

GODZSÁK MELINDA – PEKKER PÉTER – CORA ILDIKÓ – VERES ZSOLT

## Auszténites karbonitridálás során keletkező köztes rétegek vizsgálata

Az Fe-N rendszer eutektoidos hőmérséklete (592 °C) felett végzett nitridáláskor a vegyületi réteg alatt egy köztes réteg, nitroauszténit alakulhat ki, amely lassú hűtés közben, az eutektoidos hőmérsékleten braunittá alakulhat át. Az így képződő kétfázisú szövetelem – a braunit – térben középpontos kockarácsú  $\alpha$ -vasból és  $Fe_4N$  vas-nitrid vegyületből ( $\alpha + \gamma'$ ) álló eutektoid. Kísérleteink során 100Cr6 és C105U anyagminőségű acélokat karbonitridáltunk az eutektoidos hőmérséklet felett. Vizsgáltuk a keletkező köztes rétegek kialakulásának feltételeit és tulajdonságait, szövetszerkezetüket, valamint a nitrogén és karbon eloszlását a mintákban. Ezeket fénymikroszkópos (LOM)-felvételek, mikrokeménység-mérés, röntgendiffrakció (XRD)-, pásztázó elektronmikroszkópos (SEM)- és transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM)-vizsgálatok és ködfénykísüléssel optikai emissziós spektrometriás (GD-OES)-mérések segítségével végeztük.

### Bevezetés

Az acélok termokémiai kezelésén belül, az Fe-N rendszer eutektoidos hőmérséklete felett zajló karbonitridálás és az azt követő lassú hűtés eredményeként, a vegyületi réteg alatt kialakuló braunitréteg keveset kutatott terület. Ez többek közt annak tulajdonítható, hogy ezt az emelt hőmérsékletű, ún. auszténites karbonitridálást az iparban ritkán alkalmazzák. Ha a nitridálást az eutektoidos hőmérséklet felett végezzük, akkor a kezelés utáni hűtés módjától függően nitroauszténit vagy braunit köztes

réteg alakulhat ki a vegyületi réteg és a diffúziós zóna között. Megfelelően gyors hűtésnél a hőkezelés során keletkezett nitroauszténit auszténit marad, lassú hűtés esetében pedig braunitréteg alakul ki a vegyületi réteg alatt. Elvégzett kísérleteinkkel célunk volt a köztes réteg kialakítása és tulajdonságainak vizsgálata.

### A nitroauszténit köztes réteg képződése

Az auszténit alakulás hőmérséklete alatt történő karbonitridálás esetén ferrites karbonitridálásról, felette

auszténites karbonitridálásról beszélünk. Az átalakulás határhőmérséklete a kezelendő alapanyag összetételétől jelentősen függ. *Du* termodinamikai számításai [1] szerint ötvözetlen acél esetében a legalacsonyabb hőmérséklet, amely változást okoz, 586 °C. *Isabella Flodström* eredményeiből [2] megfigyelhető, hogy az 592 °C fölé növelt karbonitridálási hőmérsékletnek és a nitrogénnek a mátrixban történő dúsulása következtében a mátrix egy része átalakul auszténitté. Az auszténites gázközegű karbonitridálást követően a mikroszerkezet négy régióból fog állni. A vegyületi réteg  $\varepsilon$ - és  $\gamma'$ -fázist ( $Fe_4N$ ) tartalmaz, amely a felületen alakul ki. A vegyületi réteg alatt egy nitrogénben és karbonban gazdag auszténitréteg képződik, ez alatt van a diffúziós zóna, és a nem módosult alapanyag. *Kristian Vinter Dahl* kísérleteiben [3] többek között azt is megállapította, hogy a nitridképző ötvözők mennyiségének növekedésével nő az átalakulás hőmérséklete. 8,5 tömegszázalék nitridképző elemet (Cr, Mo, V) tartalmazó acélnál nem figyelhető meg auszténitréteg 640 °C-os nitridálást követően sem. 15 tömegszázalék nitridképző elemet tartalmazó acélnál pedig még 700 °C-os nitridálás esetén sem alakul ki köztes réteg. Megjegyezte, hogy néhány esetben, amikor nem sikerült kellően gyorsan hűtenie a mintákat a nitridálást követően braunit ( $\gamma' + \alpha$ ) kétfázisú szövetelem alakult ki.

### A braunit köztes réteg képződése

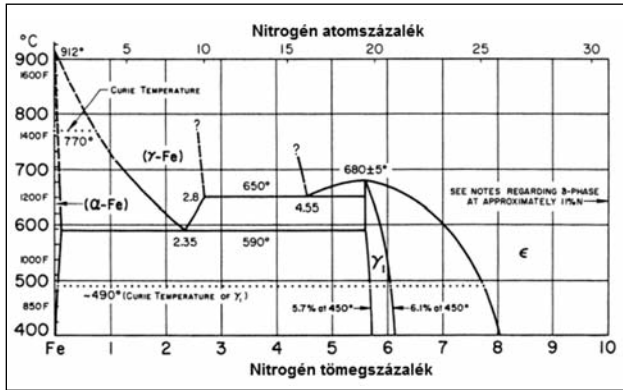
Ha az emelt hőmérsékletű karbonitridálást követően kellően lassan hűlnék le a hőkezelt darabok, akkor a vegyületi réteg és a diffúziós zóna

**Godzsák Melinda** 2007-ben diplomázott okleveles közgazdászként az osztatlan ötéves képzésben a Miskolci Egyetem Gazdaságtudományi Karán. 2011 decemberében BSc, majd 2012 decemberében MSc anyagmérnök diplomát szerzett öntész-hőkezelő, illetve hőkezelő-anyagvizsgáló szakirányon a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán. 2013 őszétől a Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola doktorandusz hallgatója, kutatási területe acélok gázközegű karbonitridálása a Fe-N rendszer eutektoidos hőmérséklete felett.

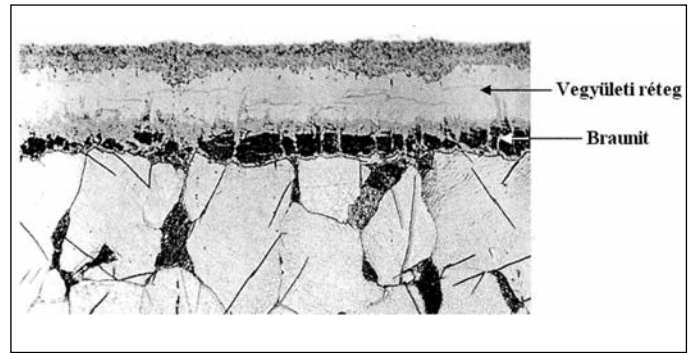
**Pekker Péter** szakmai életrajzát 2012/5. számunkban közzöltük.

**Cora Ildikó** 2009-ben diplomázott okleveles geológusként az ELTE TTK-n, geológus szakon. 2014-ben szerzett PhD doktori fokozatot az ELTE Földtudományi Doktori Iskolában, mineralógia szakterületen, *summa cum laude* minősítéssel. Jelenleg az MTA EK MFA Vékonyréteg Fizikai Osztályán dolgozik tudományos munkatársként.

**Veres Zsolt** szakmai életrajzát 2012/5. számunkban közzöltük.



■ 1. ábra. Fe-N fázisdiagram [4]



■ 2. ábra. C15-ös acél 650 °C-os gázközegű karbonitridálás, valamint lassú hűtés után kialakult felületi kéregszerkezete, braunnittal a vegyületi réteg alatt, Nitál-ban maratva, N = 1000x [6]

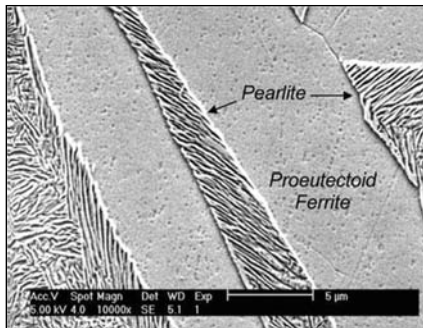
között kialakul a braunit szövet. Ahogyan az 1. ábra Fe-N fázisdiagramján [4] látható, a braunit az  $Fe_4N$ -és az  $\alpha$ -fázis eutektoidja, amely az Fe-N rendszer eutektoidos hőmérséklete felett (592 °C) elvégzett (karbo)nitridálást követő lassú hűtés eredményeként képződik 2,35 tömegszázalék nitrogéntartalomnál, amely irodalmi adatok alapján akár 50-60  $\mu m$  vastagságú is lehet [5]. A 2. ábrán braunit köztes réteg látható [6].

Celik és társai [5] kutatásaikból megállapították, hogy azonos hőkezelési hőmérsékleten, de növekvő hőkezelési időnél csökken a kialakult braunitréteg vastagsága (600 °C –

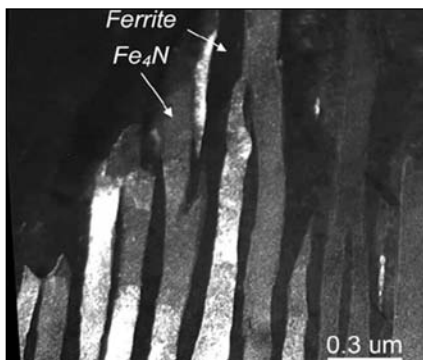
1 óra: 50-60  $\mu m$ , 600 °C – 8 óra: 20-30  $\mu m$ ). Fattah és Mahboubi [7] a mikroszerkezeti és röntgendiffrakciós vizsgálati eredményeikből megállapították, hogy 592 °C felett végzett karbonitridálást követő lassú hűtés esetén braunit köztes réteg alakul ki. Speciális, rétegenkénti röntgendiffrakciós (XRD) mérést is készítettek. Előbb a felszint, majd 15, 25 és 29  $\mu m$ -re a felülettől vizsgálták a mintát, 29  $\mu m$  mélyen  $Fe_4(N,C)$ - és  $\alpha$ -Fe-fázist detektáltak a 620 °C-on hőkezelt próbán, mely braunit jelenlétére utal. Xiong kutatásaiban [8] az Fe-N rendszer eutektoidját, a braunitot vizsgálta elektronmikroszkópia segítségével, melyet  $\delta$  az Fe-C rendszerhez hasonlítva nitrogén perlitnek nevez. Megállapította, hogy a ferritben szigetenként alakul ki a lemezes perlit (3. ábra), amely nem más, mint a  $\gamma' + \alpha$ . Ezt TEM-vizsgálattal támasztotta alá, amelyben sötét látóterű felvételen egyértelműen meg tudta különböztetni a ferrit mátrixot és a lemezes  $Fe_4N$  vas nitridet (4. ábra), amelyek váltakozva helyezkedtek el. A vas-nitrogén állapotábra alapján kimondta, hogy ez a  $\gamma' + \alpha$  szövetelem, tehát a braunit.

a 100Cr6 és C105U jelű acélokkal végzett kísérleteket és a mérések eredményeit mutatjuk be. A két anyagminőség szabvány szerinti összetétele az 1. táblázatban látható.

A karbonitridálási kísérleteket a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet SLR-150 típusú aknás gáznitridáló kemencéjében végeztük. A 3,5 órás karbonitridálás során az üzemi nitrogént 200 l/h, az ammóniát 200 l/h, a szén-dioxidot pedig 10 l/h térfogatárammal juttattuk a kemencéjébe. Az ausztenites karbonitridálási kísérletek utolsó fázisát, a mintadarabok hűtését különféle hűtőközegekben hajtottuk végre. A darabok egyik részét gyorsan, olajban, egy másik részét lassan, levegőn, egy harmadik részét még lassabban, a kemencével együtt hűtöttük le. Célunk volt a különböző hűtési erélyesség hatására kialakuló köztes réteg vizsgálata. Azonban az eltérő hűtési sebességek nem voltak megfelelően mérve és kontrollálva, ezért a hűtési sebesség hatását a kialakult szerkezetre jelen cikk nem tárgyalja.



■ 3. ábra. Lemezes szerkezetű nitrogén perlit, körülötte ferrit ( $\alpha$ -vas), N=10000x [8]



■ 4. ábra. Sötét látóterű TEM-felvétel  $Fe_4N$ -kiválásról, valamint ferritről [8]

## Vizsgálati eredményeink

### Karbonitridálás során kialakuló rétegrend

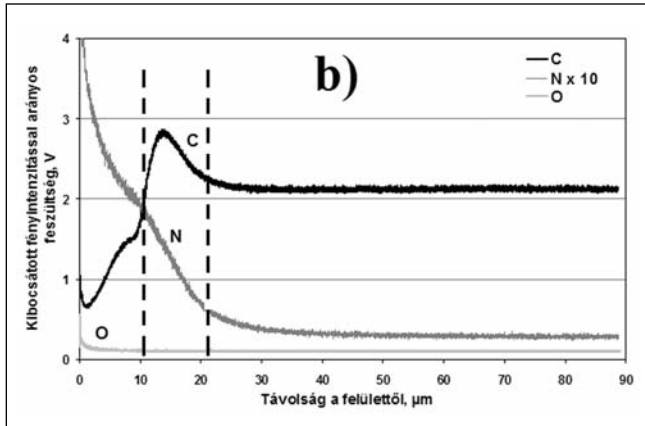
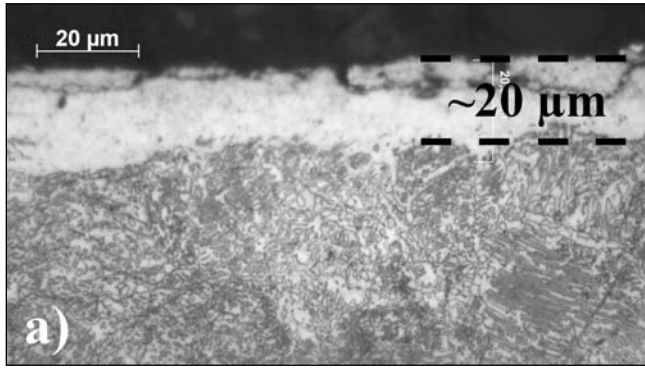
Kísérleteink elsődleges célja volt olyan emelt hőmérsékletű karbonitridálás elvégzése, amely eredményeként köztes réteg alakul ki a vegyüle-

### Gázközegű karbonitridálási kísérleteink paraméterei

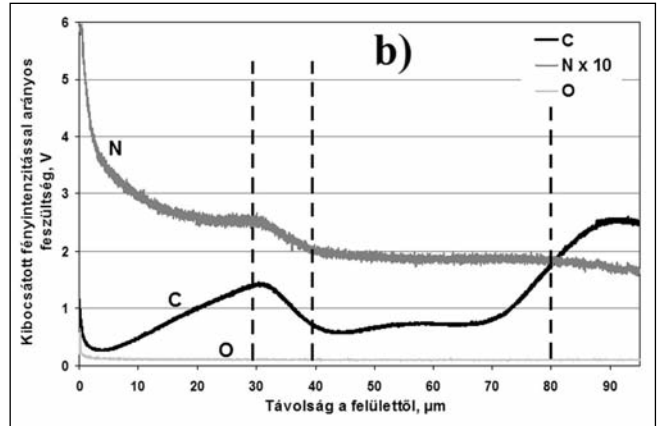
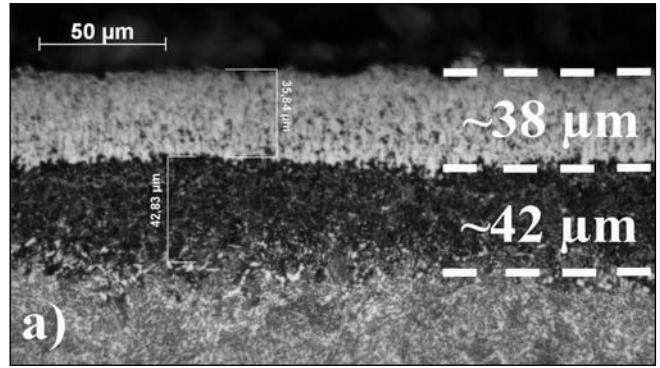
A köztes réteg vizsgálatához ausztenites karbonitridálással állítottuk elő a próbadarabjainkat. Jelen cikkünkben

1. táblázat. A kísérletekhez használt acélok szabvány szerinti összetétele m/m%-ban

Anyagminőség	C	Si	Mn	Cr	Fe
1.3505 (100Cr6)	1,00	0,3	0,3	1,5	96,9
1.1545 (C105U)	0,95-1,04	0,15-0,35	0,15-0,35	≤ 0,030	98,75-98,23



■ 5. ábra. C105U anyagminőségű 550 °C-on, 6 órán keresztül karbonitridált, kemencében hűlt mintadarab fénymikroszkópos felvétele, N = 1000x (a) és GD-OES mélységprofilja (b)



■ 6. ábra. C105U anyagminőségű 640 °C-on, 10 órán keresztül karbonitridált, kemencében hűlt mintadarab fénymikroszkópos felvétele, N = 500x (a) és GD-OES mélységprofilja (b)

ti réteg és a diffúziós zóna között. A megfelelő összehasonlítás érdekében végeztünk nem emelt hőmérsékletű karbonitridálást is. Az így kapott darabok fénymikroszkópos felvételein látható az eltérő rétegrend. Míg az 550 °C-on karbonitridált minta fénymikroszkópos felvételén (5a ábra) csak a vegyületi réteg és alatta a diffúziós zóna, addig a 640 °C-on karbonitridált mintánál (6a ábra) a két réteg között a kialakult köztes réteg is megfigyelhető. A ferritesen és ausztenitesen karbonitridált próbákon GD-OES mélységprofil elemzést végeztünk a nitrogén és a karbon darabon belüli eloszlásának vizsgálatára. A Metallurgiai és Öntészeti Intézet Horiba Jobin Yvon – GD Profiler2 típusú berendezésével, valamint a hozzá tartozó profilométer segítségével készített mélységprofilokon a vizsgált elemek százalékos mennyiségével arányos jel látható a darab felületétől mért távolság függvényében. A jobb szemléltetés érdekében a nitrogéngörbék értékeit tízszeresére nagyítottuk.

Az 5b ábrán egy ferritesen karbonitridált darabról készült GD-OES mélységprofil látható. Megfigyelhető,

hogy ~10 μm-es porlasztási mélységben, a porózus ε és a tömör γ'-fázisok határán mind a nitrogén, mind a karbon görbéjének lefutásában törés van. A felülettől ~20 μm-re a nitrogén és a karbon mennyisége közel az alap mátrixban található mértékűre csökken, amely megegyezik a fénymikroszkópos felvételen mért vegyületi réteg vastagságával (5a ábra). A diffúziós zóna végére a két elem mennyisége eléri a kezelés előtti értéket.

Ezzel szemben a 6b ábrán, ahol egy ausztenitesen karbonitridált darabról készült GD-OES mélységprofil látható, a görbék lefutása eltérő. A felülettől mért ~28 μm mélységig a profil hasonló jelleget mutat, mint az előző ferritesen karbonitridált próba felületi ~10 μm-es rétege. Ezután az előző darabhoz képest egy vékonyabb, ~10 μm vastag γ'-réteg következik. A vegyületi réteg alatt ~42 μm vastag köztes réteg helyezkedik el, melyet a mélységprofil szintén mutat (ezen a mintán a köztes réteg braunit). Ugyanis amikor a porlasztás másik rétegbe ér át, változik a kémiai összetétel, azzal együtt megváltozik a kibocsátott fény intenzitása is, így különíthetők el a rétegek.

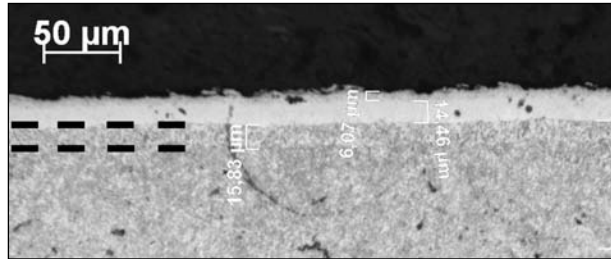
Mivel mind a nitrogén, mind a karbon interstíciósan oldódó elem, jól megfigyelhető, hogy a felülettől az anyag belseje felé haladva a nitrogén diffúziójával a karbon mennyisége folyamatosan nő (kvázi felhalmozza maga előtt a karbon a nitrogén), majd a nitrogén koncentrációjának csökkenésével (a diffúziós zóna végén) a karbon görbéje is beáll egy konstans értékre, melyet az acél eredetileg tartalmazott.

### A kialakult köztes réteg

Az ausztenites karbonitridálás során, a vegyületi réteg alatt kialakuló nitroausztenit-réteg az eutektoidos hőmérsékleten braunit szövetté alakulhat át. Ha a hűtés sebessége megfelelően kicsi, elegendő idő áll rendelkezésére a diffúzióknak ahhoz, hogy braunit keletkezzen. Ha ez a sebesség egy határértéknél nagyobb, az ausztenit nem alakul át, szobahőmérsékleten is megmarad.

Kísérleteink során többféle köztes réteget állítottunk elő. Nagy hűtési érellyesség esetén a nitroausztenit nem alakult át, a fénymikroszkópos vizsgálatok során világos színű volt (7. ábra).

Kiseb hűtési erélyesség esetén közvetlenül a vegyületi réteg alatt még mindig megmaradt az ausztenit, de a köztes rétegnek a darab belseje felé eső része átalakult braunittá (8. ábra). A még kisebb hűtési sebesség esetén pedig a teljes köztes réteg homogén braunit lett (9. ábra).



■ 7. ábra. 100Cr6 anyagminőségű, 620 °C-on, 3,25 órán keresztül karbonitridált, olajban hűlt minta fénymikroszkópos felvétele (N = 200x)

oxidréteg ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , magnetit) és térben középpontos  $\alpha$ -vas. Ezen vizsgálati eredményekből arra következtettünk, hogy a vegyületi réteg alatt lévő ferrit és  $\gamma'$  vas-nitrid braunit szövetet alkot ( $\alpha + \text{Fe}_4\text{N}$ ).

Az XRD-mérések eredményeit megerősítendő végeztünk transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatot is a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet FEI

### A braunit szerkezete

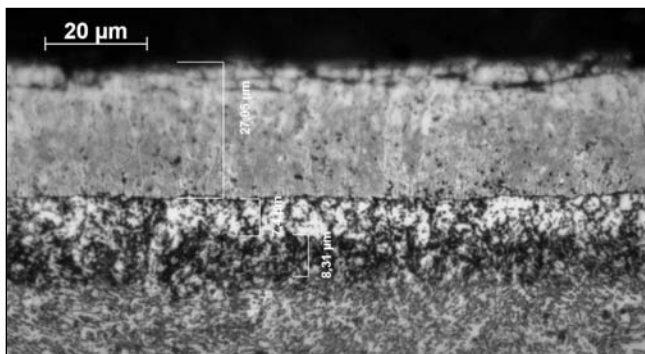
A keletkezett braunitot többféle módon vizsgáltuk. A 10a ábrán az 500x-os nagyításban elkészített pásztázó elektronmikroszkópos kép mutatja a kialakult köztes réteget. Az előzőtől lényegesen nagyobb nagyításban (N = 3500x) már jól láthatók a vegyületi réteg alatti, ferrit mátrixú köztes rétegben elhelyezkedő lemezszerű kiválások (10b ábra), amelyek az  $\text{Fe}_4\text{N}$  vas-nitrid ( $\gamma'$ ) jelenlétére utalnak, ahogyan arról Xiong is említést tesz kutatásában [8]. Ezek alapján pedig arra következtethetünk, hogy a magas hőmérsékletű és lassú

hűtésű karbonitridálásunk eredményeként braunit köztes réteget állítottunk elő.

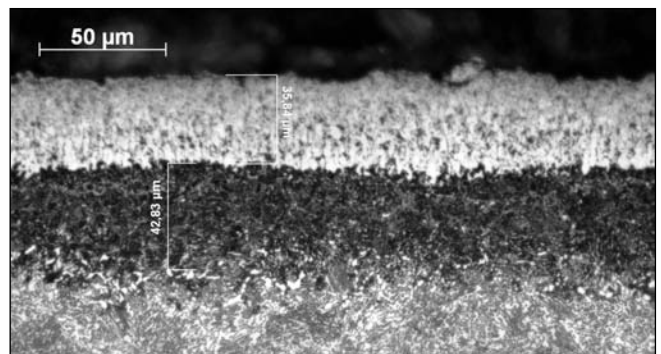
A kialakult köztes réteget alkotó fázisok azonosítása érdekében végeztünk XRD-méréseket is. A Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Bruker D8 Advance típusú röntgenberendezése 40 kV gyorsítófeszültséggel, 40 mA csőárammal és kobalt csővel működött. A detektor az adatokat 0,05°-onként és 10 másodpercenként gyűjtötte.

A 11. ábra röntgendiffraktogramján látható csúcsok a következő fázisokhoz tartoztak:  $\gamma'$  vas-nitrid ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ),  $\epsilon$  vas-nitrid ( $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ ), a felületen vas-

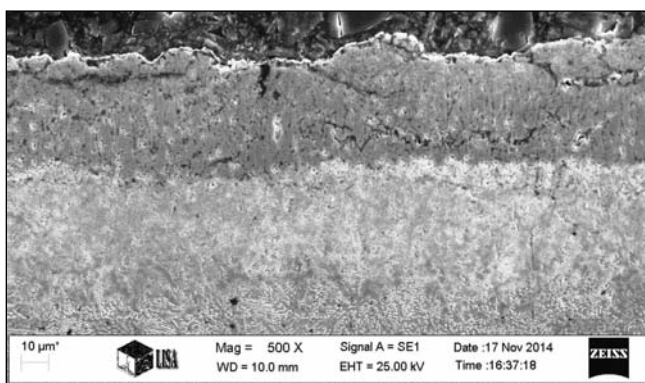
kítási és Nanotechnológiai Intézet FEI Tecnai G2 X-Twin 200 típusú, LaB6 katóddal és EDAX energiadisziperzív spektrométerrel működő berendezésével. A 12. ábrán látható felvételt a 100Cr6 acélminőség 620 °C-on, 2,5 óráig karbonitridált és olajban hűtött mintájáról készítettük, a mikroszkópon azonosított köztes rétegből. A 12a ábrán látható diffrakciós képről megállapítottuk, hogy  $\alpha$ -vasról ( $a_0=2,90(5)$  Å), míg a 12b ábrán egy F-centrált (felületen középpontos), köbös fázisról ( $a_0=3,68(2)$  Å),  $\text{Fe}_4\text{N}$ -ről készült. Tehát az azonosított fázisok braunit szövetelem jelenlétét erősítik meg.



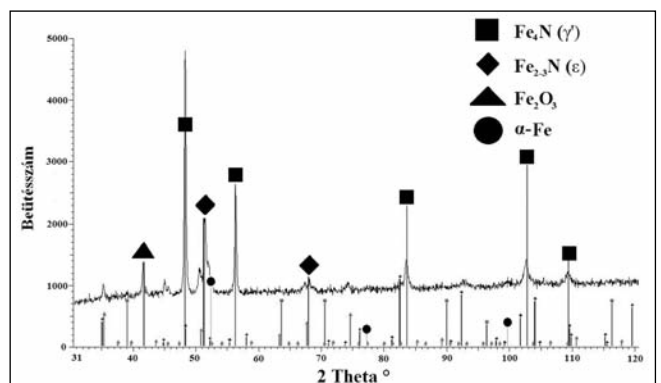
■ 8. ábra. C105U anyagminőségű, 640 °C-on, 2 órán keresztül karbonitridált, levegőn hűlt minta fénymikroszkópos felvétele (N = 1000x)



■ 9. ábra. C105U anyagminőségű, 640 °C-on, 10 órán keresztül karbonitridált, kemencében hűlt mintadarab fénymikroszkópos felvétele, N = 500x



■ 10a ábra. C105U anyagminőségű, 640 °C-on, 10 órán keresztül karbonitridált, kemencében hűlt minta SEM-felvétele (N=500x)

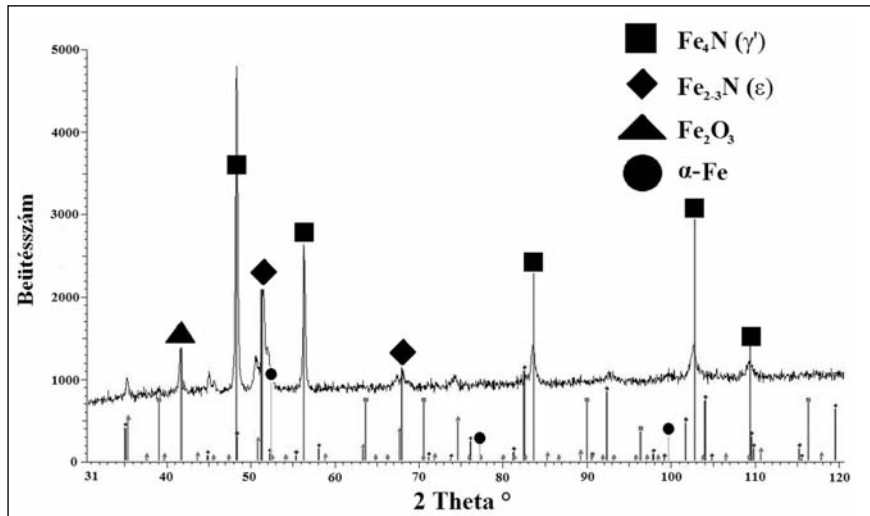


■ 10b ábra. A 10a ábrán látható minta köztes rétegének SEM-felvétele (N = 3500x)

## A vegyületi és a köztes réteg vastagsága, keménysége

Az előkészített karbonitridált darabokon fénymikroszkópos méréseket végeztünk, mely során Axio Vision képelemző szoftver segítségével megmértük a vegyületi és köztes rétegek vastagságát. A 13. ábrán a 100Cr6 mintadarabokon mért vegyületi és köztes réteg vastagságát mutatjuk be. A vegyületi és köztes rétegek vastagsága maximumos görbe szerint alakul, 2,5 órás karbonitridálás után elkezd csökkenni a rétegvastagság. A ferrites alapanyagban a diffúzió gyorsabb, mint a vegyületi rétegben és a köztes ausztenitrétegben. Egy bizonyos vegyületi réteg- és köztes rétegvastagság elérése után a nitrogén a légkörből, és a vas a darab magja felől nem tud kellően gyorsan pótlódni. Ezért ezek a rétegek részben leépülnek. *Fattah és Mahboubi* vizsgálataikban [7] hasonlólt állapítottak meg, miszerint az ugyanolyan hőmérsékleten karbonitridált, de növekvő időtartamú kezeléseknél a köztes réteg vastagsága csökken.

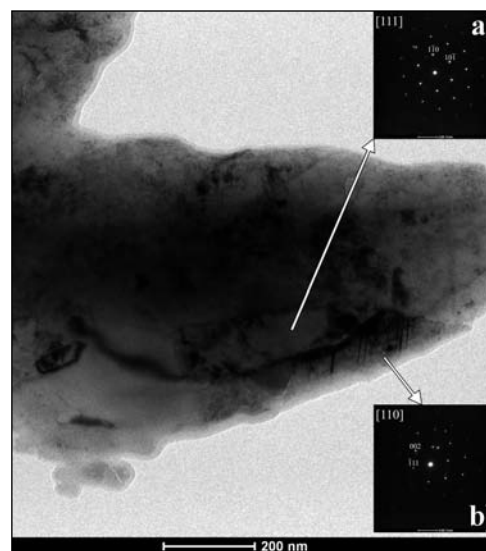
A fénymikroszkópos rétegvastagság-vizsgálatot kiegészítettük a vegyületi és (köztes) braunitrétegek mikrokeménységének mérésével is. A vegyületi rétegek keménysége csökkenő tendenciát mutat a karbonitridálási idő növelésével, ami minden bizonnyal azzal állhat összefüggésben, hogy ez a réteg egyre porózusabbá vált. A köztes rétegek esetén a rétegvastagsághoz hasonlóan maximumos görbe szerint alakul a keménység (14. ábra).



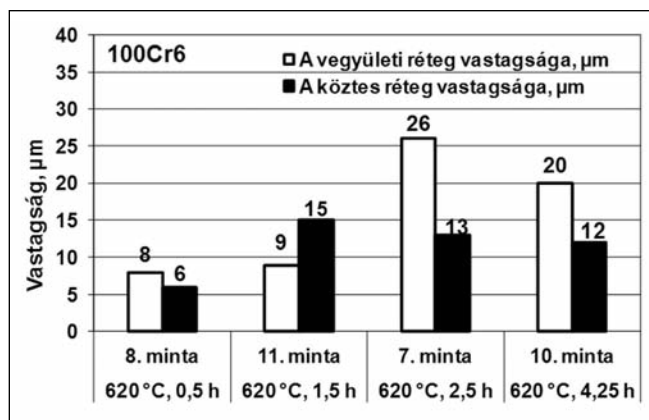
11. ábra. A 100Cr6 anyagminőségű, 620 °C-on 2,5 óráig karbonitridált, olajban hűtött minta diffraktogramja és az azonosított fázisok

A C105U acél mintákon mért vegyületi és (köztes) braunit rétegvastagságok (15. ábra) egy értéktől eltekintve folyamatos növekedést mutatnak. Ez azt igazolja, hogy nem csak a karbonitridálás idejének, de az anyagminőségnek is fontos szerepe van a kialakuló rétegek vastagságában, hiszen eltérő ötvöztéségeknél a diffúzió sebessége is különbözik.

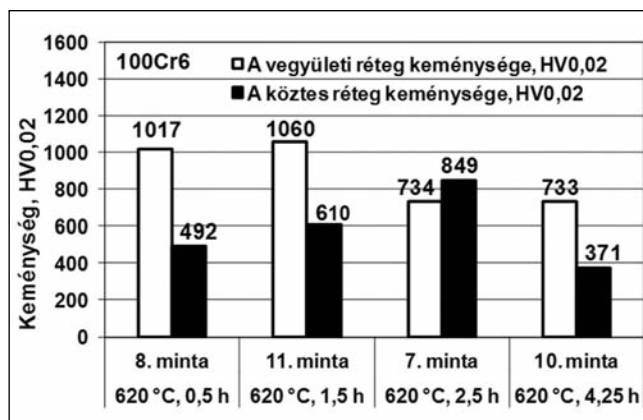
A 16. ábrán a vegyületi réteg keménységének csökkenése figyelhető meg, ezt a vegyületi réteg porozitásának növekvő mértéke okozhatja a karbonitridálási idő növekedésével. A köztes réteg keménysége a karbonitridálási idő növekedésével csökken, hasonlóan a 100Cr6 anyagminőség esetén mértékhez.



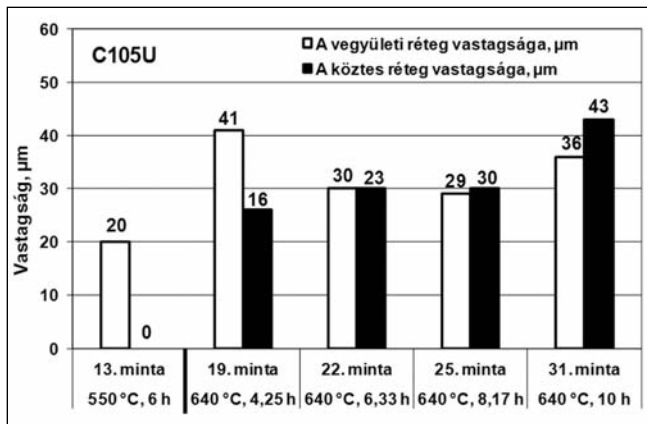
12a, b ábra. A 100Cr6 anyagminőségű, 620 °C-on 2,5 óráig karbonitridált, olajban hűtött minta világos látóterű transzmissziós elektronmikroszkópos képe és a két azonosított fázis indexelt (szelektált területű) diffrakciós képe



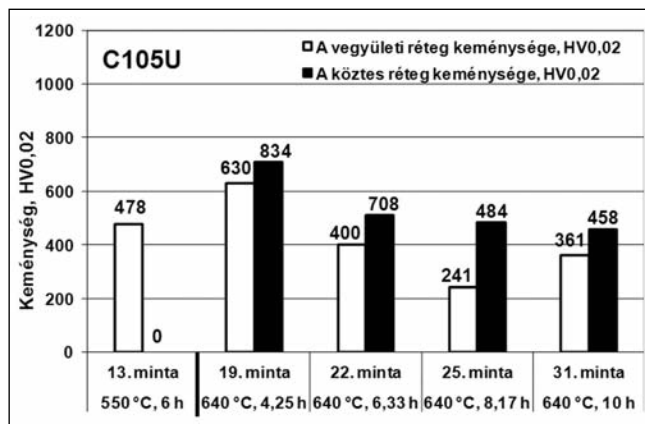
13. ábra. 100Cr6 anyagminőségű acél 620 °C-on, különböző ideig karbonitridált darabjain mért rétegvastagság-értékek



14. ábra. 100Cr6 anyagminőségű acél 620 °C-on, különböző ideig karbonitridált darabjainak vegyületi és köztes rétegen mért keménységértékek



■ 15. ábra. C105U anyagminőségű acél 620 °C-on, különböző ideig karbonitridált darabjainak mért rétegvastagság-értékek



■ 16. ábra. C105U anyagminőségű acél 620 °C-on, különböző ideig karbonitridált darabjainak vegyületi és köztes rétegén mért keménységértékek

## Összefoglalás, következtetések

Kutatásaink során acélok ausztenites karbonitridálását végeztük. A kísérleteket két acélminőségen (100Cr6 és C105U) hajtottuk végre, majd vizsgáltuk az így kapott próbadarabokat. A 100Cr6 anyagminőségénél a gázkezelés idővel (0,5 – 1,5 – 2,5 – 3,25 óra) zajlott, a C105U esetében pedig 550 °C-on 6 óráig és 640 °C-on 2 – 4,25 – 6,33 – 8,17 és 10 óráig. A darabok melegbeágyazása és előkészítése után először fénymikroszkópos felvételeket készítettünk, melyeken rétegvastagságokat (vegyületi és köztes réteg), majd pedig a rétegek Vickers mikrokeménységét mértük. Végeztünk röntgendiffrakciós és transzmissziós elektronmikroszkópos méréseket a kialakult köztes réteget alkotó fázisok azonosítására. A keletkező braunitréteget GD-OES-analízissel és SEM-felvételek segítségével vizsgáltuk. Bár az iparban az emelt hőmérsékletű karbonitridálást ritkán alkalmazzák, viszont a vegyületi réteg és a diffúziós zóna közötti köztes réteg csak így alakítható ki. Mivel pedig elsődleges célunk volt a köztes réteg kialakítása és tulajdonságainak vizsgálata, ezért alkalmaztunk magasabb hőmérsékletű karbonitridálást is. Későbbi kutatásaink során ennek a köztes rétegnek a mechanikai tulajdonságokra, valamint a korrózió- és kopásállóságra való hatását is fogjuk vizsgálni.

Vizsgálataink alapján a következők állapíthatók meg:

1. Az Fe-N rendszer eutektoidos hőmérséklete felett zajló gázkezelés

karbonitridálás, majd az azt követő hűtés során a vegyületi réteg és a diffúziós zóna között köztes réteg alakult ki mindkét anyagminőség esetén.

2. A szakirodalom szerint ennek a rétegnek a típusa attól függ, hogy milyen hűtési módot alkalmazunk. Kísérleteinkkel a 100Cr6 típusú acélminőség esetén a karbonitridálás utáni lassú hűtés alkalmazásával braunit köztes réteget hoztunk létre, melyet az XRD- és TEM-vizsgálatokkal alátámasztottunk.
3. A fénymikroszkópos felvételek alapján a C105U anyagminőségéről elmondható, hogy levegőn történő hűtésekor nem alakult ki homogén braunitréteg, mert a köztes rétegben át nem alakult, vékony ausztenit-réteg is maradt.
4. A karbonitridálási idő növelésével a 100Cr6 acélnál mind a vegyületi, mind a köztes réteg vastagsága és keménysége maximumos görbe szerint alakul. A C105U acél esetében a vegyületi és köztes réteg vastagsága a karbonitridálási idő növelésével nő, a keménysége viszont csökken az általunk vizsgált tartományon belül.
5. A GD-OES mélységprofil-elemzéssel nyomon követhető a karbonitridálás során diffundált nitrogén és karbon eloszlása, a vegyületi réteg vastagsága, valamint a köztes réteg megléte és annak vastagsága. Továbbá láthatóvá vált az a szakirodalomból ismert tény is, miszerint a karbonitridálás során a nitrogénatomok kiszorítják az acél felületi rétegből a karbonatomokat, melyek csak a nitrogén koncentrációjának

lecsökkenése után állnak vissza konstans értékre.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, valamint a Metallurgiai és Öntészeti Intézet munkatársainak.

## Irodalom

- [1] H. Du: A reevaluation of the Fe-N and Fe-C-N systems, Journal of Phase Equilibria, vol. 14, no. 6, pp. 682–693, 1993.
- [2] Isabella Flodström: Nitrocarburizing and High Temperature Nitriding of Steels in Bearing Applications, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2012.
- [3] Kristian Vinter Dahl: Austenitic Nitriding of Iron and Heat Treatable Steel, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2002.
- [4] David Pye: Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing, ASM International, USA, 2003.
- [5] Ayhan Celik, Ihsan Efeoglu, Gürkan Sakar: Microstructure and structural behavior of ion-nitrided AISI 8620 steel, Materials Characterization, 2001.
- [6] Dr.-Ing. Dieter Liedtke und 6 Mitautoren: Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen II.-Nitrieren und Nitrocarburieren, 5. Auflage 2010.
- [7] M. Fattah, F. Mahboubi: Comparison of ferritic and austenitic plasma nitriding and nitrocarburizing behavior of AISI 4140 low alloy steel, Materials and Design 31 – 2010.
- [8] X. C. Xiong, Č A. Redjaimia, Č M. Gouné: Pearlite in hypoeutectoid iron–nitrogen binary alloys, Material Science, 44:632–638, 2009.