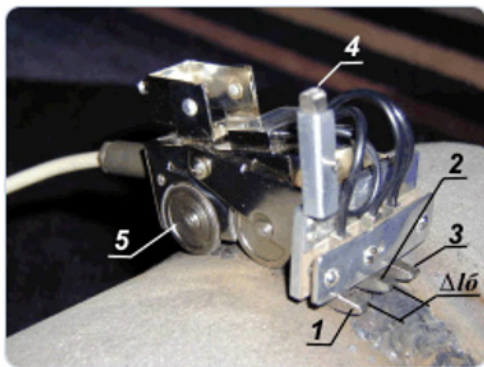
16. ábra: Főbb vizsgálófej konstrukciók

A tompavarratok vizsgálatára szolgáló, és így az egyik legtöbbet használt vizsgálófej az 1-es típusú, amelyet a varrat hossza mentén, a varrat fölött kell megvezetni a kötés teljes hossza mentén, 17. ábra. A beállítás során igazodni szükséges a varrat geometriai méreteihez. A tárgyi vizsgált berendezésen a varratok teljes hossza megközelítőleg 100 m, így a lassabb vizsgálati sebesség mellett is a vizsgálat nettó ideje 82 perc volt. Ez egy nettó érték, melyet növel a hozzáférhetőség, a felület bonyolultsága, a mérőrendszer adatelemzési és mentési ideje, valamint a vizsgáló tapasztalata és az egyéb vizsgálati körülmények.

A hosszabb varratok vizsgálata jellemzően két vizsgálót kíván a hatékonyabb munkavégzés érdekében. Az egyik személy a vizsgálófej megvezetéséért felel, míg a másik a mért értékeket figyeli és regisztrálja. A vizsgálóberendezés rögzíti és menti a mért mágneses teret az összes szonda tekintetében

milliméteres pontossággal, így az elmozdulás, vagyis a vizsgálófej által megtett út ( $X$  tengely –  $L$  [mm]) függvényében kapunk egy mágneses értéket ( $Y$  tengely –  $H$  [A/mm]), minden csatorna esetében külön szinkódolva. A helyszíni értékelések során a mágneses tér változásának gyorsaságából, azaz a mért érték gradienseinek nagyságából ( $Y$  tengely –  $dH/dX$  [A/m/mm]) lehet a lokális mágneses anomáliákat kijelölni. Ennek a hatékonyságához érdemes olyan adatrögzítő egységet alkalmazni, amellyel külön-külön lehet a csatornákat elemezni, továbbá a gradiensértékeket a belső szoftvere át tudja számolni, 18. ábra.

A tárgyi berendezésre visszatérve, a vizsgálatokat 2012-ben végeztük el először, amikor is a IV. számmal jelölt körvarrat esetében két jelentős anomália volt mérhető a varratvizsgálat során. Miután az MMM eljárással a berendezés minden varrata 100%-osan átvizsgálásra került, megtörtént azoknak



17. ábra: Varratvizsgáló fej



18. ábra: Adatrögzítők

a helyeknek a kijelölése, amelyeknél indokolt volt hagyományos roncsolásmentes anyagvizsgálatokat elvégezni, annak érdekében, hogy a tényleges és már más eljárásokkal is detektálható elváltozások feltárára kerülhessenek. Ebben az esetben PT vizsgálat került elvégzésére, amely egy közel 1000 mm hosszú lineáris indikációt tárt fel a varrat hőhatás-övezetében. A lineáris indikáció kezdő és végpontja megegyezett az MMM eljárás által a 19. ábrán feltárt két jelentős mágneses anomália helyével.

A talált hibát kiköszörüléssel és javítóhegesztéssel megszüntették. Egyéves üzemelést követően ismételt elvégzésre került az MMM vizsgálat, ugyanazon a berendezésen. Az elvégzett mérések tanúskodtak a homogén saját mágneses fluxus jelenlétéről, 20. ábra. A korábbi mágneses anomáliák a javítást követően már nem voltak érzékelhetők. A korábbi javítás kezdő és végpontjainak környékén elvégzésre kerültek egyéb kiegészítő, roncsolásmentes anyagvizsgálatok, de egy eljárás sem mutatott ki eltérést a vizsgált zónákban.

### 6.2 Vasúti vizsgálatok

Az elmúlt évek során több ízben is sikerült vasúti vizsgálatokba betekintést nyernünk és letesztelni az MMM eljárás hatékonyságát. A vasúti forgórészek, vasúti járművek kazánjain túl vasúti pályákat is vizsgálhattunk. Ebből a vasúti sínek vizsgálatának eredménye kerül bemutatásra a következőkben.

A vasúti sínek, egyik legnagyobb veszélyforrása az úgynevezett head-check hiba, mely a sín-törések leggyakoribb okozója. A hiba jellemzője, hogy nagyon sűrűn, nagyon apró repedések jelennek meg a sínszál vasúti kerékkel érintkező felületén.

Az MMM eljárással két ízben is sikerült bizonyítani a módszerben rejlő lehetőségeket. 2013-ban az M3-as metró – azóta már lecserélt és felújított – pályaszakaszán másfél kilométeres rész átvizsgálására kaptunk felkérést, valamint a MÁV tesztpályáján is végezhattunk vizsgálatokat. Az átvizsgálás során igen sok mágneses anomáliát érzékeltünk az átlagosnál nagyobb gradiens értékekkel. Többek között sínek hegesztéseinek a hibáit sikerült kimutatni a vizsgált szakaszon, valamint detektáltunk egy head-check hibát is. A head-check hiba mágneses képe a 21. ábrán látható. A 21. ábrán látható diagram jól mutatja a lila színű (a 8. számmal jelzett) érzékelő csatornát, ahol a szenzor a sín belső, kerékkel érintkező felületére volt pozicionálva. A 21. ábrán 8900 mm és 9900 mm-ek között magas gradiens értékek láthatók. Ezt a zónát

kijelöltük további vizsgálatokra. Az üzemeltető visszaigazolásként megküldve a vizsgálatok eredményét, head-check hibát diagnosztizált a jelölt területen.

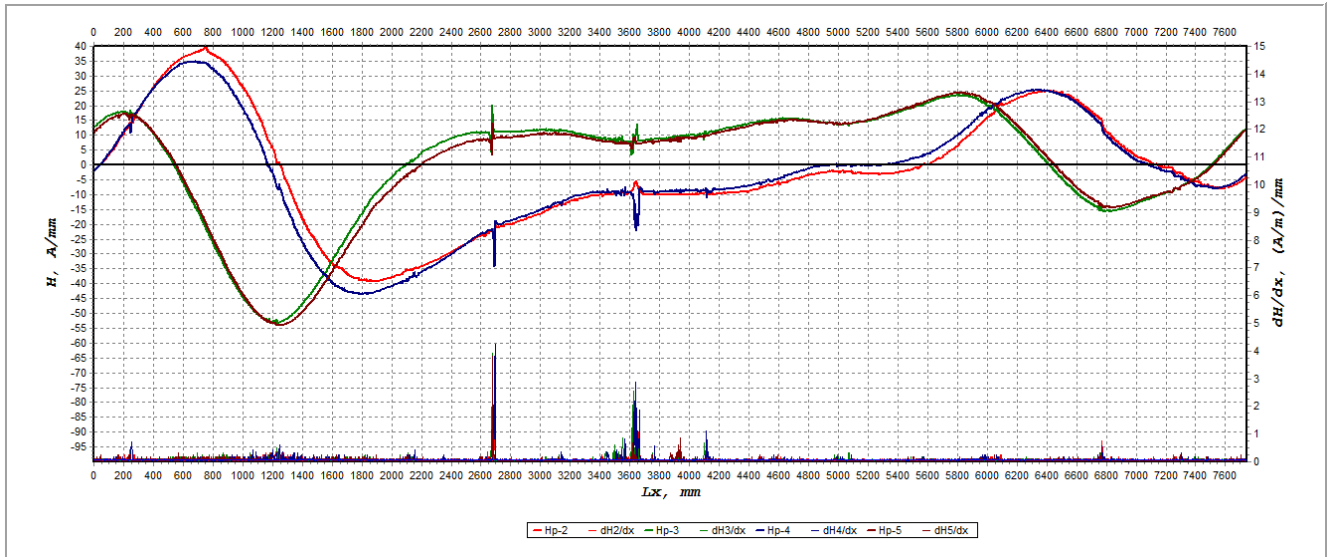
### 6.3 Vasúti sín hajlítást és törést követő mérése

A MÁV laboratóriumában, hajlítógép segítségével tudtuk tesztelni a meghibásodás előtti mágneses anomáliák megjelenését. A hajlítás tárgya egy normál, 1200 mm hosszú sín volt. A hajlítás megkezdése előtt a sín talp az 1200 mm hossz közepén keresztirányban bemetszésre került 3 mm mélységben, annak érdekében, hogy a törés biztosan bekövetkezzen.

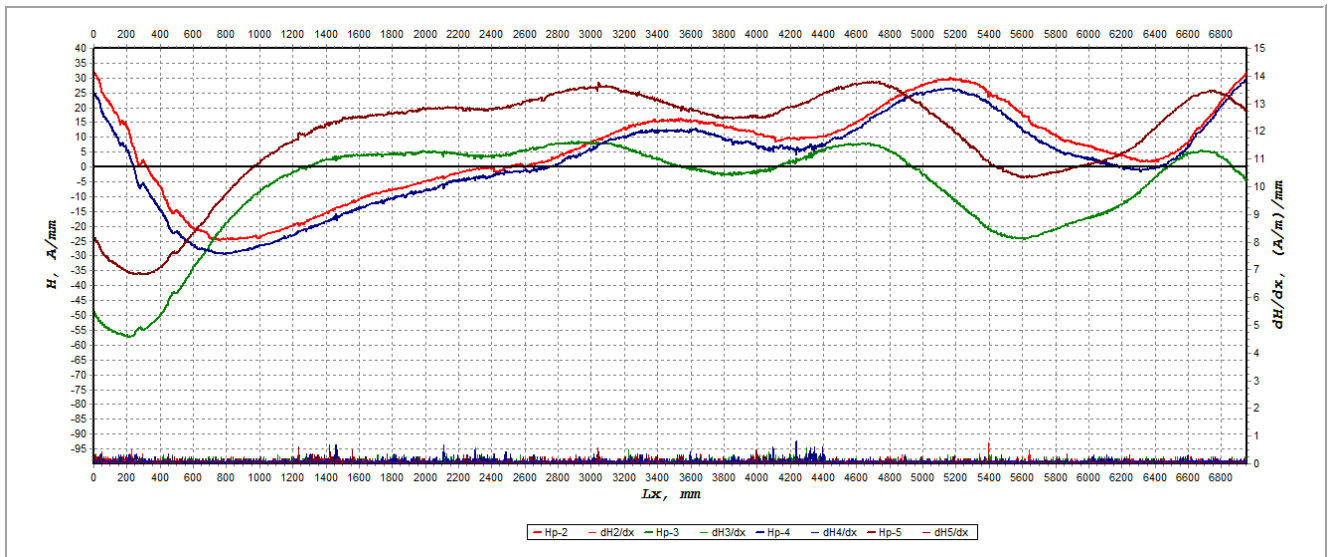
A sínt 100 kN-os lépcsőkben terheltük; annak közepén és minden egyes terhelés után MMM technológiával mértük a mágneses teret a sínfej felső részén. Amérések megegyező skálázással ellátott grafikonon kerültek bemutatásra. A szemléletesség kedvéért, csak a sín középső 400 mm-es szakaszával foglalkoztunk. A 0. állapot mérése során látható egy homogén, enyhén változó mágneses tér, viszont sem a gradiensben, sem pedig a mágneses térben, kiugró inhomogén értékek nem észlelhetők, lásd 22. ábra. Már a 200 kN-os terhelési szintet követően a középső szakasz 25 mm széles zónájában enyhe mágneses anomália volt tapasztalható a sín felezőpontjában. A közbenső mérések szignifikáns különbségeket nem mutattak, viszont a 600 kN terhelést követően elvégezve a mérést, a mágneses anomália 25 mm-ről kiszélesedett mintegy 50 mm-re, lásd 23. ábra.

A 700 kN terhelést követően elváltozást még nem lehetett látni a sínen, viszont a mért mágneses tér értéke tovább növekedett. Mind az anomália szélessége, mind pedig az értéke növekedett a korábbiakhoz képest. Ezt követően 760 kN erő mellett bekövetkezett a törés, lásd 24. ábra.

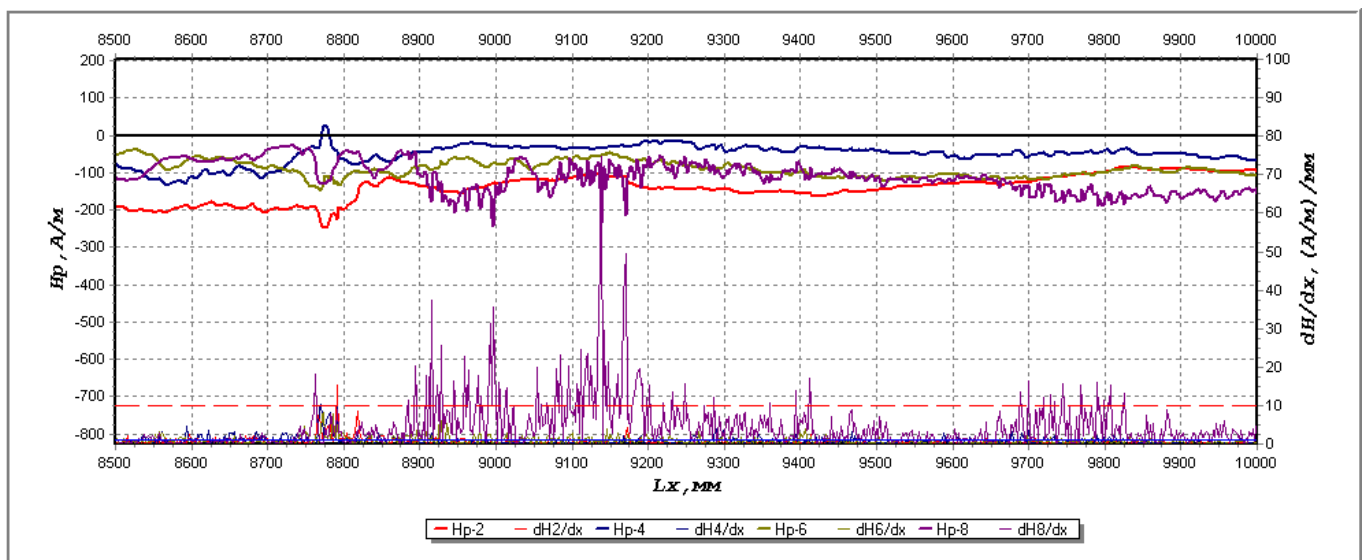
A törést követően egymás mellé tettük a két sín darabot és az immár szét tört, de összeillesztett sínen ugyanolyan skálázás mellett rögzítettük a mért mágneses teret, melynek a diagramja a 25. ábrán látható. A törést követően nagyságrendekkel nagyobb elváltozások alakultak ki a mágnesességben, amely egyértelműen a várt helyen volt mérhető, és az előjelek már a 200 kN-os terhelési szint mellett is megmutatkoztak. A laboratóriumi mérések keretei közt mérni tudtuk a tényleges makrósérülések előtti mágneses értékekben mérhető változásokat, úgy, hogy közben PT és UT eljárások nem mutattak ki indikációt a vizsgált sínen.



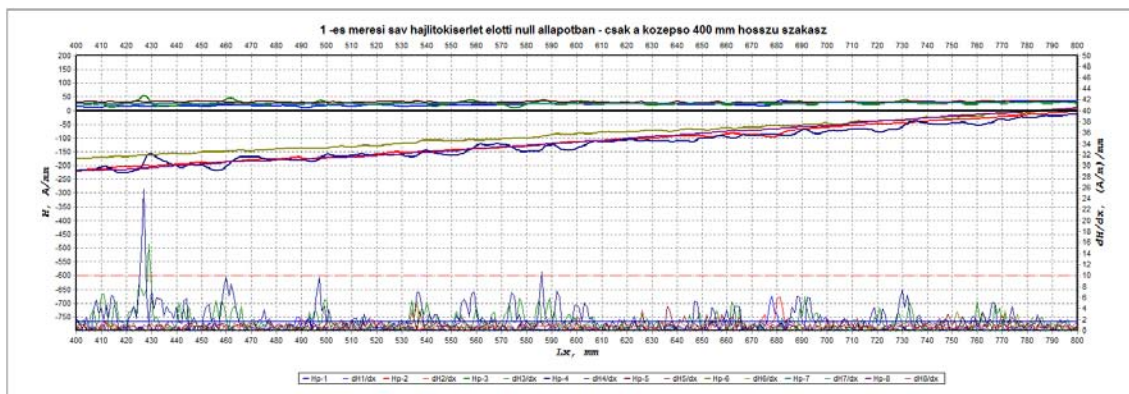
19. ábra: 2012-es vizsgálata a koromszáritó IV-es körvarratának



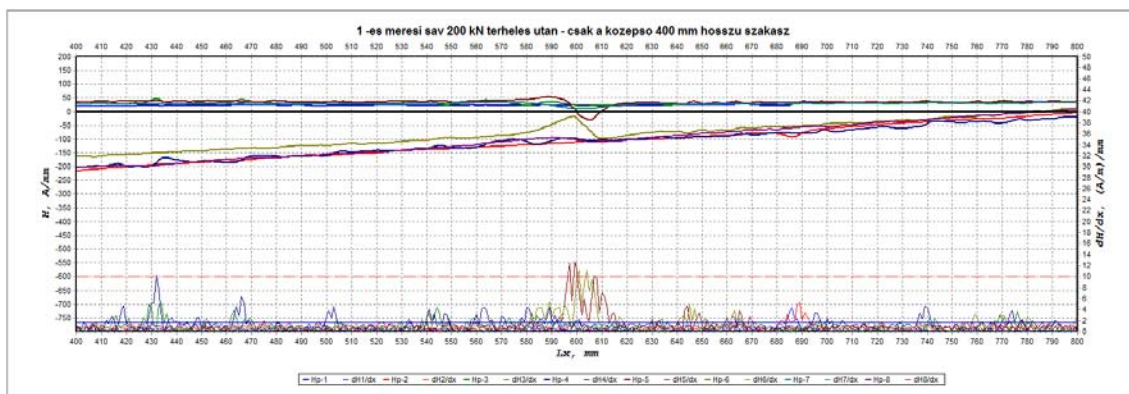
20. ábra: 2013-as vizsgálata a koromszáritó IV-es körvarratának



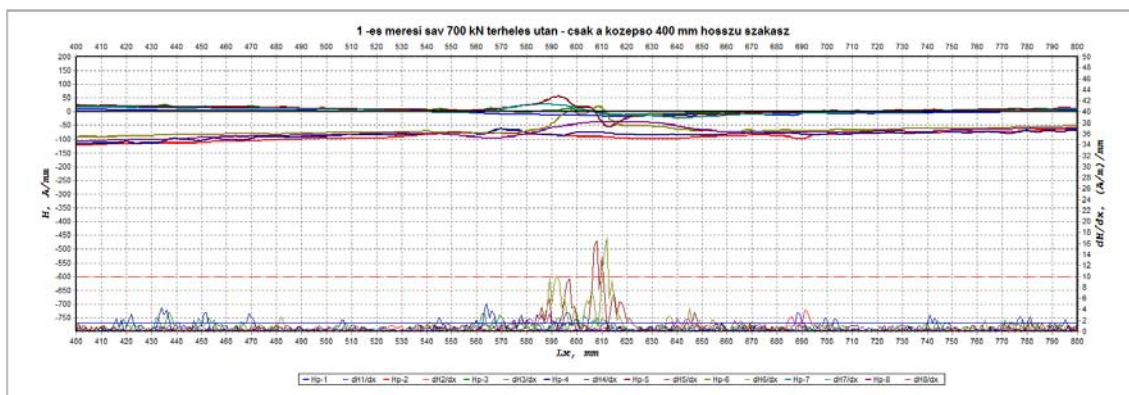
21. ábra: Head-check hiba magnetogramm képe



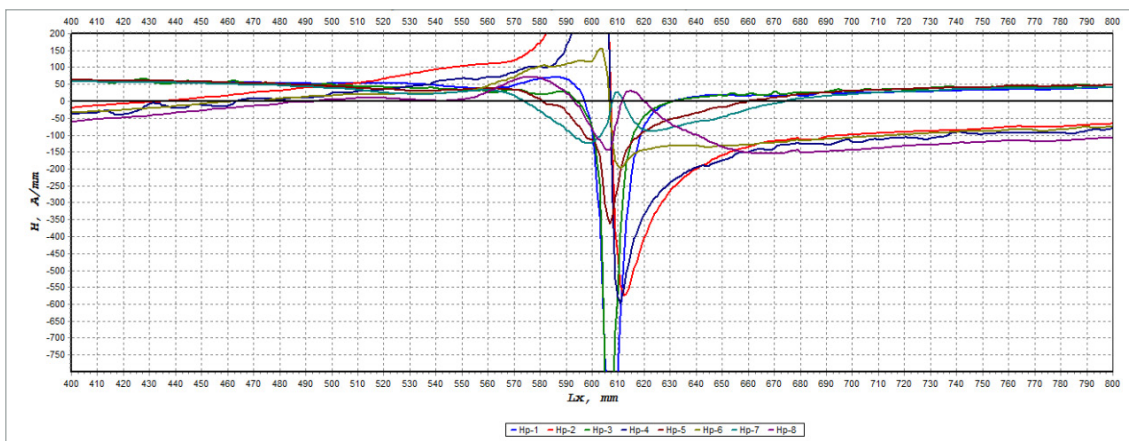
22. ábra: Sín hajlítás előtti null-állapota a középső részt érintve



23. ábra: 200 kN terhelés utáni állapot



24. ábra: 700 kN terhelés utáni állapot



25. ábra: Törés utáni állapot



#### 6.4 Nagynyomású reactorcső vizsgálata

Kis sűrűségű polietilén (LDPE) gyártóüzemben lévő tüzeset után, ún. autofrettage (magas belső maradó feszültséggel gyártott) eljárással készített hűtőköpennyel ellátott, 15 méter hosszú reactorcsövek vizsgálatát végeztük el. A vizsgálat célja a hibakeresésen túl az volt, hogy azonosításra kerüljenek azok a csövek, vagy csőszakaszok, amelyeknél a belső feszültségállapot módosult a tűz hatására. Referenciaértékek felvételéhez raktárban tárolt új csövek vizsgálata is megtörtént. A vizsgálati eredményeket az egyéni kiértékeléseken túl a nagyszámú vizsgálatokból elvégezhető statisztikai összehasonlítások is elősegítették.

Elemzésre kerültek a mért értékek mágneses komponensei a vizsgált irányok alapján, tehát külön a tangenciális és külön a normális irányú mágneses adatok, azok gradienseivel együtt.

A statisztikai elemzések által kiugró eredmények sem a régi, sem az új csövek esetében, sem pedig a tűz által érintett területeken nem kerültek megállapításra. Elemezve a csövekben mért értékeket, egyetlen azonosítható különbség volt felfedezhető a használt és az új csövek vonatkozásában: a használt csövek esetében a szórt mágneses tér alapingadozása jelentősebb volt, mint az új csövek esetében. Belenyújtva a mért értékekbe és egymás alá illesztve azokat azonos skálázással, érzékelhető volt a mágneses tér homogenitásbeli különbsége.

A 26. ábrán a felső kép mutatja a használt csövekre jellemző mágneses értéket, míg az alsó ábrán az új csövek a mágneses képe látható. Mivel a rögzített mágneses tér jellemzően arányban áll az anyagban lévő feszültségekkel, így látva és tapasztalva a mágnesesség homogenitását, levonható a következtetés, miszerint a belső feszültség az új csövekben

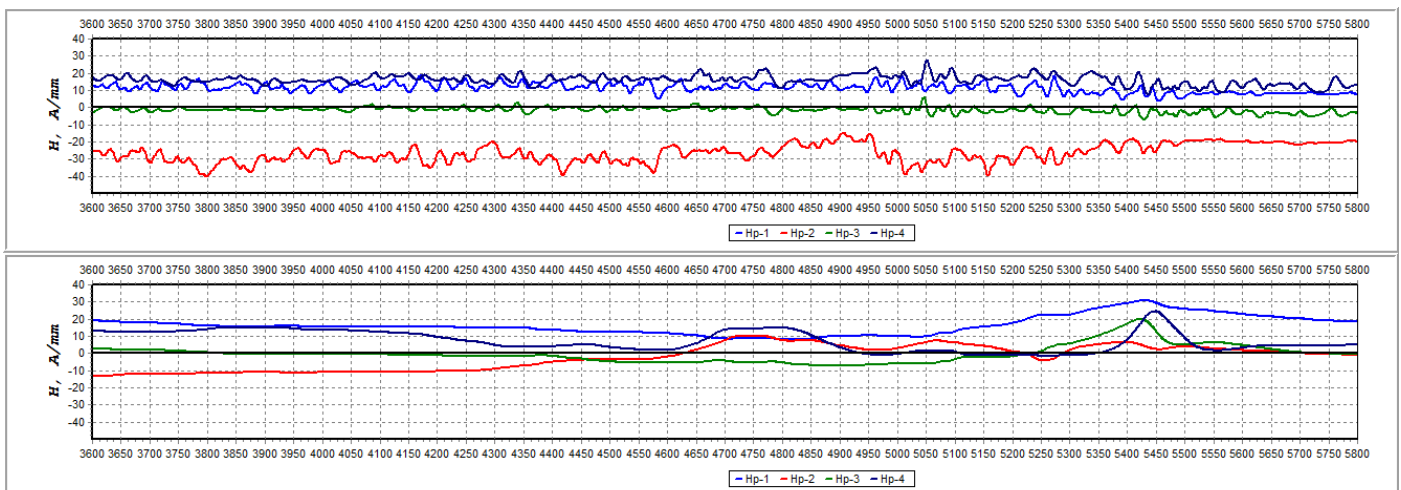
sokkal homogénebb állapotban van jelen, mint minden régi használt cső esetében, függetlenül a tűz hatásától. Így összességében az MMM eljárás megnyugtató állapotokat tárt fel; a tűz hatása nem befolyásolta a biztonságos üzemmenetet az autofrettage szempontjából.

#### 6.5 Szigetelt berendezések vizsgálata

Az MMM eljárás egyik nagy előnye, ami versenyképessé tudja tenni más eljárásokkal szemben, hogy alkalmas bizonyos hőszigeteléseken keresztül is mérni a mágneses teret. Ennek számos feltétele van, mint például a szigetelőanyag összetétele, szigetelés merevítőelemeinek anyaga, a szigetelés burkolatának árnyékoló hatása, fűtőelemek jelenléte a szigetelésben, stb. Egy olajipari szigetelt csővezeték falvastagság-fogyási probléma feltárásán keresztül ismertetjük a szigetelésen keresztül történő vizsgálat metodikáját. Kezdő lépésként a kijelölt berendezés külső felülete a szigetelésen keresztül 100%-os terjedelemben vizsgálat alá került MMM eljárással, 27. ábra.

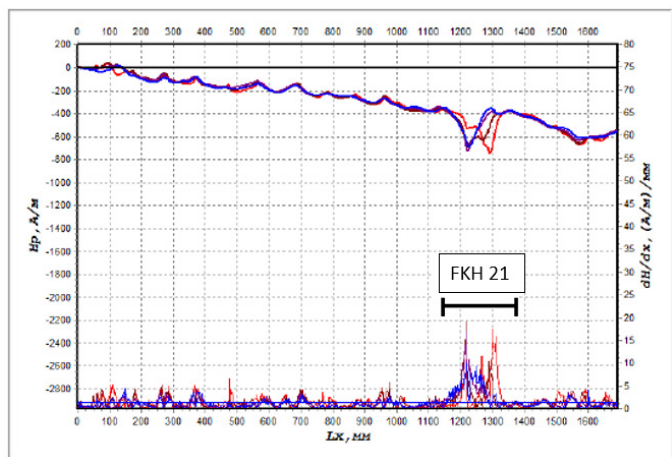


27. ábra: MMM vizsgálat szigetelésen keresztül



26. ábra: Felül a használt, míg alul az új csövek magnetogrambeli különbsége

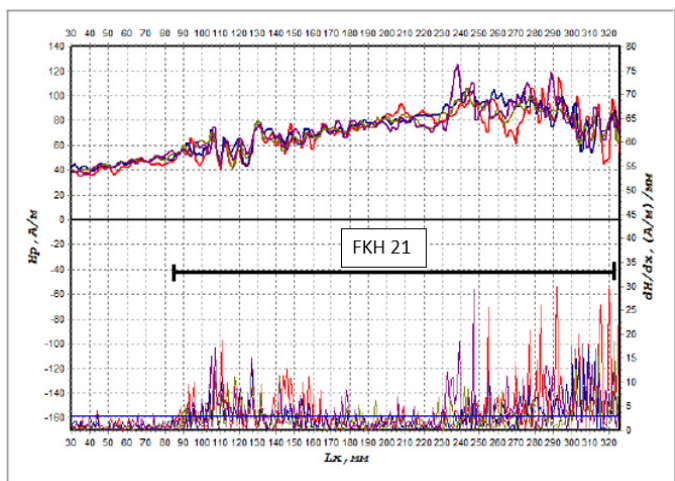
A mért értékeket a vizsgálók elemezték és kijelölték azokat a kritikus zónákat, ahol indokolt a szigetelés bontása. Ennél a konkrét esetenél az MMM mérés ingadozást jelzett a mágneses tér mérése közben a 28. ábrán látható módon és helyen. Ez egy hozzávetőleg 150 mm hosszú szakasz volt, ahol a vizsgált berendezés mind a 4 csatornája a normálistól eltérő értékeket rögzített.



28. ábra: Szigetelésen keresztül rögzített mágneses anomália

Az ehhez a zónához tartozó szigetelést megbontották és így közvetlenül, a felületről MMM eszközökkel ismét feltérképezésre került a saját mágneses tér, a mágneses anomáliák pontosabb lokalizálása érdekében. Közvetlenül a felületen elvégzett méréssel még pontosabb képet kaptunk az anomáliákról, kizárva a szigetelés okozta esetleges zavaró tényezőket. A szigetelés nélküli, közvetlenül a felületen rögzített mágneses képet a 29. ábra mutatja a gradiens értékekkel együtt.

Látható, hogy egy közel 200 mm-es zóna volt érintett. A mágneses anomália jellegétől függően



29. ábra: MMM vizsgálat eredménye közvetlenül a felületen

eldönthető, hogy milyen kiegészítő vizsgálatokat célszerű még elvégezni (falvastagságmérés, hibakeresés UT/PT eljárásokkal, vagy egyéb), hogy a tényleges anyaghiba megtalálható, vagy kizárható legyen. A nagyobb kiterjedésű és folytonos mágneses anomália okán falvastagságmérés lett elvégezve. Ellenőrző mérések alapján a csővezeték névleges falvastagságmérete 11,5 mm volt, azonban az MMM eljárás által meghatározott területen a falvastagság értéke igen ingadozó volt és a minimumok 6,5 mm körül mozogtak.

Ezzel a módszerrel a szigetelt berendezéseknél is növelhető a vizsgálatok hatékonysága, ugyanis csak a kritikusnak értékelt, illetve a referencia helyekhez szükséges szigetelések megbontása és helyreállítása válik szükségessé, amely jelentős idő- és költségmegtakarítást eredményezhet.

## 7. Nehézségek a hazai MMM alkalmazásban. Hogyan lépünk előre?

Az 1. sz. mellékletben közölt „MMM eljárás hazai bevezetésének főbb eseményei”-t áttekintve látható, hogy az MMM első nemzetközi bemutatkozása (1994 - Peking) után 11 év kellett ahhoz, hogy egy Magyarországon működő cég (2005 - TÜV Rheinland InterCert) elsőként komoly érdeklődést mutasson ezen vizsgálati technológia iránt. Rá egy évre, 2006-ban a Trans Lex Work Kft. vette fel a kapcsolatot az eljárást feltaláló Energodiagnosztika céggel, majd ismét egy év eltelte után 12 ország részvételével kiadásra került az első MMM ISO szabvány (ISO-24497-1-2-3:2007).

Vitathatatlan, hogy a hazai műszaki élet lassan mozgott ennek a zseniális roncsolásmentes vizsgálati eljárásnak az irányába. Ezt a megállapítást alátámasztja a következő 13 esztendő is. Hiába tört utat az MMM Európa különböző országaiban (jóval előtünk jár a környező országok közül Lengyelország és Csehország), vagy Kínában, Dél Amerikában (több, mint 3 000 km földalatti vezetékét vizsgáltak már meg, feltárás nélkül!) és a volt szovjet tagköztársaságokban, mi valahogyan számtalan akadályban ütköztünk itthon.

Jogosan vetődik fel a kérdés: mi lehet ennek az oka? Rövid, egyszerű válasz erre a kérdésre nem adható, de megpróbáljuk összefoglalni az elmúlt kb. 15 év tapasztalatait és mind ezt úgy, hogy senkit ne sértünk meg.

- Az MMM egy multidiszciplináris elmélet, megértése komoly előtanulmányokat igényel.

Deklarálja, hogy az anyag nem homogén és nem izotróp, aminek elfogadása a szilárdtestek mechanikájával foglalkozóknak nem igazán tetszik.

- Mérnökök generációja nőtt fel a törésmechanika alapjain, ami azt állítja, hogy a berendezésekben a meglévő repedés terhelés hatására történő viselkedését kell elemezni. Mivel az MMM az anyag mágneses indikációi alapján már a repedés kialakulása előtti állapotban jelzi az anomáliákat, ezzel a törésmechanika nem tud mit kezdeni. A berendezések megbízhatóságával foglalkozó döntéshozók ezen igen fontos jelzéseket nem értik, az egész biztonság-filozófiát újra kellene gondolni.
- Az MMM elméletét egy addig ismeretlen, nemzetközi marketingben kevésbé járatos orosz cég dolgozta ki. Ha ezt egy tőkeerős és anyagvizsgálatban elfogadott nyugati cég tette volna, a módszer elfogadottsága sokkal gyorsabban megtörtént volna.
- Az MMM egy szűrő (screening) módszer, amelyet kiegészítő vizsgálatokkal kell összekötni, ha a talált eltérés (hiba) jellemzőire is kíváncsiak vagyunk. Amennyiben szükséges, rendszerint az MMM szakember a helyszínen rögtön elvégzi a kiegészítő vizsgálatokat is.
- A hagyományos anyagvizsgálati oktatásnak az MMM nem része. A módszert csak kevés helyen lehet megismerni és elsajátítani.
- Nem elhanyagolható tény, hogy nem találtuk meg az állami támogatás megfelelő formáit. Pedig ez több irányú lehetne:
- **Honosítani kellene az MMM ISO szabványt**, de úgy, hogy a teljes szabvány megjelenhessen magyar nyelven, mert – sajnos – a magyar műszaki gárda angol nyelvtudása még nincs olyan szinten, hogy ebben a szabványban leírt bonyolult angol szakmai kifejezéseket megértse, majd alkalmazza. A szabvány honosítása azért is nagy jelentőségű lenne, hogy a magyar hatóságok is „közelebb kerüljenek” az MMM-hez. Komoly nehézséget jelent a jelenlegi honosítási rendszer, mert - bár az egész magyar iparnak fontos egy adott nemzetközi szabvány, de - a honosítást kezdeményező cégnek vagy személynek kell(ene) fedeznie a Magyar Szabványügyi Testület által meghatározott fordítási- és lektorálási díjat. Például az MMM szabványok esetében ez csaknem 1 millió Ft. Úgy gondoljuk, hogy a jelenleg alkalmazott eljárást

az Innovációs és Technológiai Minisztériumnak célszerű lenne felülvizsgálnia, különös tekintettel a magyar cégeket és szakmai szervezeteket a COVID-19 kapcsán ért hatalmas anyagi veszteségek, nehézségek miatt.

- A korszerű karbantartási- és állapotellenőrzési eljárások, ill. a roncsolásmentes anyagvizsgálatok hazai bevezetésére, azok K+F tevékenységére (mert az MMM mellett van számos egyéb, itthon alig ismert és alkalmazott korszerű eljárás) a szakemberek és diagnoszták (ki)képzésére, a műszerek és segédanyagok beszerzésére – szakmai szervezetek, pl.: a MAROVISZ és a Magyar Ipari Karbantartók Szervezete - bevonásával **pályázati lehetőségeket** kellene megteremteni.

Az oknyomozás következő állomása a cégvezetők hozzáállása. A cégvezetők általában a hatóságok jóváhagyásához kötik az MMM alkalmazhatóságát.

Azonban a hazai hatóságok vélhetően nem ismerik és nem fogadják el preferált vizsgálati módszernek.

- Pl. a csővezeték vizsgálatoknál szembesültünk azzal a ténnyel, hogy az MSZ EN 13780-5 Fémből készült ipari csővezetékek (5. Ellenőrzés és vizsgálat) szabványban a megadott vizsgálati eljárások között az MMM nem szerepel. A kör bezárult és ezt a – hibahelyeket, felületi tisztítások nélkül is, rendkívül gyorsan behatároló - roncsolásmentes vizsgálati eljárást nagyon sok esetben nem alkalmazhattuk. Persze pozitív példa is van, hiszen – többek között – a tiszaujvárosi Koromgyár vezetői a legelső perctől elfogadták az MMM vizsgálat lehetőségét és így a forgó koromszárítók belső terében egyetlen nap alatt mintegy 100 m hosszú hegesztési varrat repedésvizsgálata készülhetett el. Ugyanitt 10 MW teljesítményű gőzturbina forgórész lapátjainak sikeres MMM ellenőrzésére is sor került. Könnyen le lehetne vonni a konklúziót: Ja kérem! Ott a teljes menedzsment mérnök! Ami igaz is.
- Nagyon biztatóan kezdődő, de – MMM oldaláról – egy kicsit felemásan véget érő vizsgálat volt a tűzbe került ultranagynyomású csövek ellenőrzése. A kérdés az volt, hogy az autofrettage eljárással kezelt (vagyis 11 000 bar nyomással, a cső belső oldalán létrehozott tangenciális nyomófeszültséggel rendelkező speciális) csövekben nem történt-e „feszültségmentesítő hőkezelés”, vagyis a továbbiakban használhatóak-e, vagy cserélni kell azokat? Bár ún. „nulla állapot”-ban mért adataink nem voltak, a vizsgálati eredmények sok hasznos, megnyugtató információt

adtak. Azonban a rendelkezésre álló (egyébként nagyon szolid) költségkeret kimerülése nem tette lehetővé az időközben K+F szintre fejlődő – a termelő üzemet és a kkv-t (TLW Kft.) jóval meghaladó – munka befejezését. Pedig, ismereteink szerint, ilyen jellegű, teljes körű vizsgálatot még senki nem végzett, vagy legalább is nem publikált.

Tapasztalataink alapján nyugodt lelkiismerettel kijelenthető, hogy **egy-egy vállalatnál az MMM alkalmazása a különböző szintű vezetőkön múlik!**

Az előrelépés korábbi körülményeit és a jövő lehetőségeit vizsgálva a **MAROVISZ biztató támogatása 2014-es évektől sokat jelent, például MMM szakbizottság működik a szövetség keretében.**

Ettől kezdve már nem egy kis kkv és néhány személy ügye lett ez a vizsgálati eljárás hazánkban.

További bizakodásra ad okot, hogy a magyar egyetemek közül elsőként a Pannon Egyetemen 2015-től a BSc és MSc nappali, ill. levelező hallgatóknak az **MMM oktatása** folyamatos, a Debreceni Egyetem szakmérnök képzés keretében a 2020-as tanulmányi évben már fogja oktatni ezt a vizsgálati eljárást és a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar dékánjától is van határozott ígéret az oktatás beindítására.

E cikk készítői az MMM további fejlődését, hazai elterjedésének feltételeit abban látnák, ha a jelenleg érvényes vonatkozó magyar szabványok szisztematikus felülvizsgálata után az alkalmazható roncsolásmentes vizsgálati eljárások közé az MMM is bekerülne. Továbbá a magyar nagyvállalatok, ahol egy-egy éves gyár leállásnál, viszonylag rövid idő alatt, nagy volumenű (több száz nyomástartó edény, több ezer méter csővezeték és hegesztési varrat, több száz forgógép, stb.) szerkezeti-, repedés- és egyéb hibakereső vizsgálatra kerül sor (pl.: MOL Nyrt., MOL Petrolkémia, Hőerőművek, stb.) elfogadnák és alkalmaznák az MMM eljárást.

### 8. Az ICNDT SIG MMM, az MMM módszer nemzetközi szakmai szervezete

Az MMM módszer elmélete és gyakorlata az IIW, a Nemzetközi Roncsolásmentes Vizsgálati Bizottság (International Committee of Non-Destructive Testing, ICNDT), az Európai Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség (European Federation for Non-Destructive Testing, EFNDT) konferenciáin és számos más rendezvény keretében bemutatásra került.

A MAROVISZ égisze alatt 2015 januárjától működik MMM szakbizottság Magyarországon három vizsgáló-tanúsító cég kezdeményezésére.

Az ICNDT döntéshozó szerve 2016. január 29.-én javasolta egy MMM Specialist International Group (SIG) létrehozását, mely a módszer nemzetközi tudományos-technikai fejlesztését és a módszer elterjesztését tűzte ki célul. A MAROVISZ eleget tett az ICNDT felkérésének és ezáltal a MAROVISZ lett a szakcsoport házigazdája.

Az ICNDT MMM SIG csoport 13 ország részvételével először 2018. április 25.-én tartotta alakuló gyűlést a Második Nemzetközi MMM konferencián (2nd International Conference "Diagnostics of structures and components using metal magnetic memory method") Budapesten. Azóta éves munkaterve szerint tevékenykedik és tartja gyűléseit.

### 9. Összefoglalás

A ferromágneses anyagú testek felülete mentén már a spontán módon kialakuló domén-szerkezet eredményeként is létrejön szórt mágneses tér, miközben a test eredő mágnesezettsége nulla. Külső mechanikai feszültség hatására a doménszerkezet és – ha az anyag mágnesezett – a mágnesezettség módosul. A változás tükröződik a szórt térben is. A lokális szórt fluxus – akár folytonossági hiányokról, akár doménhatárokról vagy diszlokáció-csoportokat tartalmazó tartományról van szó – értelmezhető úgy, hogy ezeken a helyeken kis mágneses dipólusok vannak valamilyen felület menti és mélységi eloszlásban. A lokális szórt fluxusra mindig érvényes az, hogy az indukció felületre merőleges (normális)  $H_n$  komponense valahol a kérdéses tartomány fölött előjelet vált, és ugyanott a  $dH_n(x)/dx$  derivált maximális értéket vesz fel. A maradó belső feszültséggel rendelkező anyagok mágneses szerkezete eltér a feszültségmentesített anyagokétól [6].

Elméleti megfontolások és kísérleti tapasztalatok alapján az alábbi következtetésekre juthatunk:

- Az MMM módszer az egyik legújabb anyagvizsgálati módszer. Elméleti és gyakorlati háttere folyamatosan bővül a nemzetközi szabványhátter létrehozása és rendszeres felülvizsgálata, a műszaki-tudományos kísérletek, a matematikai modellezés és az ezekből született publikációk, valamint a nemzetközi konferenciákon elhangzott prezentációk hatására.
- Az MMM passzív, az anyagot inhomogénnek és anizotrópnak tekintő feszültség- és hibakereső módszer, amely a ferromágneses fémszerkezetek

felszíne mentén lévő szórt mágneses fluxushoz kötődő indikációk mérésén alapul.

- Az MMM óriási gyakorlati előnyökkel rendelkezik. Amellett, hogy egy gyors ellenőrzési diagnosztikai módszer, nemcsak a hibák helyeit képes meghatározni, hanem arra is információt ad, hogy később hol lesz a hiba. Különösen a ciklikusan ellenőrzött, veszélyes ipari létesítmények (pl.: nyomástartó edények, veszélyes töltőtartályok) ellenőrzése során fontos ezeket a helyeket előre ismerni, amikor – 5 vagy 10 évvel később – a vizsgálati tervek készülnek. A jelentős előnyök közé kell sorolni, hogy nem szükséges felülettisztítás, ill. fémtiszta felület, valamint segédenergia alkalmazása, továbbá az MMM módszer bizonyítottan hatékony a földalatti, vagy szigetelt vezetékek megbontás nélküli diagnosztikájára terén is.
- A mért indikációkból mennyiségi következtetés nehezen vonható le, illetve csak megfelelő kalibráció vagy más módszerekkel történő kiegészítő vizsgálat után. Így az MMM egy nagyszerű screening módszernek is tekinthető, mely a létező anyagszerkezeti hiányosságokon kívül a szerkezetben kialakult feszültséggyűjtő helyeket is detektálja. A feszültséggyűjtő helyek a továbbiakban repedések, korrózió, illetve egyéb károsodások kiindulási pontja. Az MMM jól használható hegesztett szerkezetek vizsgálatához is.
- Az utóbbi időben az MMM nemzetközi kutatásai a fémes anyagok mágneses és mechanikai tulajdonságainak kapcsolatára irányulnak. Ha megfelelően kialakított modell alkalmazásával, a fémszerkezetek felületén mért mágneses indikáció alapján, a szerkezeti elemei mechanikai tulajdonságainak gyors meghatározása elérhető lesz, akkor ez átütő eredményt hozhat a módszer alkalmazásában.
- Az MMM eljárás összhangban van és kiszolgálja a károsodások korai detektálása (PMDM) koncepciót, így helye lesz az ipari létesítmények élettartam gazdálkodás/üzemidő hosszabbítás tevékenységében.
- Sajnálatos módon az MMM hazai alkalmazása erősen lemarad a környező országok gyakorlatától, – amint erre a cikkben rámutattunk – sok tényezőre vezethető vissza.

## **Irodalomjegyzék**

- [1] ISO 24497-1:2020 Non-destructive testing, Metal magnetic memory-, Part1: Vocabulary and general requirements
- [2] ISO 24497-1:2020 Non-destructive testing, Metal magnetic memory-, Part2: Inspection of welded joints
- [3] A. A. Dubov Metal Magnetic Memory Method. History of Origin and Development. Moscow: FSUE "Izvestiya" Publishing House UD P RF, 2011-256p.
- [4] A.A.Dubov, V.T.Vlaszov: Physical basic of the Metal Magnetic Memory Moscow, 2004, 2019. Moszkva
- [5] A.A.Dubov, V.T.Vlaszov: Physical Theory of the "Strain-Failure" process Part I., PartII., Moscow, 2013
- [6] Skopál István: Az MMM vizsgálat alapjai. A MAROVISZ RAKK 2015 évi konferencián elhangzott előadása
- [7] An. A. Dubov, Al. A. Dubov, P. Ladanyi. Tensile testing of steel specimens using the metal magnetic memory method // Digest of papers of the 7th International Conference „Diagnostics of equipment and structures using the metal magnetic memory”. Moscow: Energodiagnostika Co. Ltd., 2013. 89 p.
- [8] An. A. Dubov, Al. A. Dubov, P. Ladanyi, A. Yu. Marstenkov, Tensile testing of steel specimens using the metal magnetic memory method // The Gas Safety Journal, Oct. 2016, pp. 42-47, the paper was presented online at the IIW Annual Assembly (July 17, 2020)
- [9] A. Dubov, S. Kolokolnikov, Assessment of the Materialstate of Oil and Gas Pipelines based on Metal Magnetic Memory Method, Welding in the World, 2012, vol 54
- [10] Expert Panel Report on Proactive Materials Degradation Assessment, NUREG/CR-6923, U.S.NRC, Washington DC, 2006
- [11] Bond, L. J., Moving Beyond Nondestructive Examination to Proactive Management of Materials Degradation, J. Pressure Vessel Technology, February 2012, Vol 134.
- [12] TLW KFT. M12087 Tread 2B szárító MMM vizsgálati jelentése
- [13] TLW KFT. M13044 Tread 2B szárító MMM vizsgálati jelentése
- [14] TLW KFT. M12158, M13010 - Vizsgálati jelentés a 36 db reaktor cső vizsgálatáról
- [15] TLW KFT. M13022 BKV M3 metró sínvizsgálati jelentés
- [16] TLW KFT. M13112 MOL Pilot Project – Fejlett inspekción módszerek MMM vizsgálati jelentése

### 1. Melléklet: MMM eljárás hazai bevezetésének főbb eseményei

- 1994: A Nemzetközi Hegesztési Intézet 47. Pekin-gi éves közgyűlésén A.A. Dubov professzor először mutatja be az MMM eljárás alapjait (No.11-628-94).
- 2002-2013: A Nemzetközi Hegesztési Intézet V. és XI. Bizottságában Dubov professzor és munkatársai évente rendszeresen előadást tartanak az MMM eljárás alapjairól és gyakorlatáról, ahol a magyar hegesztési és anyagvizsgáló (Dr. Ladányi Péter, Prof. Dr. Trampus Péter) delegátusok megismerkednek az eljárás alapjaival. Az 1994-től-2019-ig 50 IIV dokumentumot fogadtak el ebben a témában a szerzőtől.
- 2005: A TÜV Rheinland InterCert (Budapest) műszaki-tudományos területen komoly érdeklődést mutat az eljárás iránt és tárgyalásokat kezdeményez az Energodiagnostika céggel.
- 2006: TLW Kft. kapcsolatfelvétele az Energodiagnostika Co.-val.
- 2007: A TÜV Rheinland Létesítménytechnikai Konferenciáján A. Dubov professzor először tart előadást Magyarországon.
- 2007: Az MMM ISO szabványok megjelenése 12 ország részvételével, melynek létrejöttéhez a magyar IIV delegátus is többéves munkával hozzájárul:
- ISO-24497-1:2007 Non-destructive testing - Metal magnetic memory – Part 1: Vocabulary
  - ISO-24497-2:2007 Non-destructive testing - Metal magnetic memory – Part 2: General requirements
  - ISO-24497-3:2007 Non-destructive testing - Metal magnetic memory – Part 3: Inspection of welded joints.
- 2010: A Paksi Atomerőmű Zrt. 4 főt beiskoláz MMM 1. szintű képzésre és vásárol egy készüléket.
- 2011: A TÜV Rheinland InterCert műszaki-tudományos szerződést köt az Energodiagnostika céggel és ez évben átfogó validálási programot hajt végre Budapesten melynek eredményeit hazai és nemzetközi fórumokon is bemutatja. Sor kerül az első magyar TÜV szakember kiképzésére és berendezés vásárlására.
- 2012: Első MMM publikáció megjelenése magyar társszerző részvételével:  
An. Dubov, Al. Dubov, Ladányi P.: Acél próbatetek szakítóvizsgálata MMM módszerrel (Tensile testing of steel specimens using the metal magnetic memory method // Digest of papers of the 7th International Conference „Diagnostics of equipment and structures using the metal magnetic memory”. Moscow: Energodiagnostika Co. Ltd., 2013. 89 p.)
2012. február: Moszkva – A TLW Kft. első MMM szakember 1. szintű kiképzése Moszkvában az Energodiagnostika akkreditált Laboratóriumában.
2012. december: BKV M3 metróvonal sínvizsgálat headcheck hibák és hegesztési hibák feltárására.
- 2012 – 2013: TVK Nyrt. LDPE 2 üzemében ultra nagy (3500 bar) nyomású – tűzbe került – reaktor csövek vizsgálata.
2013. február: Moszkva – A második és harmadik TLW Kft. MMM szakember 1. szintű kiképzése Moszkvában az Energodiagnostika akkreditált Laboratóriumában.
2013. június: Columbian Tiszai Koromgyártó Kft. TREAD 2B forgószáritó MMM vizsgálata.
2013. december: „MOL Nyrt. Dunai Finomító Korróziós Felzárkóztatási Projekt Fejlett Inspekciós Módszerekkel” – Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. szervezésében. Az MMM eljárás is bemutatásra került 3 berendezésen, közöttük egy föld alatti csővezetéken.
2014. március: Prága – 2 fő TLW Kft. MMM szakember kiképzése az Energodiagnostika Prágába kihelyezett oktató központjában.
2014. május 8.: I. Közép-kelet európai Metal Magnetic Memory Konferencia megszervezése Budapesten a MAROVISZ égisze alatt. A magyar előadások:
- Dr. Ladányi Péter: Introduction of MMM method in Hungary and its validation, TÜV senior expert, Interproject Europe
  - Lajos Magyar, Kristóf Dandé: Application of MMM method in the Hungarian oil and gas industry, and railway inspection, Trans Lex Work, Hungary
2014. május 15.: AGREEMENT on cooperation between Energodiagnostika co. Ltd. (Moscow, Russia) and Trans Lex Work Kft. (Budapest, Hungary).
2015. január 16: Budapest – Megalakul a MAROVISZ égisze alatt a Metal Magnetic Memory (MMM) Szakbizottság.
- 2015: MAROVISZ rendezésű RAKK Konferencia
- Dr. Ladányi Péter: Bevezetés a „Metal Magnetic Memory” (MMM) eljárás elméletébe
  - Dr. Skopál István: Az MMM vizsgálat alapjai
  - Dandé Kristóf: A fémek mágneses memória módszerének magyarországi alkalmazása a

- vegy-, olaj-, és energiaipar területén
- 2015: Karbantartási menedzser képzés elindult a PANNON EGYETEMEN. Megkezdődik Magyarországon az MMM oktatása.
2015. november: MÁV teszt pályán headcheck hiba vizsgálata.
2015. december: MÁV KfV Kft. -nél sínhajlítás és sín-törés mérése MMM eljárással.
2016. május 19-20: Budapest – Az EFNDT égisze alatt MAROVISZ rendezésben sor kerül – The 1st International Conference on diagnostics of structures and components using Metal Magnetic Memory method konferenciára. Magyar előadások:
- Dr. Ladányi Péter, Méhész István: Validation procedures for the industry, Detection of Residual Stress using the Metal Magnetic Memory Method (Hungary)
  - Dandé Kristóf: The Hungarian application of the metal magnetic memory method in the territory of chemical-, oil- and energy industry (Hungary)
  - Joó Gyula: Industrial application of MMM inspection method on high pressure reactor tubes (Hungary)
2016. május: kapcsolatfelvétel a Nemzeti Közlekedési Hatóság Útügyi, Vasúti és Hajózási Hivatal Vasúti Főosztályával.
- 2016: Balatoni Ankét:
- Dr. Ladányi Péter, Prof. Dr. Tarpus Péter: Új módszer a szerkezeti károsodás korai kimutatásához. Osztályozási javaslat
2017. április: Prága – 2 fő TLW Kft. MMM szakembernél a 2. vizsgáló szint meghosszabbítása az Energodiagnostika Prágába kihelyezett oktató központjában.
- 2017: Az ICNDT égisze alatt, a MAROVISZ-szal, mint házigazdával, létrejön a Nemzetközi MMM Specialist International Group az MMM tevékenység világméretű támogatására.
- 2017: MAROVISZ RAKK Konferencia:
- Dr. Ladányi Péter: Metal Magnetic Memory (MMM) eljárás alkalmazása az ipari káresek korai megelőzésében
2018. április 24-25: Budapest – AZ EFNDT égisze alatta MAROVISZ megrendezi a 2. Nemzetközi MMM Konferenciát (The 2nd International Conference “Diagnostics of structures and components using the metal magnetic memory method”).
- 2018: ISO 24497-1 -2 -3 szabványok felülvizsgálata magyar részvétellel. Szakcsoport gyűlés Budapesten a MAROVISZ szervezésében.
2018. április: BME IST által rendezett kazánbiztosi továbbképzés keretei között az MMM eljárás alkalmazhatóságának bemutatása.
2018. május: TLW Kft. Anyagvizsgáló és Diagnosztikai Laboratóriuma megszerzi az akkreditált státuszt többek között – Európában 2. laboratóriumként – az MMM vizsgálatra vonatkozóan is.
2019. április-május: Pannon Egyetem BSc képzés – Üzemfenntartás tantárgy keretében az MMM oktatása.
2019. október-november: Pannon Egyetem MSc képzés – Üzemfenntartás tantárgy keretében az MMM oktatása.
- 2019: Prága: The 3d International Conference “Diagnostics of structures and components using the metal magnetic memory method”,
- A. A. Dubov, P. Ladanyi, P. Trampus: Detection of local stress concentration zones in engineering components. The missing link in the quality system
- 2019: Prága ICNDT MMM SIG Group Konferencia megszervezése három magyar szakember részvételével és előadásával.
- 2019: Balatoni Ankét:
- Dr. Ladányi Péter: Nyomástartó rendszerek, műszaki berendezések feszültség-alakváltozási állapot ellenőrzésének új energetikai koncepciója
2020. május-június: Pannon Egyetem MSc képzés – Esettanulmányok tantárgy.
- 2020: Az új MMM ISO szabvány közreadása, amelynek végleges kidolgozásához 7 ország, köztük Magyarország szakemberei járultak hozzá:
- ISO 24497-1:2020 Non-destructive testing - Metal magnetic memory – Part 1: Vocabulary and general requirements
  - ISO 24497-2:2020 Non-destructive testing - Metal magnetic memory – Part 2: Inspection of welded joints
2020. július: BME IST által rendezett kazánbiztosi továbbképzés keretei között az MMM eljárás alkalmazhatóságának bemutatása.
- 2020 szeptember 21.: A Magyar Szabványügyi Testület JELÖLŐLAP-ot bocsájtott ki az angol nyelvű szabványok és szabvány jellegű dokumentumok magyar nyelvű kiadásához, amelyben kezdeményeztük az ISO 24497-1 és 2:2020 MMM szabványok magyar nyelvű fordítását.