

## Auszténites acél keményforrasztott kötések mikroszerkezeti sajátosságai

Dobránszky János <sup>(1)</sup>, Komócsin Mihály <sup>(2)</sup>, Lipták Gábor <sup>(3)</sup>

- (1) MTA–BME Fémtechnológiai Kutatócsoport, 1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 7.  
dobi@eik.bme.hu
- (2) Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros  
metkm@gold.uni-miskolc.hu
- (3) BME Gépészmérnöki Kar, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.  
lipig@t-online.hu

**Kivonat:** Az auszténites acél forrasztáskor a legtöbb forrasztóolvadék az auszténit szemcsehatárai mentén mélyen behatol az anyagba. A forrasztott kötés szilárdsága ennek ellenére megfelelhet a felhasználó igényének, ezért a forrasztott kötések alkalmazása nem ismeretlen az ipari gyakorlatban. A cikkben X5CrNi18-10 típusú auszténites acél forrasztott kötéseknek metallográfiai vizsgálata alapján bemutatjuk a szemcsehatármenti oldódási és elridegési jelenségeket.

**Kulcsszavak:** auszténites acél, védőgázos fogyóelektródás forrasztás, szemcsehatármenti oldódás, szemcsehatármenti elridegés

### 1. Bevezetés

Az auszténites acélok autóiipari alkalmazásaiban előfordul a keményforrasztás és ennek automatizált változata, a védőgázos, fogyóelektródás forrasztás (angol néven MIG brazing) is. Az auszténites acél forrasztását számos szakmai fórumon nem javasolják, mivel a legtöbb forrasztóolvadék az auszténit szemcsehatárai mentén mélyen behatol, esetenként áthatol az anyagon. Ezt a jelenséget többnyire a fémolvadék okozta sajátos korróziós jelenségnek, fémolvadék okozta elridegésnek tekintik. Mivel azonban a forrasztott kötés szilárdsága és korrózióállósága ennek ellenére megfelelhet a felhasználó igényének, a forrasztott kötések, köztük a fogyóelektródás forrasztással készített kötések alkalmazása egyáltalán nem ismeretlen az ipari gyakorlatban.

A cikkben X5CrNi18-10 típusú auszténites acélcsövek fogyóelektródás forrasztott tokos kötésénél észlelt szemcsehatármenti reakciók természetét ismertetjük. Metallográfiai és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményei alapján

bemutatjuk a forraszanyag és a szemcsehatár reakciójának lefolyását, rávilágítva az ott lezajló sajátos oldódási és repedésterjedés jellegű jelenségekre.

## 2. Keményforrasztott kötések metallográfiai vizsgálata

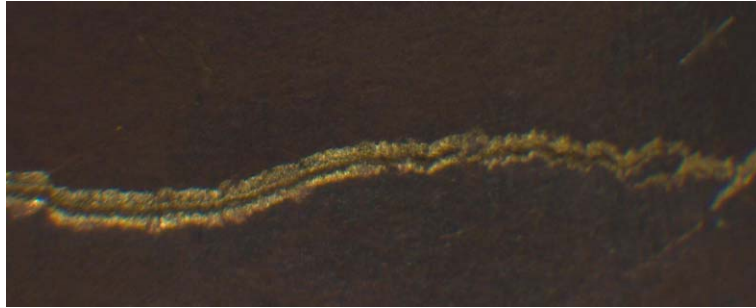
A vizsgálat tárgyát X5CrNi18-10 ausztenites acél anyagú, vékony falú csövek tokos kötése képezték, a forrasztott kötést védőgázos fogyóelektródás forrasztással készítették. Az alumíniumbronz forraszanyag besorolása az MSZ EN 14640:2005 szerint: „S Cu 6100”, rövid jelle: 2.0921, általános anyagjele CuAl8. A forrasztási technológia nem képezte az elemzés tárgyát, így annak részleteit nem tárgyaljuk.

A megforrasztott alkatrészek vizsgálatokor szemrevételezéssel is látható volt, hogy repedésszerű vonalak jelentek meg a cső belső oldalán, amelyekben jelen volt a forraszanyag (1. és 2. ábra). A vizsgálat arra irányult, hogy tisztázzuk a forraszanyag csőfalra való áthatolásának jellegét és a kötés mikroszerkezeti sajátosságait, köztük azt, hogy a forraszanyag áthatolását kíséri-e elridegési jelenség.

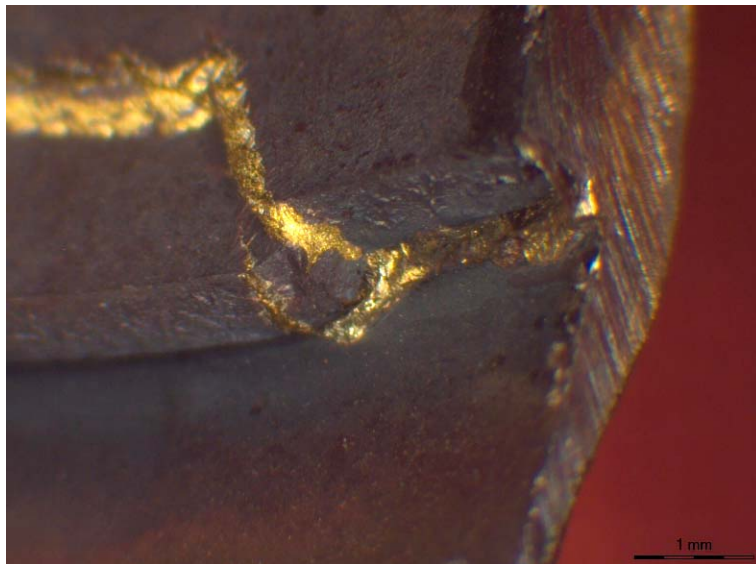
Vizsgáltuk a forraszanyaggal kitöltött repedéseket, az itt kialakult zónákban a kémiai összetételt, valamint a repedések hatását a kötés szilárdságára. A vizsgálatokat optikai és pásztázó elektronmikroszkóppal végeztük a kötésekben kivágott keresztmetszeteken és mesterségesen létrehozott töretfelületeken, a mechanikai vizsgálatokat viszont csak alkalmi szakítópróbák jelenthették a kis méretek miatt. Megfigyeltük, hogy a körbefutó forrasztott kötés számos szakaszán szemmel láthatóan „átfolyt” a forraszanyag. A kötésből kivágott kisméretű próbatestek szétszakításakor azt tapasztaltuk, hogy abban az esetben, ha nincs nyoma forrasznak a belső cső belső felületén, akkor a kötés jóval ellenállóbb a szakítással szemben. A forraszátfolyási zónából kivett próbatestek elszakítása után a szakadási felület teljes egészében forraszanyaggal borította. A töretfelületeket a későbbiekben elektronmikroszkópos vizsgálattal elemeztük.

A forrasztott kötésből, a varratra merőlegesen kivágott mintákból csiszolatokat készítettük a metallográfiai és az elektronmikroszkópos vizsgálatokhoz; az utóbbi célra a felületet aranyoztuk. A csiszolatokon megfigyelhető volt, hogy a forraszanyag a szemcsehatárok mentén hatolt be, ill. haladt át az anyagon, de az ikerhatárokon egyáltalán nem hatolt be. A szemcsehatárok metallográfiai jellege megváltozott az érintett zónában, maratás nélkül is jól előtűntek (3-7. ábra).

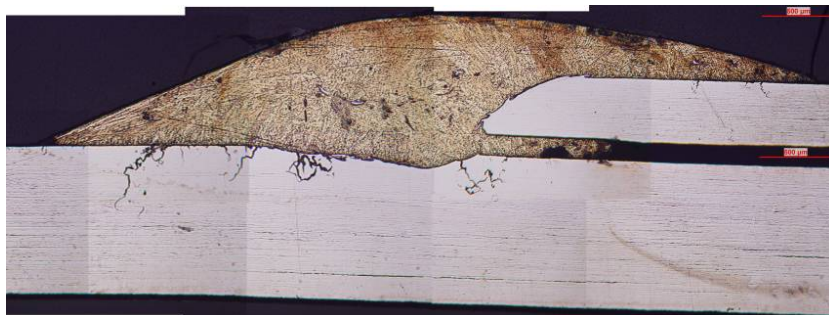
A 8-9. ábra elektronmikroszkópos vizsgálattal készített visszaszórtelektronképeket és EDS-analízissel a felület egyes pontjaiban meghatározott kémiai összetételi adatokat mutat. A 8. ábra képei olyan mintákról készültek, amelyeket előzetesen a forraszanyagra megmartunk, míg a 9. ábra képei minden maratás nélküli felületeket mutatnak. A visszaszórtelektronképek rendszámkontrasztot adnak, tehát minél világosabb egy képpont, annál nagyobb abban az elektronsugár által gerjesztett anyag átlagrendszáma. Az EDS-analízis adatainak mérlegelésekor a továbbiakban mind az alapanyagot, mind pedig a forraszanyagot a csak a három (Fe, Cr, Ni), illetve két (Cu és Al) fő összetevőjét tekintjük.



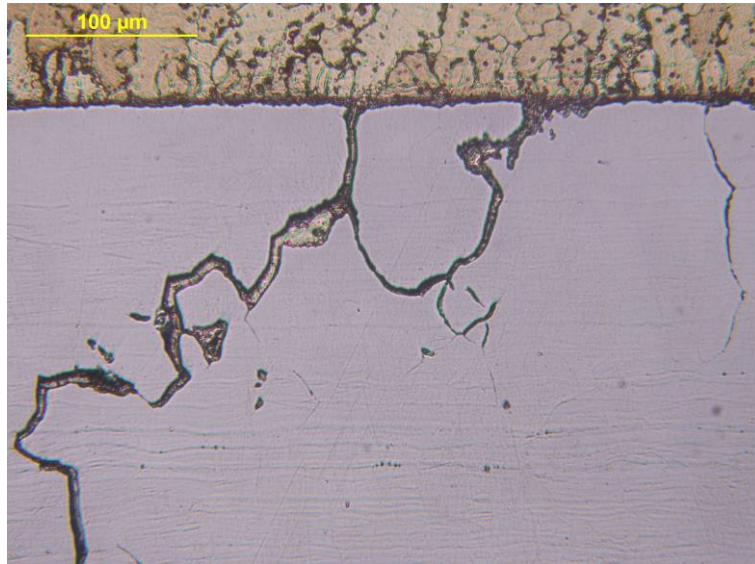
1. ábra Forrasanyag-átfolyás nyoma a tokos csőkötés belső csövének belső oldalán



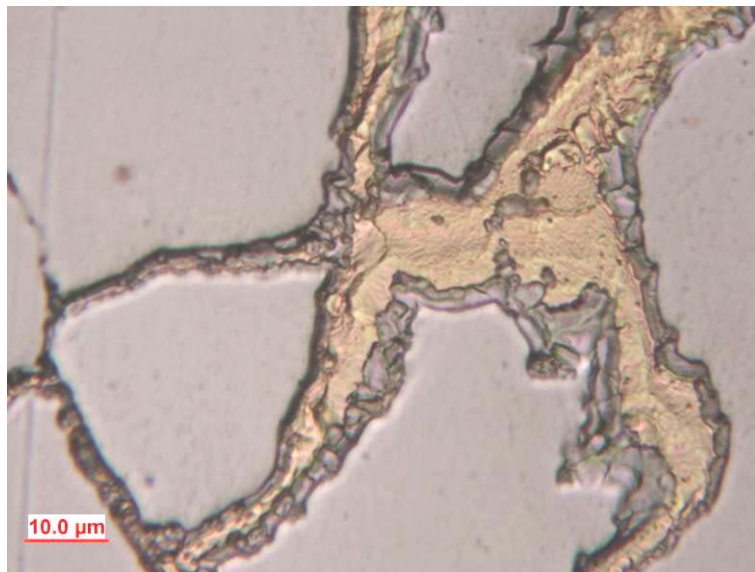
2. ábra Forrasanyag-átfolyás nyoma a tokos csőkötés belső csövének belső oldalán



3. ábra A forrasanyag-behatolás helyei a forrasztott kötés keresztcsiszolatán



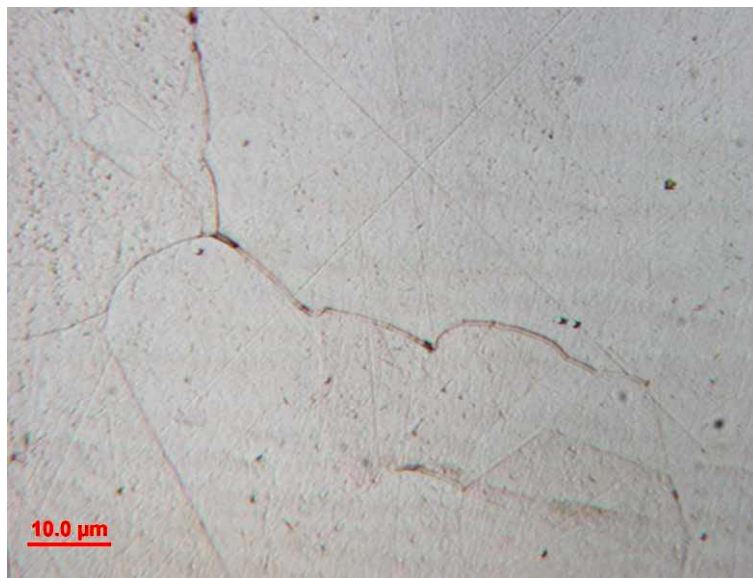
4. ábra A forraszanyag-behatolás az acél szemcsehatárai mentén a felülethez közel



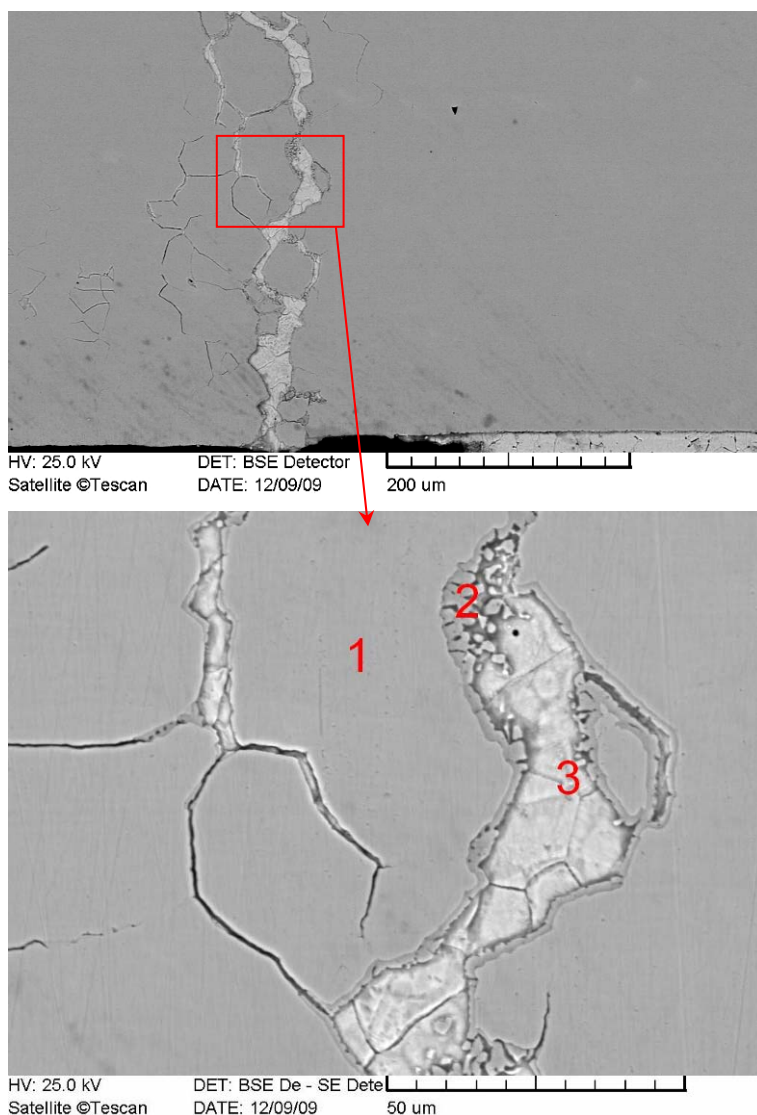
5. ábra A forraszanyag-behatolás az acél szemcsehatárai mentén a felülethez közel



6. ábra A forrasanyag-behatolás az acél szemcsehatárai mentén a felülethez közel



7. ábra A forrasanyag-behatolás az acél szemcsehatárai mentén, a felülettől távol



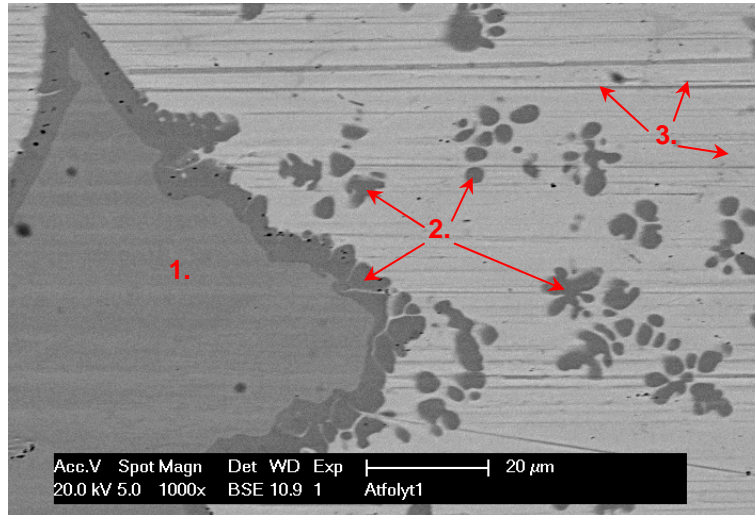
**8. ábra** A forraszanyag-behatolás az acél szemcsehatárai mentén. A kémiai összetétel:

az 1. pontban: 71,3% Fe – 18,4% Cr – 8,7% Ni

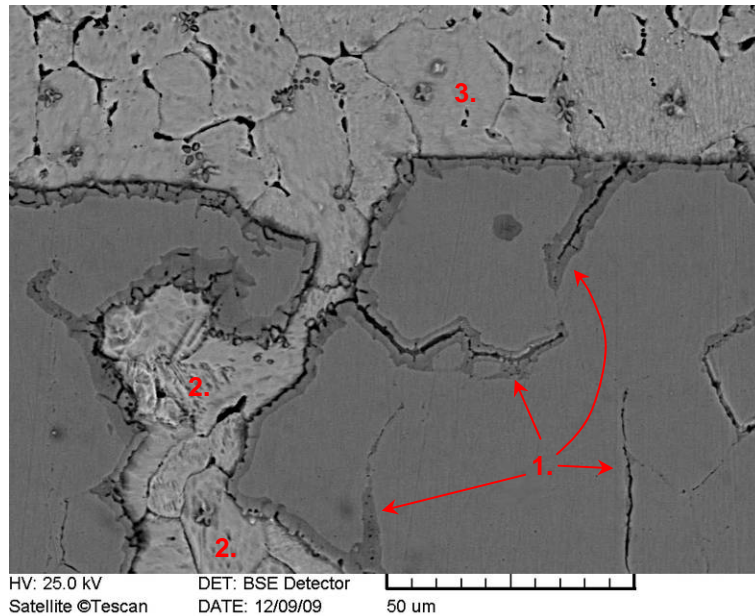
a 2. pontban: 65,4% Fe – 16,3% Cr – 4,6% Ni – 9,8% Cu – 3,0% Al

a 3. pontban: 4,4% Fe – 1,2% Cr – 2,5% Ni – 85,9% Cu – 5,0% Al

A 8. ábrán bemutatott kémiai összetételi adatok szerint a forraszbehatolás környezetében három jellegzetes zóna figyelhető meg: a forraszanyag (3. pont), a forraszanyag és az alapanyag keveréke (2. pont) és az alapanyag (1. pont). A forraszanyag behatolása a szemcsehatár mentén halad előre, és több szakaszra tagolható.



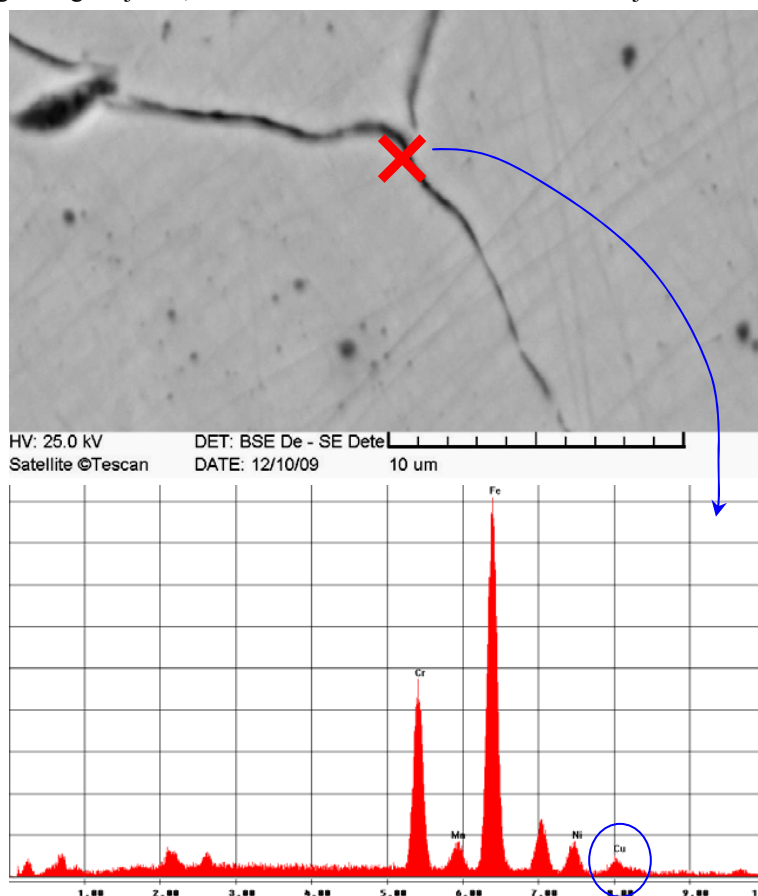
**9. ábra** A forrasanyag-behatolás környezete és az egyes zónák kémiai összetétele:  
 az 1. pontban: 70,8% Fe – 17,8% Cr – 9,3% Ni (alapanyag)  
 a 2. pontban: 67,0-67,7% Fe – 16,8-18,2% Cr – 1,3-4,3% Ni – 6,0-9,7% Cu – 3,1-4,3% Al  
 a 3. pontban: 3,0-3,7% Fe – 0,6-0,7% Cr – 1,6-1,8% Ni – 87,7-88,0% Cu – 6,0-6,1% Al



**10. ábra** A forrasanyag-behatolás kezdeti (1) és végső (2) fázisában érintett szemcsehatárok.  
 Az 1. pontok átlagos összetétele: 61,5% Fe – 15,8% Cr – 4,4% Ni – 14,0% Cu – 3,5% Al.  
 A 3. pont összetétele: 2,7% Fe – 0,8% Cr – 0,8% Ni – 88,6% Cu – 6,5% Al

A mikroanalitikai eredmények arra utalnak – az alapanyaghoz közeli zónákban a forrasztóanyag vasat, krómot és nikkelt is tartalmaz –, hogy az alapanyag oldódik a forrasztóanyagban. Az oldódás azonban nem azonos mértékű az ausztenites acél három fő alkotóelemére nézve: a Fe, Cr és Ni közül az utóbbi, a legnagyobb rendszámú nikkelt szinte teljesen kioldódott a határretegéből és a forrasztóban még teljesen fel nem oldódott „szigetek” formájában megmaradt alapanyag-darabkákból. Ez nem meglepő, ha meggondoljuk, hogy a nikkelnél rendkívül jó az oldhatósága a rézben is és az alumíniumban is.

A 10. ábra viszont azt mutatja, hogy a szemcsehatárokra behatoló forrasztóanyag Cu és Al alkotóelemei már akkor mélyen – akár 3-4 mikrométerre – behatolnak az ausztenites acél kristallitjaiba, amikor a szemcsehatáron még csak nagyon vékony a forrasztóanyag képezte és kitöltötte repedés. A 11. ábrán megjelölt szemcsehatár mentén semmi nyoma sincs diffúziós / oldódási rétegnek vagy a forrasztóanyag vastag sávjának, az EDS-analízis azonban kimutatta a Cu jelenlétét.



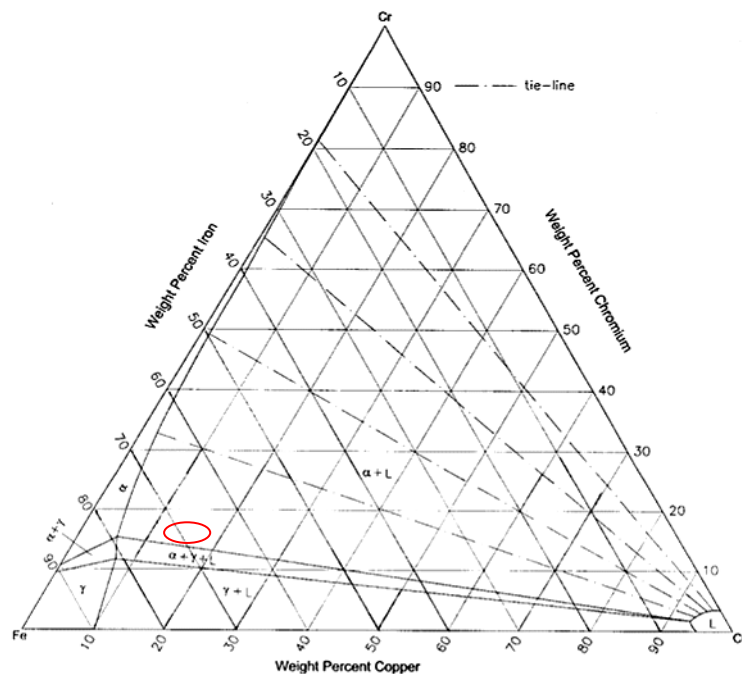
11. ábra A forrasztóanyagból származó Cu a látszólag érintetlen szemcsehatárokon is kimutatható



### 3. A vizsgálati eredmények értékelése

A vizsgálati eredmények mérlegelése az igazán látványos jelenség magyarázatára és gyakorlati konzekvenciáira kell, hogy irányuljanak. Mindkét vonatkozásban akár többféle megközelítés is lehetséges a szakmai megfontolások és a konkrét feltételrendszerrel függően – még a jelen cikk szerzői között is. A továbbiakban ezt is érzékeltetni kívánjuk.

A két- ill. háromalkotós egyensúlyi diagramok alapján a Fe-Cr-Ni háromalkotós rendszerben az 1.4301 típusú alapanyag szolidusz hőmérséklete  $\approx 1460^\circ\text{C}$ . A Fe-Al kétalkotós rendszerből leolvasható, hogy az alumínium csökkenti a szolidusz hőmérsékletet, de  $\approx 3\%$  Al-tartalomnál ez a csökkenés csekély.



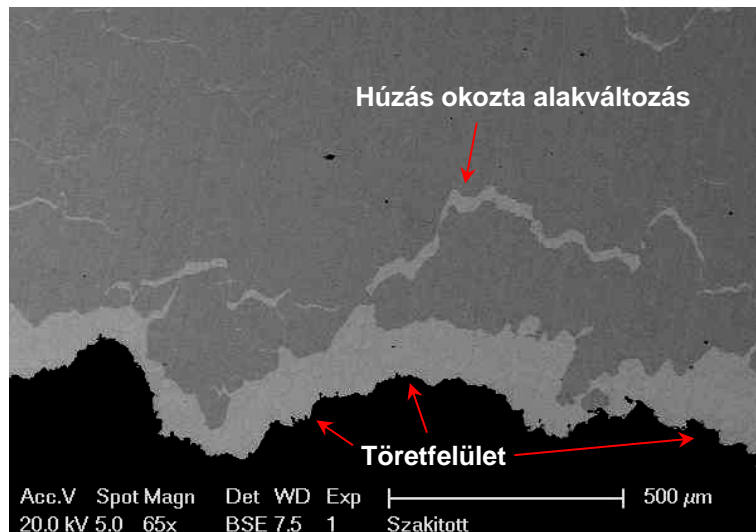
12. ábra A Cr-Cu-Fe egyensúlyi fázisdiagram, jelölve a 10. ábra 1. pontjai szerinti összetételt

A szilárd alapanyag forraszanyaggal érintkező szemcsehatárai megolvadnak; ez a likváció jelensége, amely a kétalkotós rendszerekben is tárgyalt peritektikus reakció formájában alakul ki. Erre azért kerül sor, mert az olvadt forraszból réz képes diffundálni az ausztenites szerkezetű alapanyagba. Ezzel egy lényegesen kisebb olvadáspontú acél alakul ki. Az így létrejött Fe-Cr-Cu ötvözet olvadáspontja (lásd 12. ábra) érdemben nem tér el a forraszanyag olvadáspontjától, így ez is megolvad. Ez az olvadék az olvadt forraszanyagban oldódva, ezzel újabb rézforrást teremtve, a folyamat folytatódik mindaddig, amíg a hőforrás lekapcsolásával a kötés elkezd hűlni és kristályosodni.

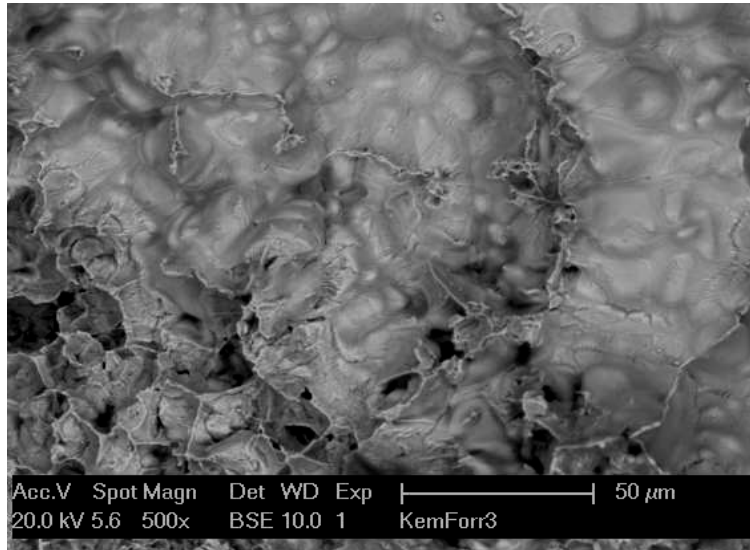
A réz diffúziója a szemcsék határán lényegesen gyorsabb, mint a szemcsékben. Ugyanakkor a szemcsehatár krómban gazdagabb, mint a szemcse (lásd 7. ábra), vagyis kisebb olvadáspontú, ami szintén elősegíti, hogy az oldódás sokkal gyorsabb legyen a szemcsehatáron, mint a szemcsében. A 10. ábrán látható, hogy a szemcsék felületén is megindul az oldódás; miután a réz behatol a szemcsék közé a szemcsehatár mentén, az oldódás felgyorsul, a rés kitágul, és az olvadt forrasztóanyag kitölti az így keletkezett rést.

A fenti értékelésből arra a következtetésre lehet jutni, hogy mivel a forrasztóanyag behatolása a szemcsehatár gyors oldódásával megy végbe, nem arról van szó, hogy az alapanyagban repedés keletkezik, amit kitölt a forrasztóanyag, hanem a likváció révén kis olvadáspontú, vasbázisú szilárd oldat keletkezik. Emiatt a forrasztás során sem szűnik meg a fémes kapcsolat a szemcsék között, és így nem rontja a kötés szilárdságát ez a beoldódás.

Egy másik megközelítés abból indul ki, hogy a szemcsehatármenti reakciók általában a károsodási folyamatok részei. Régóta ismertek a szemcsehatárokkal szoros kapcsolatba hozott különféle elridegési és korróziós jelenségek, amelyek az ausztenites acélok körében kifejezetten gyakori jelenségek. Ezek közé tartozik a fémolvadékok okozta elridegés is. Tekintettel arra, hogy az elridegési folyamatoknak jelentős szívósságcsökkenés a következménye, nyilvánvaló, hogy ennek bekövetkezése méréssel ellenőrizhető. A jelen esetben a szilárdság és a szívósság mérése nem volt kivitelezhető, ugyanis az alkatrész mérete ezt egyszerűen nem tette lehetővé. Nem maradt más lehetőség, mint töretfelületek létrehozása és azok elemzése az elridegésre utaló töretfelületi jelenségek után kutatva.



13. ábra A forrasztóanyag behatolás mentén megszakított minta töretfelületre merőleges metszeti képe

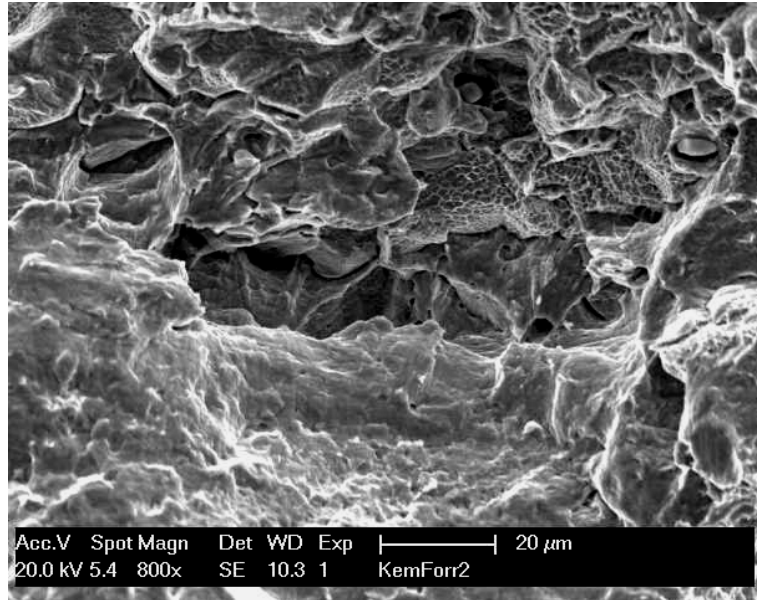


14. ábra A forraszbehatolás mentén elszakított minta teljes mértékben forraszanyaggal borított töretfelülete

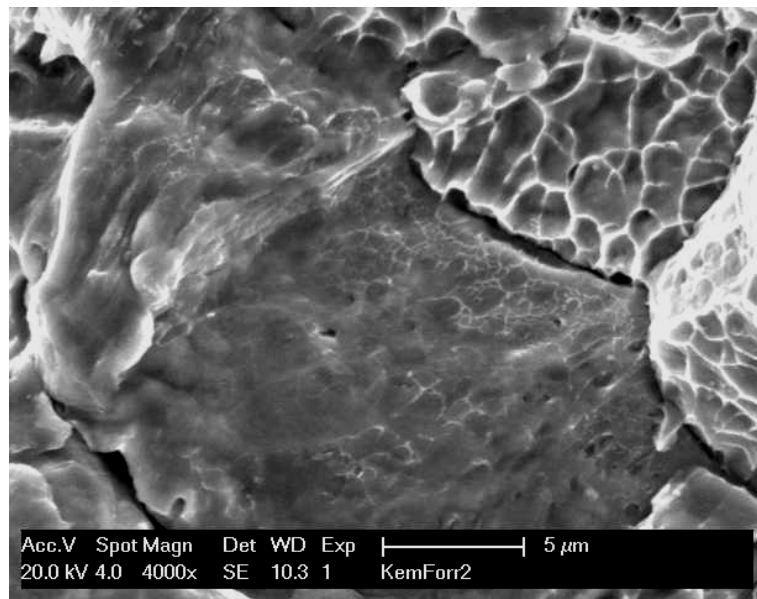
A forraszanyaggal kitöltött „repedések” felszakításával jól vizsgálható töretfelületeket kaptunk. Ahogy várható volt, a felület a szemcsehatárokat burkoló hozaganyag mentén szakadt el egymástól, nem találtunk szabad felületet, ahol az alapanyag felülete a felszínre került volna. A 13. ábra töretfelületre merőleges metszetén látható a minta elszakításakor végbement alakváltozás. A 14. ábra a forraszanyaggal fedett töretfelület egy részét mutatja: a szívós törésre jellemző mikroüregek mellett – meglehetősen nagy felületen – kötésihiányra vagy gyenge adhézióra utalnak a legömbölyödött, szakadási élektől mentes felületdarabok. A döntően az acélból beoldódó Fe, Cr és Ni mennyisége 2,3%, 0,6% és 0,9%.

Ezt követően megvizsgáltuk egy olyan minta töretfelületét is, amely nem a teljesen átfolyt forraszanyag jellemezte kötési zónából lett kivéve, és így nem burkolta a teljes felületet a forraszanyag. Itt kiemelt figyelmet fordítottunk az átmeneti zóna elemzésére. A szemcsehatármenti forraszbehatolásnak abban a zónájában, amely közvetlenül határos volt a forraszanyaggal már nem fedett és rezeset tartalmazó alapanyag-töretfelülettel, többféle jellegzetes fraktográfiai jelenséget figyeltünk meg. A 15-16. ábra a forraszbehatolás határövezetében mutat több olyan fraktográfiai jelenséget, amely a lecsökkent szívósságú anyagokra jellemző.

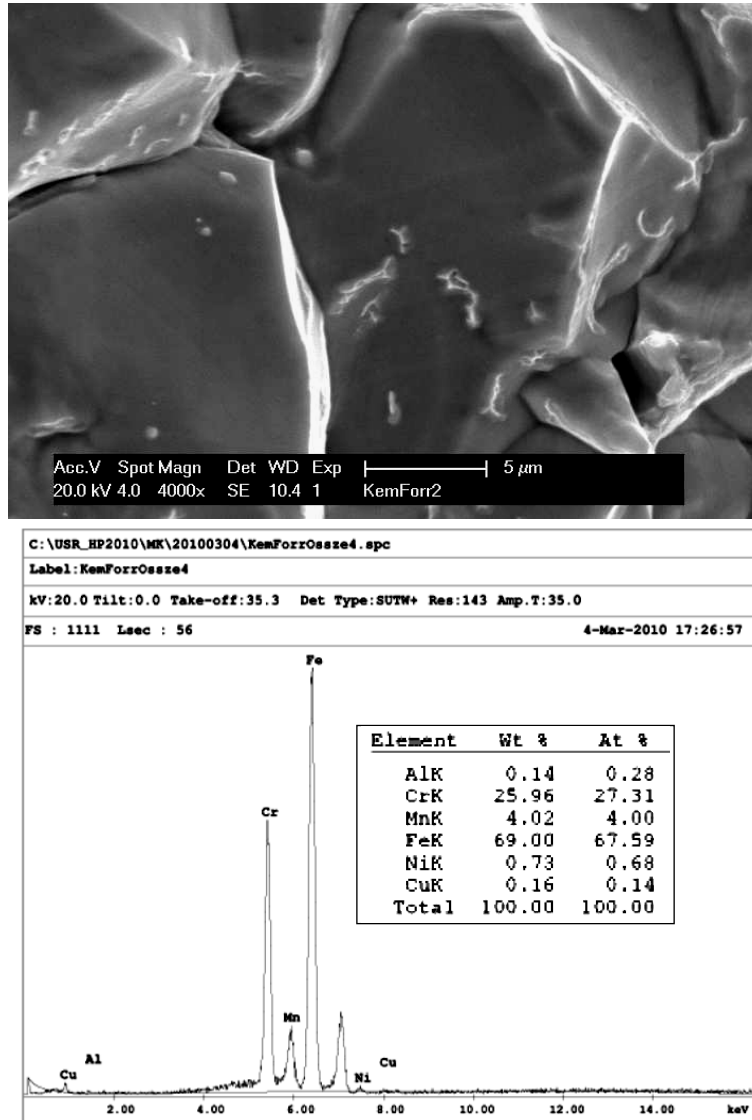
A 17. ábra a forraszbehatolási határzónában keletkezett interkrisztallin töretfelületet mutat: a szemcse felülete tiszta, helyenként forraszanyagnyomok láthatók rajta. A szemcse felületének EDS-analízise igazán meglepő eredménnyel szolgált: a szemcse felületéről gyakorlatilag eltűnt a nikkel, és így a Cr-tartalom relatíve jelentősen megnövekedett. A töréskor feltárult tartománynak fázisátalakuláson kellett átesnie, ausztenitesből ferritessé vált.



**15. ábra** Felszakadások, mikrorepedések és a szemcsehatár kiválásain nukleálódott finom mikroüregek a forraszbehatolás határövezetében. Alul az acél transzkrisztallin töretfelülete



**16. ábra** A 15. ábra részlete: mikrorepedések és a gyenge tapadású fázis leválásának nyomai



17. ábra A forraszbeholás határzónájában keletkezett interkristallin törétfelület és a szemcse felületén mért kémiai összetétel

A korróziós károsodás irányú megközelítésből adódóan tehát a vizsgált jelenséget úgy tekinthetjük, mint az ausztenites acélok korróziós károsodásának egyik sajátos fajtáját: a fémolvadékok által okozott korróziót, amely gyors helyi elridegést okoz. Ez a károsodás főként a viszonylag kis olvadáspontú fémek – pl. lítium, nátrium, ólom, horgany, alumínium – olvadékával való tartós érintkezés esetén bekövetkező leromlási folyamatokat jelenti, de a forrasztott kötések létre-

hozatalakor sok vonatkozásban hasonló vagy közel azonos feltételek alakulnak ki. A fémolvadékok okozta korrózióknak többféle egyedi változata különíthető el, azonban a legtöbb esetben ezek együttesen jelentkeznek. Az egyes változatok a következők:

- az acél–fémolvadék határfelület közvetlen oldódása,
- az acél–fémolvadék határfelület oldódása az acél felületi atomjai által kiváltott felületi reakcióval,
- az acél–fémolvadék határfelület oldódása az olvadék vagy az abban lévő szennyezők atomjai által kiváltott felületi reakcióval,
- az acél–fémolvadék határfelület oldódása a szemcsehatármenti korrózióval,
- a szennyező és az interszticiós komponensek reakciói,
- ötvöződés,
- vegyületfázisok redukciója.

Magát a fémolvadékok okozta korróziós folyamatot számos tényező befolyásolja, amelyek közül a legfontosabbak a következők:

- a szilárd fázis kémiai összetétele, különösen tekintettel a szennyezőkre (pl. S, P, Bi, As, Sb)
- a fémolvadék szennyezőtartalma
- az acél feszültségállapota; a többi elridegési jelenséghez hasonlóan a fémolvadékok okozta elridegés is a feszültségi korrózió közeli rokona
- a fémolvadék hőmérséklete, a hevítési és hűlési viszonyok
- a fémolvadékkal való érintkezés időtartama
- a fémolvadék mozgásállapota
- a szilárd fázis fém vagy ötvözet mivolta; az ötvözetekből a fémolvadék szelektíven képes kioldani egyes komponenseket, amelynek akár fázisátalakulás lehet a következménye, pl. a nikkelt vesztő ausztenites acél ferritessé válhat.

A fentiekben bemutattuk, hogy a töretfelületek vizsgálatával több olyan jellegzetességet is találtunk, amelyek tipikusan a szemcsehatárokhoz kapcsolódó elridegési folyamatok sajátjai. Azt, hogy mindezen kárelemzési tapasztalatok után a vizsgált kötés mechanikai és korróziós tulajdonságai milyenek, kísérletekkel kívánjuk alaposabban megismerni a jövőben.

#### **Irodalomjegyzék**

- [1] Heiple C, Bennett W, Rising T: Embrittlement of Several Stainless Steels by Liquid Copper and Liquid Braze Alloys. *Materials Science and Engineering*, 52 (1982:3) 277-289
- [2] Shipley RJ, Becker WT (szerk): *ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention*. ASM International, Materials Park, 2002
- [3] Gillman TH, LeMay I: Mechanical and Electrical Failures Leading to Major Failures. *Engineering Failure Analysis* 14 (2007) 995-1018
- [4] Heat Resistant Alloys. *Bulletin 401, Rolled Alloys, Temperance 2006*
- [5] Avallone EA: *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineering, Section 6 Materials of Engineering*. C.H.I.P.S. Weimar, 2006

- [6] Clancy HM: Incidents of Corrosion on Manned Spacecraft - their Cause and Prevention. In: Proceedings of "E 1974 Triservice Corrosion of Military Equipment, Volume I. Sessions I through III, pp. 121-158
- [7] Maciejewski J: Liquid Metal Induced Embrittlement in Fuel Line Braze Joints. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 5 (2005:2) 55-60
- [8] Petersen B: Guideline of Water Quality for Copper Brazed Plate Heat Exchangers. *Danfoss District Heating*, Danfoss 08/2009
- [9] Furtado HC, LeMay I: High Temperature Degradation in Power Plants and Refineries. *Materials Research*, 7 (2004:1) 103-110
- [10] Bődök K: Az ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött korrózióálló acélok korrózióállósága, különös tekintettel azok hegeszthetőségére. *Corweld*, Budapest, 1997
- [11] Davies JR (szerk): *ASM Specialty Handbook, Stainless Steels*. ASM International, Materials Park, 1994
- [12] Davies JR (szerk): *ASM Metals Handbook, Volume 6. Welding, Brazing and Soldering*. ASM International, Materials Park, 1993
- [13] Lai GY: *High-Temperature Corrosion and Materials Applications*. ASM International, Materials Park, 2007
- [14] Clegg RE, Jones DRH: Liquid Metal Embrittlement in Failure Analysis. *Materials Science*, 27 (1992:5) 453-459
- [15] Jacobson DM, Humpston G: *Principles of Brazing*. ASM International, Materials Park, 2005
- [16] Philip C: *Assemblage par Brasage*. ENSAM, 2007
- [17] *Le brasage des aciers inoxydables austénitiques - Corrosion interfaciale et choix des métaux d'apport*. CETIM, Senlis, 2007