



Roncsolásmentes vizsgálat és szerkezeti megbízhatóság

A roncsolásmentes vizsgálat egyre nagyobb hangsúllyal járul hozzá a mérnöki szerkezetek hosszú távú megbízhatóságához. Ezt felismerve a Nemzetközi Roncsolásmentes Vizsgálati Akadémia (Academia NDT International), a roncsolásmentes vizsgálat akadémiai szférában betöltött szerepéért felelősséget vállaló szervezet, egy új diszciplína bevezetését javasolja, amely egyúttal egy új – a korábbiaknál szélesebb profilú – mérnöki tevékenységet is kijelöl. Ez a „roncsolásmentes vizsgálat és megbízhatóság (NDT integrity engineering)”.

Háttér

A Nemzetközi Roncsolásmentes Vizsgálati Akadémia (www.academia-ndt.org) alapítói a másfél évtizeddel ezelőtti alapításkor a következő célokat fogalmazták meg:

- a roncsolásmentes vizsgálat (Non-Destructive Testing, NDT) – az utóbbi időben egyre inkább roncsolásmentes értékelés (Non-Destructive Evaluation, NDE) – területén folyó tudományos kutatás és fejlesztés elősegítése, továbbá az eredmények alkalmazásának ösztönzése a világ egyetemeken, kutatóintézeiben és egyéb intézményeiben;
- tudósok és technológusok közötti hálózat létrehozása és működtetése az alaptudományok és a roncsolásmentes vizsgálati eljárások, valamint a műszaki megoldások területén az utóbbiak fejlesztése céljából;
- hozzájárulás egy olyan tudásbázis kifejlesztéséhez, amely az NDT elméletét, filozófiáját és gyakorlatát használja minőségi

anyagok, folyamatok és szolgáltatások biztosítására – mindezzel az emberiség javát szolgálva;

- a hatóságok, a kormányok és a civil szervezetek figyelmének az NDT előnyeire és fontosságára irányítása, ezzel is hozzájárulva katasztrófák és balesetek megakadályozásához.

Összegezve: az Akadémia küldetése abban áll, hogy összegyűjti azokat a tudósokat, akik képesek hidat építeni a műszaki és tudományterületek, valamint az NDT/NDE közé, és ehhez vagy elegendő tapasztalattal bírnak az adott területen, vagy tapasztalatukat felhasználva képesek know-how beintegrálására az NDT/NDE-be.

Napjainkra az NDE – mint szakma és mint tudományterület – csatlakozott a csúcstechnológiák legfontosabb területeit integráló családdhoz. Ez a család a STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics), azaz a tudomány, a technológia, a mérnökség és a matematika családja. Az NDE – más szak-, illetve tudományterületekhez hasonlóan – szükségesnek tartja, hogy megújítsa és hozzáillessze képzési programját a legkorszerűbb ismereteket és

megfelelő gyakorlatot tükröző igényekhez. Ezt a szükségszerűséget ismerte fel az Akadémia, és dolgozta ki egy új mérnöki diszciplína alapjait, és javasolja annak minél szélesebb körű bevezetését.

Az eredeti angol elnevezésből kiindulva (NDT integrity engineering) nevezzük ezt „roncsolásmentes vizsgálat és megbízhatóság”-nak, ami az anyagok és szerkezetek integritását, illetve megbízhatóságát szolgálja az adott célnak legjobban megfelelő vizsgálati eljárás és technika alkalmazása révén.

A diszciplína magába foglalja az anyagtudományt, a törésmechanikát és más tudományokat, ily módon biztosítja, illetve növeli a mérnöki szerkezetek megbízható működését.

Az Akadémia által javasolt koncepciót valósította meg – eddig két alkalommal (2020-ban és 2022-ben) befejezett, két szemeszterből álló szakmérnöki tanfolyam keretében – a Debreceni Egyetem Műszaki Kara, együttműködve a Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetséggel, valamint az ESIS (European Structural Integrity Society) magyar tagozatával. A debreceni posztgraduális kurzusok nemcsak Magyarországon, hanem nemzetközi kitekintésben is újnak minősülnek.

A multidiszciplináris megközelítés szükségessége

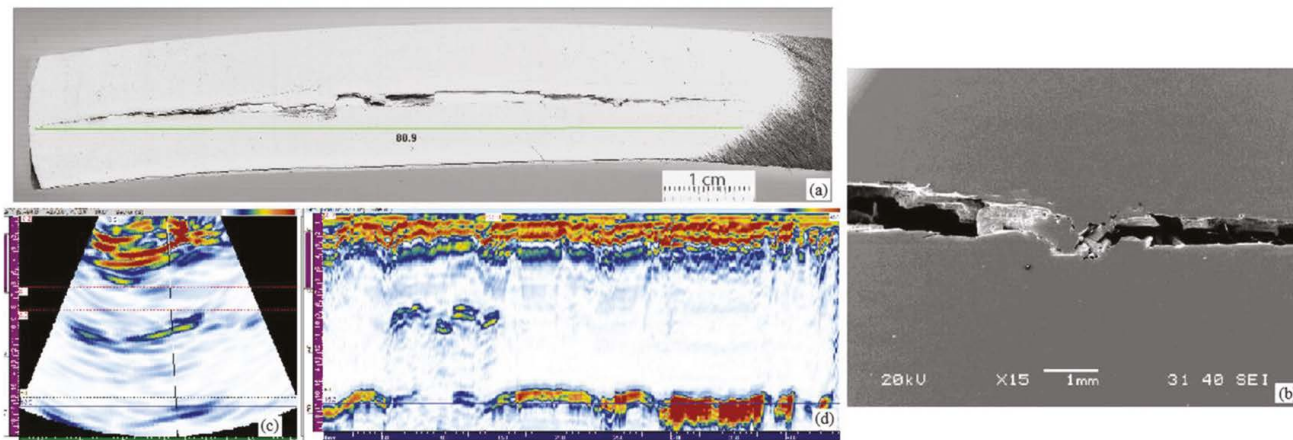
Gazdasági szempontok

Korunkban a gazdaság egyik alapvető jellemzője a mérnöki szerkezetek teljesítőképességének növelése, ami nyilvánvalóan fokozza kihasználtságukat. A megnövekedett teljesítőképesség gyakran maga után vonja a szerkezetek súlyának akár jelentős csökkentését is. Ez az általános irányzat értelemszerűen növeli az NDT-vel szemben támasztott követelményeket, de emellett új vizsgálati követelményeket is megfogalmaz. Az új követelmények az új szerkezeti anyagok alkalmazásából, például könnyűfém ötvözetek, kompozitok és kerámiák, valamint az új gyártástechnológiák megjelenéséből, például additív gyártás, adódnak.

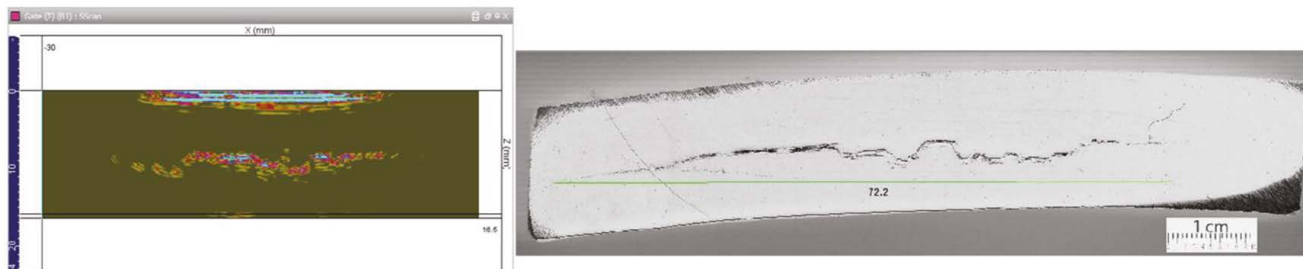
A nagy értékű és egyúttal nagy kockázatú technológiát megvalósító létesítmények öregednek, de szinte mindenütt a világon igény van hosszú távú üzemben tartásukra a tervező által figyelembe vett üzemidőn túl. A szerkezeti anyagok öregedése a berendezések és szerkezetek biztonsági tartalékának folyamatos felélésével jár. Például az USA olajfinomítóinak és a kapcsolódó csővezetéknek az átlagos kora meghaladja a 40 évet, ám szükség van maximális teljesítményen történő folyamatos üzemükre. Egy másik példa az atomenergia békés célú alkalmazása. A világban üzemelő atomreaktorok 65 százalékának kora meghaladja a 30 évet, és ez az időtartam közelíti, vagy egyes esetekben már

1. ábra. A korszerű – ma már hagyományosnak tekinthető –, fázisvezérelt ultrahangos oldalnézeti képen a repedés profilja csak részlegesen jeleníthető meg. A fejlettebb megjelenítést biztosító Total Focusing Method (TFM) alkalmazása esetén a repedés profilja valóságghűen kirajzolódik.

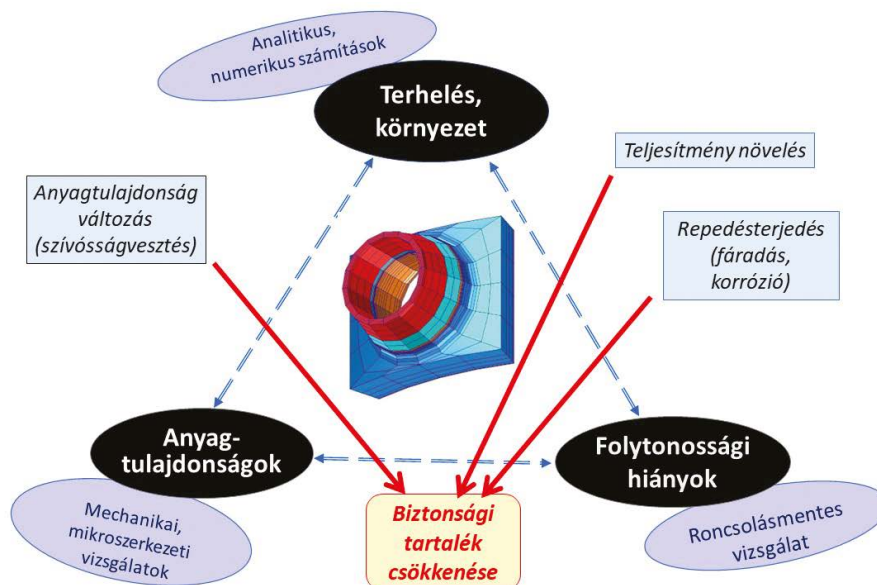
Fázisvezérelt UT képe és a repedés makro-/mikrocsiszolata



FMC/TFM alkalmazása



el is érte a tervező által figyelembe vett és a hatóság által engedélyezett üzemidőt. A következmény az, hogy az atomerőművek üzemidő-hosszabbítása világszerte gyakorlattá vált, amit a Paksi Atomerőmű tulajdonosa is követ. Az üzemidő-hosszabbítás alapvető feltétele, hogy az erőmű berendezéseinek szerkezeti integritását a meghosszabbított üzemidő végéig biztosítani kell. A példaként hozott mindkét iparágban nyilvánvaló az NDE szerepének és a berendezésmegbízhatóság integrált értékelése szükségességének a felértékelődése.



2 ábra. A szerkezeti megbízhatóság általános sémája

Biztonsági szempontok

A gazdasági szempontok megjelenésével egy időben megfigyelhető a világ biztonsággal kapcsolatos felfogásában bekövetkező folyamatos változás. A társadalom által elviselhető kockázat csökkenése a hatóságokat a biztonsági szabályok fokozatos szigorítására kényszeríti. Ez a változás is előtérbe helyezi az NDE szerepét. A hatósági gyakorlatban egyre inkább előtérbe kerül a kockázati szempontokat is figyelembe vevő megközelítés. Ez a változás az NDE-t a nagyobb kockázatú berendezések vizsgálata irányába pozicionálja, ami akár a vizsgálatok időtartamának a csökkenéséhez is vezethet. A nagy kockázatú berendezések vizsgálatához a hagyományos eljárások és technikák azonban többnyire már nem, vagy csak korlátozottan alkalmasak. Következésképpen a kockázati szempontokat figyelembe vevő ellenőrzési programok új vizsgálati követelményekkel jelennek meg. Erre példa az 1. ábra, amelyen egy hidrogén okozta repedés ultrahangos vizsgálatának egy korszerű és egy legfejlettebb technikával kapott eredménye közti különbséget mutatja.

A döntéshozatali folyamat igénye

Tapasztalat igazolja, hogy az üzemelőberendezések időszakos ellenőrzésekor, amennyiben a vizsgáló az adott berendezésre érvényes elfogadási szintet meghaladó folytonossági hiányt (például repedést) detektál, az üzemelésért felelős vezető rutinszerűen megkérdezi az álláspontját a berendezés további üzemeltethetőségéről. Ennek egyszerű oka van: a vezetőnek nincs megfelelő ismerete egy repedés vagy repedésszerű hiány terhelés hatására történő viselkedéséről és a repedés terjedésének a törvényszerűségéről. A kérdést jellemzően még egy felkészült és nagy gyakorlattal rendelkező roncsolásmentes vizsgáló sem tudja megválaszolni. A példa azt támasztja alá, hogy „szakadék” van az eredményért felelős vizsgáló és a további biztonságos üzemeltetésről hozandó döntésért felelős vezető között. A probléma megoldásához vezető utat a „roncsolásmentes vizsgálat és megbízhatóság” mérnök mulidiszciplináris tudása mutatja.

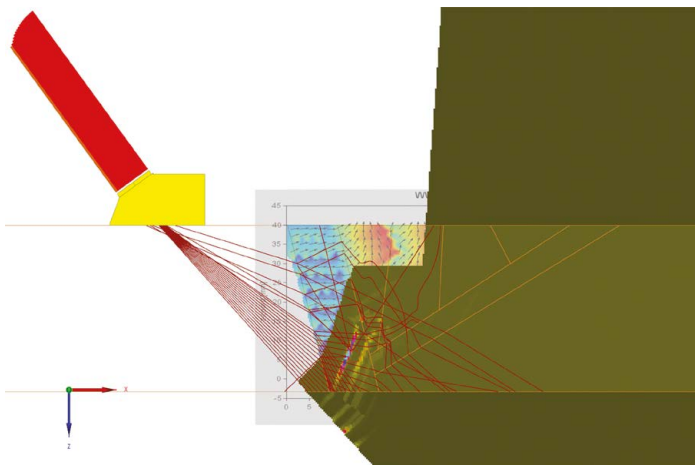
A szerkezeti megbízhatóság elemzése

A szerkezeti megbízhatóság vagy szerkezeti integritás mérnöki ismereteket integráló tudományterület, amely azzal foglalkozik, hogy egy adott berendezés vagy szerkezet milyen feltételek mellett üzemeltethető biztonságosan, mennyi a műszakilag lehetséges üzemideje, és ez milyen módon érhető el.

Az utóbbi szempontok alapján az élettartam-gazdálkodás (life management, asset management) részének is tekinthető. A szerkezeti megbízhatóság elemzése a szilárdság, illetve a töréssel szembeni ellenállás elemzését jelenti. Az elemzés elvégzéséhez ismerni kell a terhelés és a környezeti körülmények jellemzőit, az anyagtulajdonságokat, valamint az anyagban található folytonossági hiányok jellemzőit. A felsoroltak dinamikus kölcsönhatásban vannak egymással a berendezés vagy szerkezet használata során, azaz változnak (például terhelésváltozás, szívósságvesztés, repedésnövekedés), amit az elemzés során nem szabad figyelmen kívül hagyni. A szerkezeti megbízhatóság elemzésének alapvető eszköze a törésmechanika, de legalább ugyanilyen súlyal szerepel benne az anyagtudomány, azaz az öregedési hatások mechanizmusának az ismerete. Ezt a dinamikus összefüggérendszer mutatja a 2. ábra.

A „roncsolásmentes vizsgálat és megbízhatóság” mérnök általános kompetenciái

Az általános mérnöki kompetenciák megértéséhez érdemes a kérdést tágabb összefüggéseiben vizsgálni. Egy társadalom szükség-



3. ábra. Átmeneti hegesztési varrat fázisvezérelt ultrahangos vizsgálatának szimulációja, kiegészítve a varratfém szemcseorientációjával.

leteit a különböző adók formájában beszedett javai újraelosztása és új javak előállítása biztosítja; utóbbi alapját a tudományos eredmények képezik. A mérnök a társadalom műszaki-gazdasági szegmensében végzi a munkáját, ami ezért közvetlenül vagy közvetetten befolyásolja a költségeket és a hasznot. A mérnök munkája emellett mindig összefügg a biztonsággal, akár a tervezés, akár a gyártás vagy akár az üzemeltetés területén végzi. Ahhoz, hogy a biztonság megkövetelt szintjét biztosítsuk, be kell fektetni, azaz (i) laboratóriumi vizsgálatok útján meg kell határozni a szükséges anyagtulajdonságokat; (ii) ki kell zárni az eltéréseket, amihez NDE-t kell végezni, és (iii) számításokkal meg kell határozni az üzemi terhelés és környezet hatására a berendezésben vagy szerkezetben ébredő mezőket (például hőmérséklet, alakváltozás, feszültség). Itt utalunk a szerkezeti megbízhatóság sémáján bemutatott elemekre.

A megbízhatóság elemzése során, a költségek számítása mellett, mindig ismerni kell az üzemeltetés kockázatát, ami nem más, mint a meghibásodás bekövetkezése (százalékban kifejezett) valószínűségének és a következmény súlyossága (pénzben kifejezett) értékének a szorzata. A vázolt „biztonság, megbízhatóság, kockázat” koncepció mindig az adott kor műszaki színvonalán valósul meg. Ma a műszaki színvonalnak összhangban kell lennie az Ipar 4.0 eredményeivel, ami esetünkben az NDE 4.0 megvalósulását, vagy legalább a megvalósulás irányába mutató szándékot jelenti, mivel a nano- és mikroelektronika és az információs technológia drámai sebességű fejlődése határozza meg a megbízhatóság mindhárom elemét.

Az előzőeket figyelembe véve, a „roncsolásmentes vizsgálat és megbízhatóság” mérnök általános kompetenciája a következőket kell hogy magába foglalja:

- A mérnöki tevékenység multidiszciplináris természetének és összefüggésrendszerének biztos ismerete.
- Általános képesség mérnöki feladatok megoldására az általa művelt szakterületen, alkalmazva a szükséges analitikus, numerikus vagy kísérleti eljárásokat.
- Képesség szabványok, kódok és biztonsági szabályzatok alkalmazására.
- Alapvető gazdasági, szervezési és vezetési ismeretek.
- Képesség a mérnöki eredmények hatékony kommunikációjára úgy a mérnöki társadalmon belül, mint azon kívül.

- Képesség hatékony együttműködésre nemzeti és/vagy nemzetközi környezetben, akár egyénként, akár egy team tagjaként.

Ez az összetett szakértelem képes hozzájárulni az NDE, valamint – szélesebb összefüggésben – a szerkezeti megbízhatóságelemzés minőségi láncának tökéletesítéséhez. Mindez a nagy kockázatú berendezések, szerkezetek és komplex létesítmények biztonságos és megbízható üzemelésének a feltétele.

A mérnök speciális helyzetét talán az is érzékelteti, hogy a diszciplína elnevezése mind a roncsolásmentes vizsgálat, mind a megbízhatóság kifejezést tartalmazza. Elsősorban az NDE-eljárásokra fókuszál, de emellett rendelkezik azzal a tudással, ami a berendezések és szerkezetek megbízhatósággal kapcsolatos döntéseinek a támogatásához szükséges.

Értenie és beszélnie kell az „NDE teljes nyelvét”, aminek feltétele az eljárások fizikai alapjának a biztos ismerete, és ideális esetben gyakorlati tapasztalat néhány bevett vizsgálóeljárás alkalmazásában.

A roncsolásmentes vizsgálatokkal kapcsolatos kompetenciák

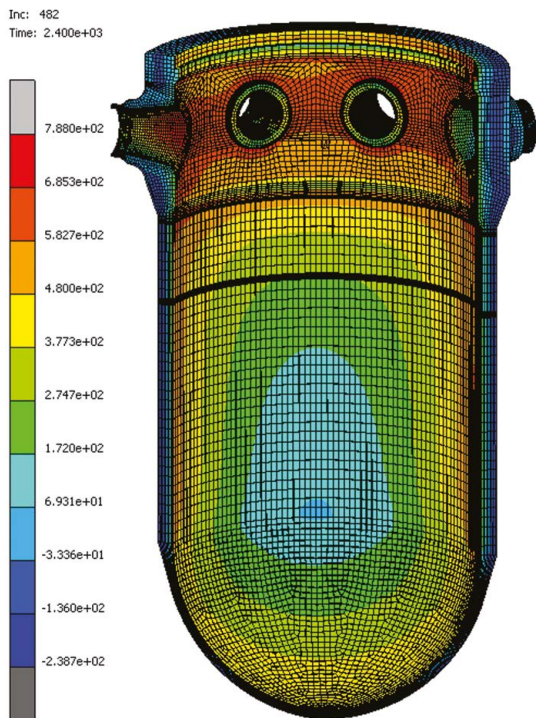
Az NDE területén szükséges legfontosabb kompetenciák a következők:

- A bevett vizsgálóeljárások fizikai alapjának, valamint az eljárások lehetőségeinek és korlátainak ismerete.
- Az NDT–NDE evolúciós folyamat ismerete, beleértve az anyagkárosodás korai észlelésének jelenlegi tendenciáját.
- A szerkezetek állapotának monitorozási stratégiái és technikái (Structural Health Monitoring, SHM).
- Az információs technológia, valamint a mikro- és nanotechnológia fejlődésének hatása az NDE-re és a műszaki diagnosztikára, azaz a korszerű eljárások, mint például a fázisvezérelt ultrahangos vizsgálat (Phased Array UT) és a digitális radiográfia, valamint a roncsolásmentes vizsgálat numerikus szimulációja. A 3. ábra egy ultrahangos vizsgálat szimulációját mutatja, amelyen feltüntetették a hangnyaláb haladására hatással lévő szemcseorientációt is.
- Az NDE globalizálódásának megértése és a globalizáció hatásainak ismerete és alkalmazása.

Terhelés- és környezetvonatkozású kompetenciák

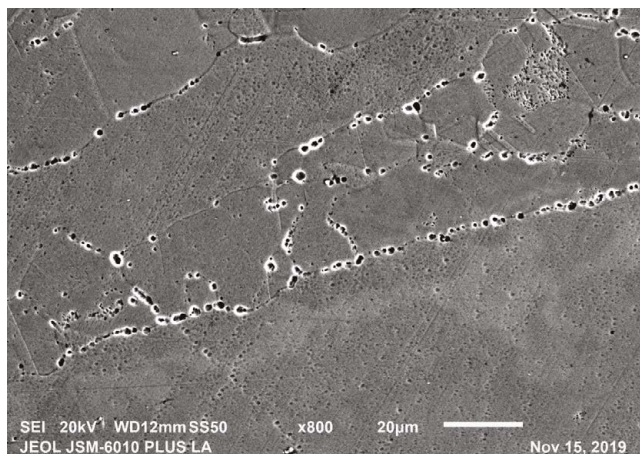
A terhelés és a környezeti hatás vonatkozásában a legfontosabb kompetenciák a következők:

- A berendezés használata időszakában – a normál üzemállapot, továbbá az attól eltérő állapotok következményeként – a berendezésben ébredő fizikai mezők (mechanikai, termikus, mágneses, elektromos, elektromágneses) ismerete.



4. ábra. Feszültségeloszlás egy reaktortartály falában üzemzavari terhelés hatására, végelelemes számítás eredménye.

- A fizikai mezők meghatározására használt analitikus és numerikus eljárások alapjainak az ismerete. A 4. ábra példaként mutat egy végelelemes számítási eredményt. Látható rajta egy nyomottvizes reaktortartály falában egy üzemzavari állapotban ébredő feszültségeloszlás.
- A feszültség/alakváltozás állapot, a feszültségintenzitási tényező és más, az üzemállapotokból eredő állapotjellemző meghatározásának ismerete, beleértve az üzemzavari terheléseket is.



5. ábra. Korrózióálló acél kristályközi korróziója (üzemi hőmérséklet: 300 °C, üzemidő: >200 000 óra).

Szerkezeti anyagvonatkozású kompetenciák

Az anyagtudomány vonatkozásában a következő kompetenciák a legfontosabbak:

- A szerkezeti anyagok tulajdonságainak ismerete.

- A szerkezeti anyagok terhelésre és környezeti hatásra adott „válaszának”, azaz az öregedési mechanizmusoknak és az öregedési folyamatok hatásának az ismerete.
- A potenciális öregedési folyamatok ismerete, úgymint a ridegedés, szívósságvesztés, fáradás, korrozio, kúszás, kopás és egyéb folyamatok, és ezek hatása a berendezések és szerkezetek integritására. Az 5. ábra szemcsehatár menti karbidkiválást mutat egy 200 000 órát 300 °C hőmérsékleten üzemelt berendezés korrozioálló anyagában (a jelenség az adott üzemi hőmérsékleten jelenlegi ismereteink alapján legalábbis magyarázatra szorul).

A posztgraduális kurzusról

A Debreceni Egyetemen megtartott két – egyenként 180 órás – kurzus hallgatói gyakorló mérnökök voltak, többnyire az iparból, továbbá kutatóintézetekből és NDE-szolgáltatást nyújtó cégektől. Az előadók vezető egyetemi professzorok és elismert, jelentős gyakorlattal bíró ipari mérnökök voltak, a gyakorlati foglalkozásokat vizsgálókészülék-fejlesztő és -forgalmazó cégek képviselői tartották.

A kurzus tantárgyai

Statistikus módszerek • Problémamegoldás gépi tanulással • Végelelemes módszer (VEM) alapjai • VEM-alkalmazások a megbízhatóságelemzésben • Üzemeltethetőség megállapításának mérnöki módszerei • Törésmechanika – Alapelvek, anyagtulajdonságok • Üzemeltetési körülmények – Anyagok károsodása I. • Üzemeltetési körülmények – Anyagok károsodása II. • Biztonság, megbízhatóság, kockázat • Korszerű állapot-ellenőrzés • Ipar 4.0 és NDE • Az NDE megbízhatósága • NDE-modellezés és -szimuláció • NDT-eljárások és -alkalmazások I. • NDT-eljárások és alkalmazások II. • Szakdolgozat

Látható, hogy a tantárgyak csaknem fele, lényegében a kurzus magja, az NDE különböző aspektusaival foglalkozott. A tantárgyak közelítőleg 30 százaléka anyagtudomány-irányítottságú volt, de idetartozott az anyagkárosodások megbízhatóságra gyakorolt hatása is, míg a fennmaradó hányadot a terhelés és környezeti hatások vonatkozású tárgyak tették ki, beleértve a numerikus számítási módszerek alapjait. Az egész kurzus alapvető szellemiségét a biztonság, megbízhatóság, kockázat fogalmak megértése és alkalmazása hatotta át.

Zárszó

A „roncsolásmentes vizsgálat és megbízhatóság” mérnöki koncepció jelentősége, hogy magasabb szintre emelje és hitelesebbé tegye a korszerű és egyre több lehetőséget nyújtó NDE-eljárások alkalmazását az anyagok és berendezések megbízhatósága elemzéséhez és biztonságuk szavatolásához. A koncepció megalkotásában és a javasolt kompetenciák kidolgozásában egyaránt szerepet játszottak a gazdasági fejlődés tendenciái, a biztonsággal kapcsolatos felfogás világméretű változása, valamint a vizsgáló személy és a döntéshozó tudása között felismert „szakadék”. A Nemzetközi Roncsolásmentes Vizsgálati Akadémia kidolgozta a bemutatott kompetenciákat, és a koncepciót ajánlja a világ egyetemeinek. A Debreceni Egyetem – elsőként a világon – két sikeres kurzuson van túl. ■