

BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK

Kohászat

Vaskohászat
Öntészet
Fémkohászat
Anyagtudomány
Felsőoktatás
Hírmondó

152. évfolyam

2019/2. szám



Jó szerencsét!

Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület lapja.

Alapította Péch Antal 1868-ban.

TRAMPUS P. – DOBRÁNSZKY J. – KERNER ZS. – KNISZ J. – OSZVALD F. – PALOTÁS B. – PÉTER L. – RÉGER M. – VERŐ B.

Auszténites acél csővezeték korróziós károsodása

Egy atomerőmű kiégett fűtőelemeinek tárolására szolgáló pihentető medence hűtőrendszerében korróziós károsodást figyeltek meg. A károsodás alapvető okának feltárására rendszeres és átfogó vizsgálati programot dolgoztunk ki. Számos és sokféle korróziós tesztet, mechanikai, szövetszerkezeti és mikrobiológiai vizsgálatot hajtottunk végre, továbbá a működési feltételek és a hegesztési körülmények szimulációját valósítottuk meg. Az eredmények alapján azonosítottuk a korróziós károsodást kiváltó legfőbb tényezőket, és ismertettük a károsodás egy lehetséges mechanizmusát.

1. Bevezetés

A Paksi Atomerőműben 25 év üzemeltetés után a kiégett fűtőelemek pihentető medencéjének hűtőrendszerében szivárgást tapasztaltak. A hűtőközeg 14,5 g/dm³-nél nagyobb koncentrációjú bórsavoldat, átlagos hőmérséklete 30 °C. A hűtőrendszerben két párhuzamos keringtetési ág felváltva működik. A szivárgás észrevétele után közvetlenül elvégzett in situ roncsolásmentes, és az ezt követő átfogó vizsgálat világsá tette, hogy a szivárgást a hűtőrendszer csővezetékeinek belső felületén kialakuló lyukkorrózió okozza. A lyukak egy része áthatolt a csőfal teljes vastagságán. A csövek szerkezeti anyaga krómmal és nikkkel ötvözött, titánnal stabilizált auszténites rozsdamentes acél (GOSZT szerinti 08H18N10T, amely közelítőleg megegyezik az MSZ

EN 10088-1 szerinti 1.4541 minőség-gel). A csőátmérők 100 és 300 mm között változnak, a falvastagság 6–10 mm közötti. A csöveket betonba ágyazva fektették le, ezért cseréjük nehézkes és időigényes. Az 1. ábrán egy, szemrevételezéssel és ultrahangos vizsgálattal észlelt, majd metallográfiai vizsgálattal feltárt károsodás látható.

Az atomerőmű üzemeltetője felkérte a műszaki konzulens szervezetét, hogy végezze el ennek – feltételezhetően – az üzemeltetés hatására kialakult, nem várt károsodási folyamatnak az átfogó vizsgálatát, amely károsodást meglehetősen hosszú üzemeltetési időszakot követően észleltek. A probléma összetettsége miatt az okok feltárása számos szakmai terület ismeretét követeli meg, nevezetesen: az anyagtudományét, az elektrokémiá-

ét és a korróziós tudományét, beleértve a mikrobiálisan befolyásolt korrózió-ét (MIK) is, továbbá a hegesztési technológia és az üzemeltetés körülményeinek ismereteit. A munkacsoportot akadémiai intézetek és egyetemek képviselői alkották annak érdekében, hogy a feladat megoldásához szükséges szakterületek mindegyike megfelelő szinten legyen képviselve. A károsodási folyamatot a vizsgálattal és az elemzéssel együtt (I. fázis: 2013–2014) már ismertettük [1]. Ennek a cikknek az a célja, hogy elsősorban az I. fázis után elért eredményekre fókuszáljon, összegezze azokat, továbbá javaslatot tegyen a károsodás legvalószínűbb mechanizmusára. A vizsgálatok II. fázisa 2016–2017-ben zajlott.

2. A korábbi vizsgálatok rövid összefoglalása

Az I. fázis során az üzemeltető mintákat vett a szivárgó csővezetékrendszer anyagából és a munkacsoport rendelkezésére bocsátotta. Ezeket a következő jellemzőket határoztuk meg:

- Korróziós potenciál (oxigén jelenlétében és oxigénhiányos környezetben), korróziósebesség, lyukkorróziós potenciál (kloridionokkal, illetve vas(III)-kloriddal provokálva);
- Általános és helyi kémiai összetétel (energiadiszperzív röntgensugárspektrometria – EDX, lézeralblációs induktív csatolású plazma tömegspektrometria – LA-ICP-MS), korróziótermék-lerakódások összetétele;
- Mechanikai tulajdonságok;
- Szövetszerkezet (optikai mikroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópia – SEM, visszaszórt elektrondiffrakció – EBSD);

Trampus Péter, professor emeritus, Dunaújvárosi Egyetem

Dobránszky János, tudományos tanácsadó, MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

Kerner Zsolt, tudományos főmunkatárs, Eötvös Loránd Tudományegyetem

Knisz Judit, tudományos főmunkatárs, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Víz-tudományi Kar, Vízellátási és Környezetmérnöki Intézet

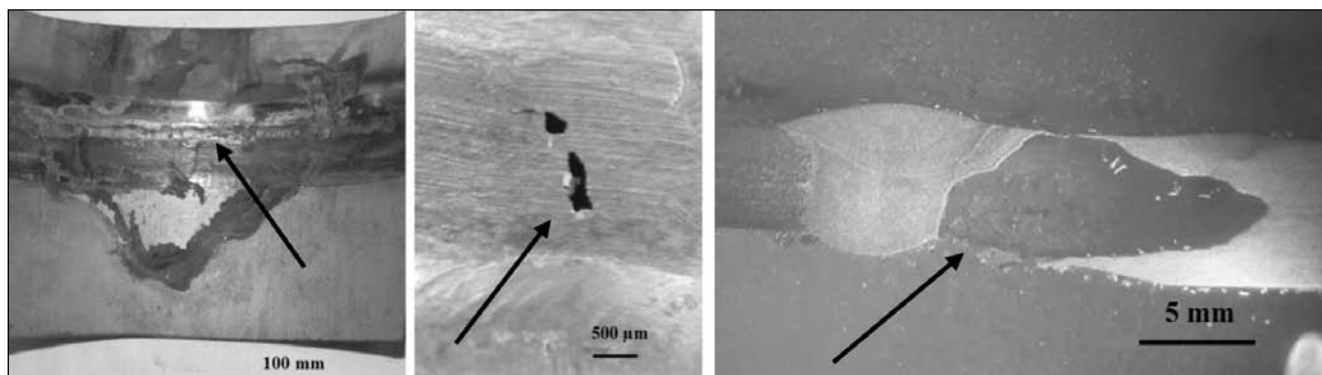
Oszvald Ferenc, tudományos munkatárs, VEIKI

Palotás Béla, professor emeritus, Dunaújvárosi Egyetem

Péter László, tudományos tanácsadó, osztályvezető, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet

Réger Mihály, egyetemi tanár, rektor, Óbudai Egyetem

Verő Balázs, professor emeritus, Miskolci Egyetem



■ 1. ábra. Hegesztett kötés lyukkorróziója (balra: a cső belső felülete eredeti állapotban, középen: tisztítás és dekontaminálás után, jobbra: keresztcsiszolat, a belső felület alul)

• Mikrobiális hatás (fluoreszcens mikroszkópia, sejt kultúra módszerek).

Az elektrokémiai vizsgálatokat megismételtük a régi, a csőrendszer telepítési idejéből származó, és az azzal megegyező új anyagon egyaránt.

Ezeknek a vizsgálatoknak az eredményei [1] azt mutatták, hogy a korróziós ellenállás, a kémiai összetétel, a mechanikai tulajdonságok és a nemfémes zárványok jellege összhangban volt a megfelelő szabványos értékekkel. A csővezetékrendszer belső felületének döntő része károsodásmentes volt, a korrózió feltételei csak helyileg alakultak ki. A korrózió döntő többsége a hegesztett kötésekhez, a hőhatás-övezet futtatási színnel fedett részeihez kapcsolódott. Ezen kívül szerves anyagokat találtunk a korrodált felületen, ami a MIK-folyamat kialakulásának lehetőségét sejtette.

Nyilvánvaló, hogy a rendszernek nem csak egyetlen eleme járult hozzá a korrózióhoz. A legfontosabb tényezők között megtaláljuk a hőhatás-övezet oxidrétegét és a varrat közeli zónák korróziós érzékenységét, a mikrobiológiai hatásokat és az üzemeltetési körülményeket egyaránt. Ez utóbbiak közül ki kell emelni a hűtőközeg áramlási sebességét, időszakos stagnálását és a mikrobák növekedéséhez ideális hőmérsékletet.

3. A jelenlegi vizsgálatok és azok elemzése

A II. fázisban kiegészítő vizsgálatokat, elemzéseket és fizikai szimulációkat végeztünk. Az I. fázis befejezése után elkezdett MIK-monitorozás eredményeit is ekkor tudtuk az elemzés során figyelembe venni.

3.1. Az alapvető okok feltárására irányuló vizsgálatok

A következő vizsgálatok a pihentető medence csőrendszerében kialakuló helyi korróziós károsodás alapvető okának felderítését szolgálták.

3.1.1. A mikrobák hatása a korróziós jelenségekre

Két éven keresztül vizsgáltuk a hűtőközeg biomasza tartományának változását. Megállapítottuk, hogy annak mennyisége 10^2 - 10^3 ME ml⁻¹ közötti tartományban volt (ME = mikrobiológiai egyenérték). Egyes esetekben ez az érték 10^4 ME ml⁻¹-re nőtt. A hűtőközeg új generációs szekvenálása feltárta, hogy a folyadékban található mikrobák többségét *Ralstonia pickettii* alkotja, amely nagyon nagy tisztaságú vízben is életképes, mixotróf faj [2, 3], autotróf módon képes kizárólag H₂-en, mint egyedüli energiaforráson, és CO₂-on, mint egyedüli szénforráson megélni. Ez a faj extracelluláris polimer anyagot tud termelni, amely a biofilm képződéséhez szükséges. A szekvenálás kimutatta a *Desulfobacteriaceae* és *Desulfovibrionaceae* családot, a *Burkholderia* család tagjait, valamint a *Sediminbacterium* nemzetség tagjait, amelyekről ismert, hogy a vas oxidálására képesek [4]. Ezen túlmenően a savképző *Acinetobacter* nemzetség [5] is megtalálható volt, amely úttörő baktérium a biofilm kialakításában [6, 7]. Bár a folyadékban található mikrobák típusa és mennyisége nem feltétlenül jelent közvetlen összefüggést a felületen megtalálható mikrobákkal, az eredmények alapján mégis feltételezhető, hogy a *Ralstonia pickettii*, más *Ralstonia* fajokkal együtt, bórsav jelen-

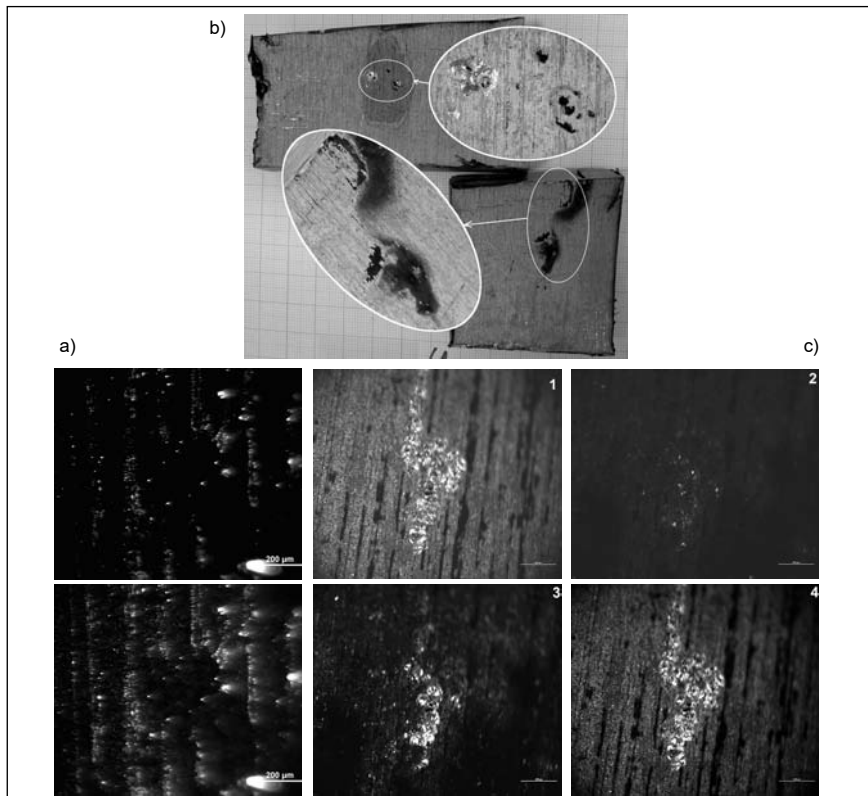
létében is szerepet játszhat a biofilm kialakulásában. A csővezeték aljáról összegyűjtött korróziós terméken elvégzett BART-csőves vizsgálatok (*Biological Activity Reaction Test, BART*) [8] igazolták a vasoxidáló és vasredukáló baktériumok, a heterotróf és nyákképző baktériumok, valamint a savképző baktériumok jelenlétét is. A rendszerben nem tudunk kimutatni szulfátredukáló baktériumokat.

Fluoreszcens mikroszkópiai vizsgálat eredményét mutatja a 2. ábra. A korrodált területeken található élő és elhalt sejteket a korróziótermékeken a 2a ábra, tisztítást követően a korróziós bemarkolásokon belül a 2c ábra mutatja. A korróziós bemarkolások felülete fényes és fémes jellegű, ami aktív korróziós mechanizmusra utal.

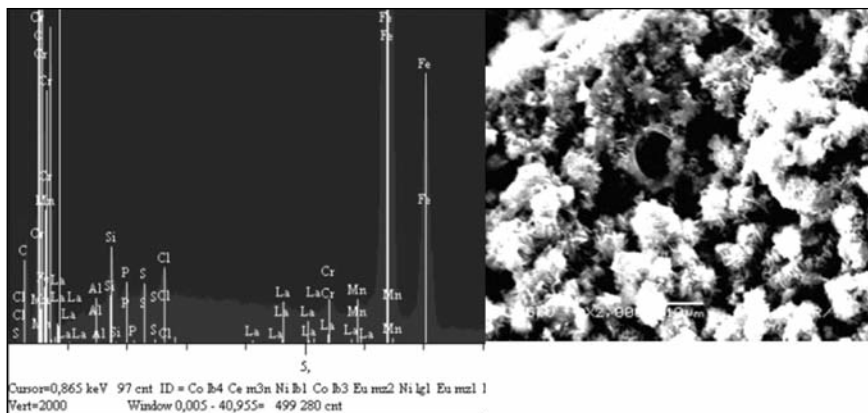
Egy másik korróziós terület SEM/EDX elemzése foszfort, ként és korbont mutatott ki a korróziós hely oldalán, amely mikrobiológiai folyamatra utalhat. A 3. ábra jobb oldali képének pásztázó elektronmikroszkópos felvétele magát a korróziós mélyedést és körülötte a porózus korróziós terméket mutatja, míg a bal oldalon az EDX-elemzés spektruma látható.

3.1.2. Az oxidréteg vizsgálatának eredményei

A szakirodalmi és saját eredményeink egyaránt azt sejtetik, hogy a futtatási színeként megjelenő oxidréteg, azaz a csövek némelyikének hegesztési révéje, a korróziós folyamatban fontos szerepet játszik. A folyamat jobb megértésének és az irodalmi adatok aktuális adatokkal való igazolásának érdekében részletesen elemeztük az oxidréteg meghatározó jellemzőit. Az elemzés a hegesztési folyamat model-



■ **2. ábra.** Fluoreszcens mikroszkópos vizsgálat. a) Élő sejtek (fent) és egymásra vetített képek (lent) a korróziótermék felületén; b) korrodált felület; c) (1) megvilágítás fehér fényel, (2) élő sejtek, (3) elhalt sejtek, (4) egymásra vetített képek



■ **3. ábra.** Porózus korróziótermék (jobb) és annak EDX-spektruma

lezésével előállított mintákon kialakult oxidréteg összetételének és szerkezetének feltárására irányult.

A GD-OES, azaz ködfénykísüléssel gerjesztésű, optikai emissziós spektrometria az oxidréteg vastagságának mérésére és összetételének közelítő meghatározására képes. A 4. ábra a hőhatásövezethez való átmenetben mutatja a GD-OES-technikával mért intenzitásokat. Ebből az olvasható ki, hogy az oxigén koncentrációja és a nikkeltartalom eloszlása – amely elemeknek kicsi a diffúzióval történő mozgásra való hajlama – jelezheti az oxidréteg határát, amelynek vastagsága

kb. 10 nm. A hőhatásövezet közepében az oxidréteg vastagsága 50 nm-hez közelít, míg az átlagos felületen kialakuló passzív réteg vastagsága nem haladja meg a 3–4 nm-t. Az Fe, a Cr és a Ni intenzitása ebben a mélységben már eléri az alapanyagra vonatkozó összetételnek megfelelő értékeket. A korrózió szempontjából az oxidréteg szerepe meghatározó jelentőségű, mivel ez kevesebb krómot tartalmaz, mint az átlagos passzív réteg, és kevésbé kedvező a króm-oxid/króm és a króm/vas aránya. Másrészt a vastagabb oxidréteg a kifejlődése közben nagy mennyiségű krómot von el a

reve alatti területről, ellentétben a szokásos passzív réteg kialakulásakor létrejövő helyzettel.

Transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálattal is hasonló vastagságú oxidréteg volt azonosítható. A felületre merőleges metszetben a ragasztó jelzi a minta külső szélét, amint az az 5. ábrán is megítélhető. A ragasztóréteg alatt közvetlenül egy 50–100 nm vastagságú, amorf oxidréteg látható.

3.2. A csővezeték belső felületének szemrevételezéses ellenőrzésekor készített felvételek értékelése

Elemeztük és értékeltük a hivatásos vizsgáló szervezetek által 2015–2017 között, a csővezetékrendszer belső felületéről készített videófelvételeket. Az elemzés alapján az alábbi következtetésekre jutottunk:

- Ha csak a károsodott, azaz korróziós foltok számát vizsgáljuk, ezeknek közel 60%-a a hegesztett kötések közelében helyezkedett el. Mivel a hegesztési varratok a teljes csővezeték felületének csak töredékét teszik ki, a varratok sebezhetősége korróziós szempontból nagyságrendekkel túlhaladja a csövek hegesztett kötésektől mentes felületeit.
- A korróziós termékekkel fedett felület a varratok 80–90%-át, azaz a hőhatásövezet gyökoldalát és az eredeti anyagnak a hőhatásövezethez közeli, futtatási színrel fedett sávját érinti. A korrodálódott területek többi részét a cső alapanyagán lehetett azonosítani. A korróziót elsősorban az áramlás irányában, a varratok után lehetett megfigyelni.
- Egyértelműnek látszik – habár nem kizárólagosan – a varratok és a többi felület korróziója közötti közvetlen kapcsolat. A lyukkorrózió a varratokon és a sima csőfelületek azon helyein is megjelenhet, amelyeket a hűtőközeg által szállított korróziótermék fed, továbbá azokon a helyeken, ahol a mikrobiológiai hatás az átlagnál sokkal kifejezettebb.

3.3. A korróziós folyamat szimulációja és eredményeinek elemzése

A laboratóriumi vizsgálatok mellett különböző szimulációkat is végeztünk.

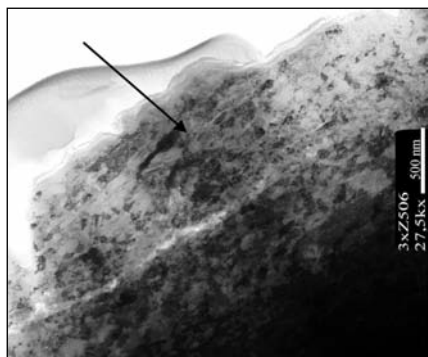
Szimuláltuk az üzemeltetés körülményeit, beleértve a sugárzás hatását, valamint a hegesztési folyamatot.

3.3.1. A korróziós folyamat egységes modellezése

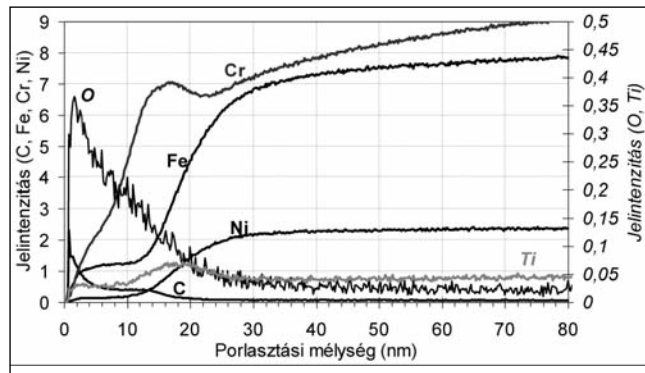
A korróziós folyamatot befolyásoló minden egyes tényező összesített hatásának tanulmányozása céljából modellkísérleteket végeztünk. Ezek a tényezők a következők voltak: gyökvédelem nélküli varratok, differenciális szellőzés, korróziótermék-lerakódások, a mikrobák és kloridionok jelenléte. A kísérleti paramétereiket a korróziós folyamatra nézve szélsőségesen választottuk meg. A közeg sokkal agresszívebb volt, mint a pihentető medencében, aminek eredménye a gyorsabban lejátszódó korróziós folyamat volt. A kísérleti berendezés elrendezési vázlatra a 6. ábra bal oldalán, míg jobb oldalon maga a berendezés látható.

A kísérlet eredményeit értékelve az alábbi következtetésekre jutottunk:

- A nagy katód/anód felületarányú, differenciális szellőzésű cella hosszú idejű működtetése (46 nap) megerősítette azt, hogy a gyökvédelem nélküli varratok korróziós érzékenysége igen nagy. Az ilyen minták tízszer nagyobb korróziósebességet mutattak, mint a varrat nélküliek.
- Az anaerob körülmények között végrehajtott differenciális szellőzés szimulációja bizonyította a szilárd felületeken a biofilm keletkezését. A biofilm még bórsav jelenlétében is kialakult. A biofilm megjelenése elő-



■ 5. ábra. A hegesztési revével fedett felületi réteg szerkezete a felületből preparált TEM-fólián



■ 4. ábra. Az elemek GD-OES-jelintenzitás a porlasztási mélység függvényében, a sárgásbarnára elszíneződött felületen

feltétele a mikrobiálisan befolyásolt korrózió kialakulásának.

- A minták gyökoldali részén meg lehetett figyelni a lyukkorrózió kialakulásának kezdeti lépéseit; továbbá a korróziótermékek, a mikrobákból álló biofilm és az anyagcseretermékek által alkotott gümők (tuberkulumok) kialakulásához vezető folyamat kezdetére utaló nyomokat is találtunk. Hangsúlyoznunk kell, hogy ezek a károsodási folyamatok viszonylag rövid időn belül már megjelentek.

3.3.2. A hegesztés technológiai változóinak szerepe

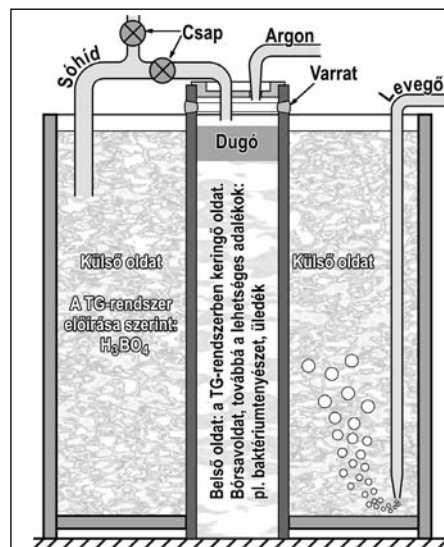
A hegesztési kísérleteket az eredeti WPS (*Welding Procedure Specification*, hegesztési technológia) előírásait követve végeztük el. Készítettünk egy referencia varratot, majd a következő technológiai tényezőket változtattuk:

- gyökvédelem (teljes elhagyás, hi-

nyos gyökvédelem, védelem csak a gyökhegesztésnél),

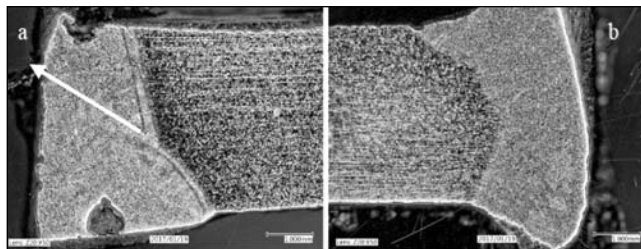
- alapanyagok előkészítése (hiányos, kivéve az él előkészítést),
- hőbeviteli korlát (túlzott hőbevitel),
- hőbeviteli korlát és gyökvédelem együtt (túlzott hőbevitel, hiányos gyökvédelem),
- gyökhézag (jelentősen megnövelt).

A hegesztett kötésből kimunkált minták belső felületét pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk, és elemeztük a kémiai összetételt a hegesztési varrat közelében. A lyukkorrózióra való hajlamot az ASTM G48 szabvány szerint vizsgáltuk [9]. A vizsgálatokhoz kétféle oldatot használtunk, amelyeknek FeCl_3 -koncentrációja eltérő volt (3,6 és 6%), és a korróziós vizsgálatokat két eltérő hőmérsékleten (szobahőmérsékleten és 50 °C-on) hajtottuk végre. A pihentető medence hűtésére szolgáló közeg hatását mechanikailag és bakteriológiailag szennyezett közeggel szimuláltuk. Az a tény, hogy a gyökvédelem nélküli minták mutatták a legnagyobb korróziós károsodást, alátámasztja azt a feltevést, hogy a gyökvédelemnek meghatározó szerepe van a hegesztési varrat korróziós érzékenységére. A 7. ábra példaként egy WPS előírásai szerint hegesztett, de gyökvédelem nélküli varrat keresztcsiszolatát mutatja.



■ 6. ábra. A differenciális szellőzést megvalósító modell és a berendezés négy független egységgel

Az 50 °C-on vizsgált minta korona- és gyökoldalán egyaránt láthatók beporodások, ami megerősíti a hőmérséklet hatását. Számottevően több korróziótermék képződött a MIK-et okozó baktériumokkal szennyezett oldatban, mint az ilyen baktériumok hiányában.



■ **7. ábra.** Gyökvédelem nélküli hegesztés: a) 50 °C, 3,6% FeCl₃; b) szobahőmérséklet, 6% FeCl₃

3.3.3. A gamma-sugárzás hatásának vizsgálata

Vizsgáltuk a gamma-sugárzás hatását a MIK-et okozó mikrobák életképességére. Kifejlesztettünk egy, a pihentető medencében uralkodó radioaktív sugárzási viszonyokra jellemző körülmények szimulációjára alkalmas vizsgálati elrendezést. Az eredmények alapján 100 kGy dózis megöli a mikrobákat, de az oldatok sterilítása csak akkor érhető el, ha a mikrobák koncentrációja nem haladja meg a 10⁷ ME ml⁻¹ értéket. Feltételezhető, hogy a pihentető medencében, a kiégett fűtőelemek közelében a mikrobák döntő többsége néhány óra alatt elpusztul. Azonban a hűtőközeg áramlása és a hűtőkörök váltott üzeme miatt a gamma-sugárzás nem képes teljes mértékben sterilizálni a közeget, így a mikrobák elérhetik a hűtőrendszer olyan távolabbi felületeit, ahol a dózisteljesítmény már kicsi.

4. Az eredmények értékelése, következtetések

Az elért eredményeket értékelve – beleértve a kutatás I. fázisának eredményeit is, lásd [1] – a következő általános állásfoglalást és következtetéseket fogalmazzuk meg. A korrózió szempontjából a pihentető medence hűtőrendszere komplex és nyitott rendszernek tekinthető. A korróziós viselkedést számos tényező, valamint ezek kölcsönhatása határozza meg. Az egyes tényezők egyedi hatása és relatív súlya változhat, és a megfigyelt helyi, lyukkorróziós károsodás nem vezethető vissza egyetlen jól meghatározható tényezőre vagy okra.

A hűtőközeg átlagos és jellemző kloridion-koncentrációja és bórsavtartalma egyedül vagy más tényezőkkel együtt sem tudja kiváltani a megfigyelt korróziós folyamatot. A csövek szerke-

zeti anyaga kielégíti a szabványos követelményeket.

A csővezeték számos hegesztési varratának belső felületén nemkívánatos futtatási szín, más néven hegesztési reve van jelen. Az ilyen felületeknek és a közvetlenül e felületek alatt lévő területeknek a kémiai összetétele eltér attól az összetételtől, amely a megfelelő passziválódási feltételeket biztosítani tudja. Így ezeknek a felületrészeknek a korróziós ellenállása a termikus folyamat eredményeképpen lecsökken.

A jellemző bórsavtartalmú hűtőközegben változatos mikroorganizmusok növekednek; néhány, MIK-kel korábban összefüggésbe hozott mikroorganizmust azonosítottunk. A mikroorganizmusok számára optimális hőmérséklet 15–40 °C között van, amely megfelel a hűtőrendszer működési hőmérséklet-tartományának. A hűtőközeg összetételétől és az üzemeltetési feltételektől (periodikus működés, stagnálás) függően a hegesztési varratok körüli termikus oxidréteg, vagyis a hegesztési reve, elősegíti a MIK kialakulásában részt vevő mikroorganizmusok megtapadását. A biofilm képződése miatt helyileg csökken ezeknek a területeknek az oxigénellátottsága, és ennek következtében helyi differenciális szellőzésű cellák alakulnak ki. A biofilmen belüli reakciók általában lokalizálódnak, és befolyásolják az elektrokémiai folyamatokat, jellemző módon meggyorsítva azokat, aminek helyi korrózió a következménye.

5. A károsodási folyamat lehetséges mechanizmusa

A vasoxidáló baktériumok az energiájukat a Fe²⁺ ionoknak Fe³⁺ ionokká való oxidálásából nyerik. Ezeknek a baktériumoknak az aktivitása következtében barlangszerű, narancsvörös színű vas-oxid-lerakódás (tuberkulum)

képződik. A vas-oxid-lerakódás blokkolja az oxigén transzportját a felülethez, és megfelelő feltételeket teremt a vasredukáló baktériumok működéséhez. Ennek következtében ezek az oxigénben szegény területek anódként viselkednek a környező területek oxigénben gazdag katódos területeihez viszonyítva. Amint az anódos területen a fém oxidációja (elektronleadása) lejártszódik, az újonnan keletkezett fémionok hidrolízise következtében a pH lecsökken. Ezek a folyamatok a korróziósebesség megnövekedéséhez vezetnek, az újrapassziválódást okozó oxigén hiánya miatt.

A tuberkulumok porózus szerkezetében, helyi hatások következtében a hűtőközeg kloridion-koncentrációja helyileg megnövekedhet. Figyelembe véve, hogy a biofilmen belül korlátozott az áramlási sebesség, oxigénben szegény és kloridionokban gazdag közeg jöhet létre, egyértelműen elősegítve a helyi elem hatásának érvényesülését. A hűtőközeg áramlása közben a korróziótermék leválhat a felületről, és tovább sodródhat az áramlás irányába. Ezeknek a korróziótermékeknek bizonyos része megtapadhat a rendszer más helyein. A sodródó korróziós termékek egyaránt tartalmazhatnak vas-hidroxidot, valamint a tuberkulumokból származó élő és elhalt mikroorganizmusokat.

Az atomerőmű egyik technológiai rendszerében hosszú idejű üzemeltetés után helyi korróziós károsodási jelenséget azonosítottunk. Átfogó vizsgálati programot dolgoztunk ki a károsodás meghatározó okának felderítésére. A program különböző korróziós tesztekkel, mechanikai, szövetszerkezeti és mikrobiológiai vizsgálatokból, valamint az üzemeltetési feltételek és a hegesztési körülmények szimulációjából állt. A vizsgálatok eredményeinek értékelése és elemzése alapján azonosítottuk a korróziós károsodás meghatározó tényezőit. Ezek a következők: a hőhatásövezet fedő oxidréteg és az ennek közelében kialakuló, azzal összefüggésben lévő, megnövekedett korróziós érzékenység, a mikroorga-

6. Összefoglalás

Az atomerőmű egyik technológiai rendszerében hosszú idejű üzemeltetés után helyi korróziós károsodási jelenséget azonosítottunk. Átfogó vizsgálati programot dolgoztunk ki a károsodás meghatározó okának felderítésére. A program különböző korróziós tesztekkel, mechanikai, szövetszerkezeti és mikrobiológiai vizsgálatokból, valamint az üzemeltetési feltételek és a hegesztési körülmények szimulációjából állt. A vizsgálatok eredményeinek értékelése és elemzése alapján azonosítottuk a korróziós károsodás meghatározó tényezőit. Ezek a következők: a hőhatásövezet fedő oxidréteg és az ennek közelében kialakuló, azzal összefüggésben lévő, megnövekedett korróziós érzékenység, a mikroorga-

nizmusok hatása és az üzemeltetési feltételek, kiemelten a hűtőközeg áramlási sebessége, stagnálása és kis hőmérséklete.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki Radnóczy Györgynek a TEM és Török Tamásnak a GD-OES-vizsgálatok elvégzéséért és a vizsgálatok eredményeinek a kiértékeléséért.

Irodalom

[1] Trampus P. et al: 2017 Investigation of local corrosion degradation

developed on a pipeline system in service period Materials Science Forum **885** 92

[2] Adley C. C. et al: 2005 Ralstonia pickettii: biofilm formation in high purity water The Biofilm Club 151

[3] Gales G. et al: 2004 Action of an aerobic hydrogenotroph bacteria isolated from ultrapure water systems on AISI 304 stainless steel Proc. Int. Conf. EUROCORR 2004 (Nice) 11

[4] Kuever J.: 2014 The Prokaryotes Chapter: The family of Burkholderiaceae Springer 759

[5] Pavissich J. P.: 2010 Culture dependent and independent analyses of bacterial communities involved in copper plumbing corrosion Journal of

Applied Microbiology **109** 771

[6] Wang H. B. et al: 2012 Effects of disinfectant and biofilm on the corrosion of cast iron pipes in a reclaimed water distribution system Water Res **46** 1070

[7] Percival S. J.: 1999 The effect of molybdenum on biofilm development Ind Microbiol Biotech **23** 112

[8] <http://www.dbi.ca/StandMeth/> {checked at December 12, 2017}

[9] ASTM G48 – 11 2015 Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution, ASTM International, West Conshohocken, PA.

SÁLYI ZSOLT – BENKE MÁRTON

Bevonat nélküli és TiB₂ bevonattal ellátott C45, valamint W302 acélok viselkedése nyugvó SAC forraszolvadéokban*

Bevonat nélküli és TiB₂ bevonattal ellátott C45-ös, valamint W302-es acélok viselkedését, határfelületi reakcióit vizsgáltuk nyugvó SAC ólommentes forraszolvadékba merítve.

A szakterületen már számos hazai és nemzetközi folyóiratban jelent meg publikációnk, ezért ez a cikk az elért eredményeink összefoglalására koncentrál. Az oldódási tesztek 320 °C-os forraszfűrdőben 5, valamint 20 napig végeztük el. A mikroszerkezet-vizsgálatok kimutatták, hogy azoknál az acéloknál, ahol nem alkalmaztunk TiB₂ bevonatot, a forraszanyag és az acél határfelület között már öt nap oldódási teszt után is FeSn₂ intermetallikus réteg alakul ki, tehát Fe-atomok oldódnak ki az alapfémből. Az elvégzett vizsgálatokra alapozva megállapítható, hogy a TiB₂ bevonat mindkét vizsgált acélon ellenálló határfelületet hozott létre az agresszív forraszanyag és az alapfém között.

Bevezetés

A mikroelektronika és a nyomtatott áramkörök egyre szélesebb körben való elterjedése kedvezően hatott a forrasztóipar fellendülésére és térhódítására. Magyarország Európa forrasztóközpontjának tekinthető, hiszen több multinacionális vállalat foglalkozik nagy tömegben ipari forrasztások-

kal és értékesítik termékeiket a világ legkülönbözőbb országaiban. A legnagyobb felvásárlók az autóiipari és az elektronikai, számítástechnikai partnerek. Igen fontos tehát az, hogy a forrasztott szerkezetek, áramkörök, kötések megfelelő minőségűek legyenek, ugyanis egy hibás forraszkötésen emberéletek is múlhatnak. Az ipari forrasztószerszámok gyors tönkremenene-

tele azonban megnehezíti a termelékeny és precíz forraszkötések kialakítását, tönkremeneteli mechanizmusokról rendkívül kevés szakirodalom ad információt [1, 2]. Az azonban bizonyos, hogy az új fejlesztésű ólommentes forraszanyagok fokozottan károsítják a szerszám alapanyagát, csökkentve ezzel annak élettartamát. Több bevonatolási vagy felületmódosítási eljárást is alkalmaznak már a forrasztószerszámok védelmére, azonban ezek a megoldások ugyan lassítják a tönkremenetelt, viszont a szerszám nedvesítőképességét lerontják. Ezek az úgynevezett nemnedvesítő forrasztószerszámok. A jó nedvesítés elengedhetetlen olyan forraszkötések létrehozásánál, ahol nagyon pontos és

Sályi Zsolt 2016-ban szerzett MSc anyagmérnöki diplomát a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán, jelenleg PhD-hallgató.

Dr. Benke Márton a Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében egyetemi docens.

*Munkánk előzménye a BKL Kohászat 151. évfolyam, 2018/3. számában megjelent cikkünk, valamint más saját és irodalmi közlemények eredményeinek összefoglaló értékelése.