

MUCSI ANDRÁS

Alumíniummal csillapított acélszalagok nitridkiválási folyamatai a meleghengerlést követő technológiai műveletek során

Az alumíniummal csillapított, hidegalakításra szánt lágyacélok gyártástechnológiája nagymértékben befolyásolja a végtermék mechanikai és alakíthatósági tulajdonságait. Az egyik leginkább kézben tartandó folyamat a szabad nitrogén megtartása egészen a hideghengerlés végéig, azaz a nitridkiválási folyamatok (főként AlN és komplex nitridek kiválásának) megakadályozása. A nitridkiválás megakadályozásához, illetve csökkentéséhez az acél megfelelő ötvözése, a meleghengerlés közben rövid szűrasközi időtartamok, a meleghengerlés után a szalagok gyors hűtése a csévélési hőmérsékletre, megfelelően alacsony csévélési hőmérséklet és a csévélési után megfelelően nagy lehülési sebesség biztosítása szükséges. A jó alakíthatóság másik kulcsfontosságú feltétele a nitridkiválás előidézése a hideghengerlést követő lágyító hőkezelés során, de még az újrakristályosodás megkezdődése előtt. A felsorolt technológiai műveletek kézbe tartása és a kiváló alakíthatóság elérése megköveteli a nitridkiválási folyamatok kinetikájának ismeretét.

A nitridkiválási folyamat vizsgálata termofeszültség-méréssel

A kiválási folyamatok vizsgálatának igen hatékony módszere a termofeszültség mérése. Sikeresen alkalmazható alumíniumötvözetek homogenizálása közben lejátszódó kiválási-visszaoldódási folyamatok megfigyelésére [1], acélokban a tercier cementit kiválásának követésére [2], az oldott karbon és nitrogéntartalom becslésére [8], valamint az újrakristályosodási folyamatok vizsgálatára is [10].

A acélokban fellépő nitridkiválási folyamatok vizsgálatára számos direkt módszert fejlesztettek ki [3–6], melyek általában alkalmatlanok kis méretű (<5 nm), diszperz eloszlású nitridek mennyiségének meghatározására.

A direkt módszerekkel ellentétben kifejlődtek az indirekt módszerek is, melyek alkalmazásakor a nitridek mennyiségének mérése helyett a szabad nitrogén mennyiségét mérjük, és ebből következtetünk a kivált nitridhányadra.

A szabad, mozgásra képes nitrogén mérésének két alapvető módszere van, a belső súrlódás mérése (internal friction, IF) és a termoelektromos teljesítmény (thermoelectric power, TEP) mérése [7, 8]. A két méréstechnikával (IF és TEP) kapott eredmények igen jó összhangban vannak, viszont a termofeszültség mérésén alapuló módszer egyszerűsége miatt sokkal hatékonyabban alkalmazható. Mivel ezekkel a módszerekkel a nitridek összes

mennyiségét becsüljük tekintet nélkül arra hogy pontosan milyen összetételű precipitátumokról van szó, ezért a továbbiakban is csak a „nitridkiválások” kifejezést használjuk. Ezt többek között az is indokolja, hogy főként alacsony hőmérsékleten inkább komplex alumínium-krómnitridek [3] keletkeznek, melyek a hőmérséklet növelésével azután sokszor átalakulnak alumínium-nitriddé vagy (gyakran rácsátalakulás kíséretében) más komplex nitriddé [7]. Emiatt hiba lenne például kizárólag alumínium-nitrid vagy alumínium-krómnitridekről és azok kiválási folyamatairól beszélni.

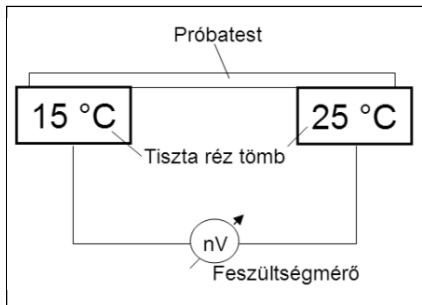
A termoelektromos teljesítmény (TEP) mérése során a huzal, vagy keskeny szalag alakú mintát két különböző hőmérsékletű nagy hőkapacitású rézblokk közé helyezzük (1. ábra). A két rézblokk között keletkező feszültség a minta mikroszerkezeti jellemzőivel és a hőmérsékletkülönbséggel lesz arányos.

A mintára jellemző termoelektromos teljesítmény (thermoelectric power, TEP) a két rézblokk között mérhető termofeszültség (ΔU) és a hőmérsékletkülönbség (ΔT) hányadosa [7–10]:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta T} \quad (1)$$

A termoelektromos teljesítmény (TEP) mértékegysége V/K ($V/^\circ C$), illetve ennek különböző prefixumokkal ellátott változatai: $\mu V/K$ ($\mu V/^\circ C$) és nV/K ($nV/^\circ C$). (Itt meg kell jegyezni, hogy a magyar irodalomban elterjedt termoerő, illetve termoelektromos erő kifejezés helyett mi az angolszász irodalomban kizárólag elterjedt termoelektromos teljesítmény, thermo-

Mucsi András a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem PhD-hallgatója, gépészmérnök BSc-diplomáját az Óbudai Egyetemen gyártástechnológus szakon 2010-ben, míg MSc-fokozatát gépészmérnök szakon, anyagtechnológia szakirányon a BME-n szerezte 2012-ben. Jelenleg az Óbudai Egyetem munkatársa, ahol kutatási és oktatási területe a hőkezelés és képlékenyalakítás témaköréhez kapcsolódik.



■ 1. ábra. A termofeszültség-mérő készülék blokkvázlata

electric power, TEP kifejezést használjuk, mivel ez a szóösszetétel korrektebb módon fejezi ki ennek a mennyiségnek a mivoltát.)

Megállapítható, hogy S értékét különböző termikus és mechanikai hatások befolyásolják. S értéke képlékeny alakítás hatására csökken [9], lágyítás hatására nő [10]. Ha az atomrácsban oldott atomok kiválnak a szemcsehatárra, a rácsot torzító atomok mennyisége csökken, emiatt a TEP nő [2, 7, 8]. Ugyanakkor, ha az atomok visszaoldódnak a mátrixba a rácsot torzító atomok mennyisége megnő, azaz a termoelektromos teljesítmény ismét csökken. Összességében azt lehet mondani, hogy minél inkább torzult a vizsgálandó anyag rácsszerkezete, annál kisebb lesz a mintára jellemző TEP érték. Az oldott atomok mennyiségének termoelektromos teljesítményre gyakorolt hatása (ΔS) között szoros kapcsolat van, melyet a Nordheim-Gorter szabály ír le [15]:

$$\Delta S = \sum C_i \cdot P_i \quad (2)$$

ahol C_i az adott atom termofe-

szültség arányossági tényezője, P_i az adott atom oldott mennyisége tömegszázalékban. Az egyes atomokra vonatkozó arányossági tényezők az 1. táblázatban láthatók [7, 8]:

1. táblázat.

Atom	C	N	Al	Mn	Cr
C_i ($\mu V/(K \cdot wt\%)$)	-45	-24	-30	-3	+3

A nitridkiválási folyamat mérése melegen hengerelt állapotban

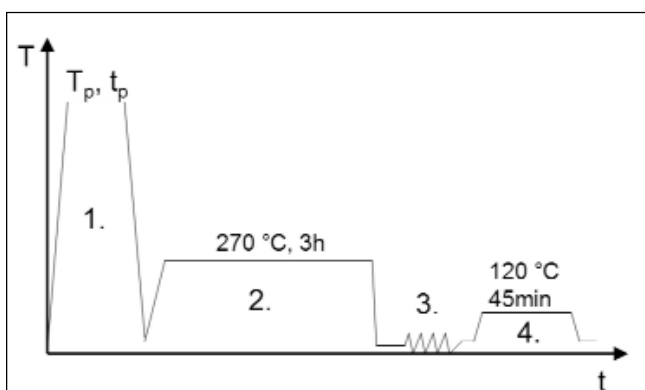
Melegen hengerelt állapotban a nitridkiválás mértékét a szabad nitrogén mennyisége alapján határozzuk meg, ezért az alábbiakban a szabad, mozgásképes nitrogén mérésére szolgáló módszert mutatjuk be (2. ábra) [7]. A mintavétel a melegen hengerelt tekercs végéből, a szalag középvonalából történt. A tekercs átlagos csévélési hőmérséklete 564 °C, mely alapján joggal feltételezhetjük, hogy a nitrogén nagy része oldatban maradt [3, 7]. A nitridkiválás vizsgálatát első lépésben melegen hengerelt állapotban mutatjuk be, ennek érdekében nagy hőmérsékletű izotermikus kísérleteket végeztünk. Magas ($T_p=600-700$ °C) hőmérsékleten t_p ideig végzett izotermikus hőkezelés hatására (1. lépés) valamilyen mértékben végbemegy a nitridkiválási folyamat.

Az 1. számú hőkezelés után második lépésként egy 270 °C-on 3 órán keresztül végzett hőkezelést iktatunk be, melynek célja a karbon egyensúlyi eloszlásának biztosítása a mátrix és a karbidfázis (vas-karbid) között.

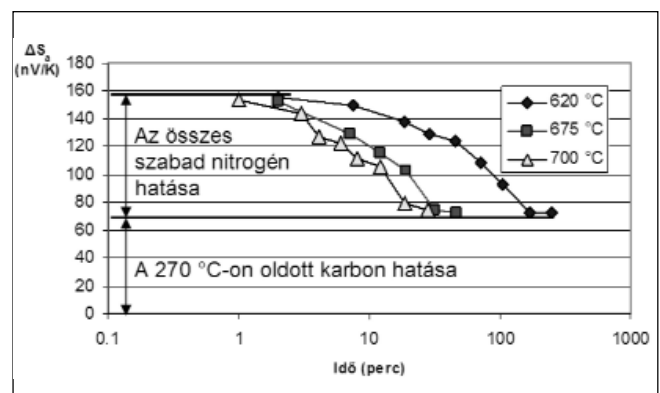
Ez a folyamat ennyi időtartam alatt teljes mértékben végbemegy [7], melyet az is bizonyít, hogy bármilyen előzetes hőkezelés után egy 270 °C-on végzett hőntartás során a termo-

feszültség 1,5-2,5 óra után már nem változik: az összes, ilyen hőmérsékleten lehetséges diffúziós folyamat végbemegy ennyi idő alatt, beleértve a karbonatomok egyensúlyi eloszlását is. Nitridkiválás végbemenetele ezen az alacsony hőmérsékleten nem lehetséges a nitrogénnel vegyületet alkotó nagyobb tömegű (általában szubsztitúciós) atomok alacsony diffúzióképessége miatt [11]. A 270 °C-on 3 óráig végzett hőkezelés végén víz-hűtést kell alkalmaznunk, mely arra szolgál, hogy a karbon eloszlását „befagyasszuk”. Ezzel a hőkezeléssel tehát minden mintában a mátrixban oldott karbon mennyiségét T_p -tól és t_p -tól (azaz az előzetes hőkezeléstől) független értékre hozzuk. A harmadik lépésben hideghengerelés következik, melynek hatásaként igen sok új diszlokáció keletkezik. Ennek a hideghengerelésnek (2. ábra 3. részfolyamat) a mértékét 60-80%-ra érdemes választani [7]. Ekkor mérjük meg a minta TEP értékét, melyet S_2 -nal jelölünk.

Ezután következik egy 120 °C-on legalább fél óráig végzendő hőkezelés, melynek célja az, hogy a mátrix-



■ 2. ábra. A nitridkiválási folyamat méréseinek lépései melegen hengerelt kísérleti anyagon



■ 3. ábra. A ΔS_a értékek változása a hőkezelési hőmérséklet és idő függvényében [16]

ban intersztíciósan oldott atomok (jelen esetben C és N) a mátrixból a diszlokációk környezetébe vándoroljanak. Ebben az ún. öregített állapotban is megmérjük a termoelektromos teljesítményt, melyet S_a -val jelölünk. Az öregedési folyamat nagy diszlokációs-sűrűség (nagyértékű hideghengerlés) esetén igen gyorsan végbemegy. Az intersztíciós atomok a mátrixból a diszlokációk környezetébe történő vándorlásuk után tehát nem a rácspan, intersztíciósan lesznek oldva, hanem a diszlokációk környezetében foglalnak helyet. Mivel a diszlokációk környezetében a kisméretű intersztíciós atomok gyakorlatilag alig torzítják a rácsot, emiatt a termosterűzésre gyakorolt hatásuk is elenyésző. Ez az oka annak, hogy az öregítés utáni termosterűzés érték (S_a) nagyobb lesz, mint a hideghengerlés után mérhető (S_g). A kettő közötti különbség fogja hordozni az információt az oldott C és N atomok mennyiségéről, melyet jelölünk ΔS_a -val:

$$\Delta S_a = S_a - S_g \quad (3)$$

Közvetlenül a hidegalakítás után a mátrixban még oldva van a 270 °C-os hőkezelés során feloldott és „befagyasztott” karbon, illetve a szabad nitrogén is. Az ezt követő 120 °C-os hőkezelés során az történik, hogy ezek az oldott intersztíciós atomok a diszlokációk környezetébe vándorolnak, ahol már nem torzítják olyan mértékben a kristályrácsot, mint intersztíciós állapotban (sőt, észrevehetően rácsotulást okoznak), emiatt növekszik a

már említett ΔS_a -val a TEP értéke. A növekedés arányos lesz az oldott karbon és nitrogénatomok mennyiségével:

$$\Delta S_a = C_C \cdot P_C + C_N \cdot N_N \quad (4)$$

Tekintsünk egy olyan esetet, amikor nagy hőmérsékleten hosszú ideig hőntartjuk a darabot, és az összes nitrogén kiválik valamilyen nitrid formájában (pl. 700 °C-on fél óra...pár óra időtartamban végzett hőkezelés [3, 5, 7–9]). Ebben az esetben a hideghengerlés és a 120 °C, 45 perces hőkezelés után mért S értékek közötti S_a különbség csak a 270 °C-on a mátrixban oldott és a diszlokációkhoz vándorló karbonnal lesz arányos, azaz:

$$\Delta S_a = C_C \cdot P_C \quad (5)$$

melyből a 270 °C-on oldott karbon mennyisége (P_C) számítható. ΔS_a számított értéke 10-15 ppm. A saját mérések is ugyanezt mutatják.

Egy olyan állapotban, amikor nitrogén is van a rendszerben a ΔS_a értéke a T_p hőmérsékleten t_p idő alatt történt nitridkiválással (a szabad nitrogénnel) és a 270 °C-on oldott karbon-tartalommal lesz kapcsolatban. A kettő a már említett módszerrel szétválasztható, melyből a nitridkiválás mértéke számszerűsíthető.

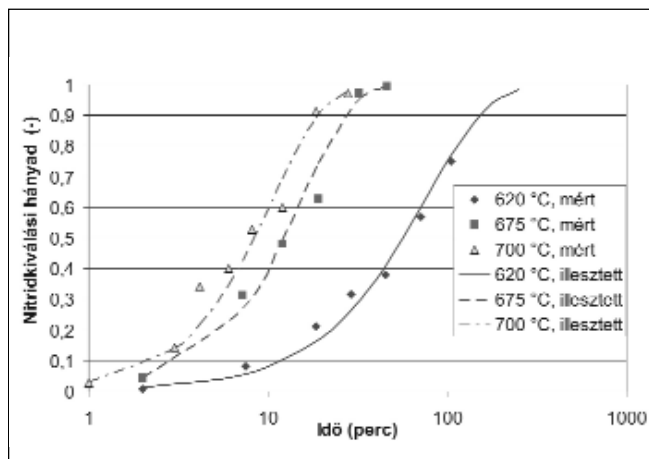
A nitridkiválás folyamata melegen hengerelt szalagban

Egy nitridkiválási folyamat mérésének tehát egyik indirekt módszere a szabad nitrogén mennyiségének a méré-

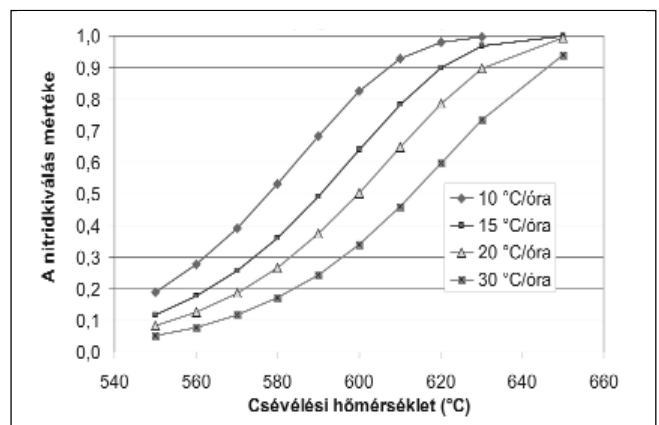
se, mely legkönnyebben a termosterűzés mérésével kivitelezhető. A szabad nitrogén mérésére egy alacsony C-tartalmú, alumíniummal csilapított lágycél minőséget választottunk. Az acél összetétele tömegszázalékban: 0,05% C, 0,23% Mn, 0,018% Si, 0,033% Cr, 0,029% Al, 0,004% N.

A kísérleti anyagon $T_p = 600, 620$ és 700 °C-on végeztünk hőkezeléseket, melyek során nitridkiválási folyamat lépett fel. A hőkezelések bizonyos t_p időtartamokig tartottak, mely után a fentebb bemutatott módszerrel a szabad nitrogéntartalom, így a nitridkiválás mértéke is számszerűsíthető volt. Az egyes hőmérsékleteken végzett hőkezelések után a ΔS_a értékek a 3. ábrán láthatók.

Az ábrán láthatjuk, hogy az intersztíciós mozgóképes atomok mennyiségét jellemző ΔS_a értékek a hőkezelési idő növelésével mindhárom hőmérsékleten csökkennek, és a hőkezelés hőmérsékletét növelve a csökkenés intenzitása nő. A ΔS_a értékek minimuma kb. 70 nV/K értékű, mely (1. táblázat és az (5) összefüggés alapján) kb. 15-16 ppm karbonnak felel meg. Az eredmények összhangban vannak a [7]-es irodalomban közölt adatokkal. A maximális ΔS_a érték kb. 155 nV/K értéket vesz fel, amelyből a nitrogénért felelős rész: 155–70=85 nV/K. Az 1. táblázat alapján ez megfelel kb. 35 ppm oldott nitrogénnek, tehát kb. 5 ppm nitrogén vált ki a melegen hengerlés és a csévéelés utáni lassú hűlés közben. A nitridkiválás mértékét az



■ 4. ábra. A nitridkiválás mértéke 620, 675 és 700 °C-on végzett izotermikus hőkezelések során [16]



■ 5. ábra. A nitridkiválás mértéke a melegen hengerelt tekercsben különböző csévéelési hőmérsékletekről különböző lehűlési sebesség mellett lehűlt próbatestekben, saját mérési eredmények alapján

$$Y = 1 - \frac{\Delta S_a - \Delta S_{a, \min}}{\Delta S_{a, \max} - \Delta S_{a, \min}} \quad (6)$$

képlettel definiálhatjuk, ahol $\Delta S_{a, \min}$ a karbon által okozott TEP változás, $\Delta S_{a, \max}$ a karbon és az összes oldott nitrogén által okozott TEP változás. A nitridek kivált hányada a 4. ábrán látható.

A nitridkiválás folyamata 700 °C-on 25–40 perc időtartam alatt végbemegy. A hőmérséklet csökkentésével a folyamat sebessége csökken ugyan, de 620 °C-on is 1-2 óra alatt az oldott nitrogén jelentős hányada kiválik. Ez az eredmény is azt bizonyítja, hogy az ipari technológia megvalósítása során meleghengertelés utáni csévézés hőmérsékletét 600 °C-nál kisebb hőmérsékletre kell választani ahhoz, hogy az oldott nitrogén nagy része oldatban maradjon a melegtekercs lehűlésének végére.

A nitridkiválási folyamatra Avrami-típusú kinetikát [18, 19] illesztettünk:

$$Y = 1 - \exp\left\{-(k \cdot t)^n\right\} \quad (7)$$

ahol n az ún. Avrami-kitevő, t az idő, k a hőmérséklet hatását kifejező ún. sebességi állandó:

$$k = A \cdot \exp\left\{-\frac{Q}{R \cdot T}\right\} \quad (8)$$

Az utóbbi egyenletben T a hőmérséklet (K), R az univerzális gázállandó (8,314 J/(molK), Q a folyamat látszólagos aktiválási energiája. Az illesztett kinetika paraméterei a 2. táblázatban láthatók.

A következőkben a melegen hengertelt tekercs lehűlése során a nitridkiválás mértékére láthatunk becsléseket.

A nitridkiválási kinetika alapján számolt kiválási mérték csévézés utáni lehűlés közben

A következőkben bemutatott szimulációk célja annak eldöntése, hogy a melegen hengertelt lemezünkben kivált 5 ppm nitrogén (az összes nitrogén kb. 12,5%-a) mekkora része vált ki meleghengertelés közben illetve a csévézés utáni lehűlés közben. A meleghengertelés közben történő folyamatok szimulációja igen komplikált, emiatt a csévézés utáni lassú lehűlés

2. táblázat. A nitridkiválás kinetikájának paraméterei melegen hengertelt acéllemezben [16]

Hőmérséklet	Paraméter			
	n	k	A	Q (J/mol)
620 °C	1,219	$2,18073 \times 10^{-4}$	$1,31904 \times 10^7$	184055
675 °C	1,5096	$1,072 \times 10^{-3}$		
700 °C	1,42	$1,5942 \times 10^{-3}$		

közben lejátszódó nitridkiválási folyamat szimulációját végeztük el. A szimulációkat az izoterm (7) és (8) kinetikafüggvények a változó hőmérsékleten végbemenő átalakulásokra alkalmazható formájában kerültek felhasználásra. A kinetikafüggvények általánosítása, azaz nem izoterm hőkezelésre való alkalmazása a [18] irodalomban közöltek szerint történt.

A következő diagramok azt mutatják, hogy bizonyos csévézési hőmérsékletekről, valamely hűtési sebességgel hűtött melegtekercs lehűlésének végén mennyi a kivált nitrogén mennyisége. A szimulációkat a saját mérési adatok (5. ábra) és a [7] irodalomban közölt mérési eredmények alapján (6. ábra) is elvégeztük.

Az ábrákon látható, hogy 560 °C csévézési hőmérséklet alatt a nitridkiválás mértéke kb. 10-30% és függ a lehűlési sebességtől. A melegen hengertelt kísérleti anyagunkban a szabad nitrogén mennyisége kb. 35 ppm volt az acélban jelen lévő összes 40 ppm nitrogénből, mely azt jelenti, hogy kb. 12-13% vált ki a melegtekercs szoba-hőmérsékletre hűlése során. A szimulációs eredményekkel összevetve ez közvetlenül azt is jelenti, hogy a

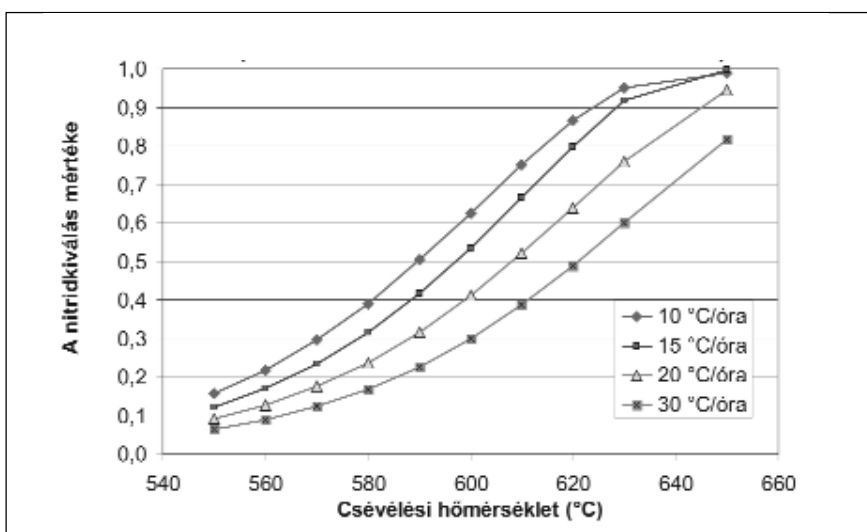
meleghengertelés során igen kis mennyiségű nitrogén válik ki.

Mivel a melegen hengertelt tekercs külső és belső menetei különböző (15–30 °C/h) lehűlési sebességgel hűlnek, ezért a kivált nitridek mennyisége és mérete 10-20%-ban különbözni fog a tekercs hossza mentén. Ez a megállapítás jó egyezést mutat a [12] irodalomban közöltekkel.

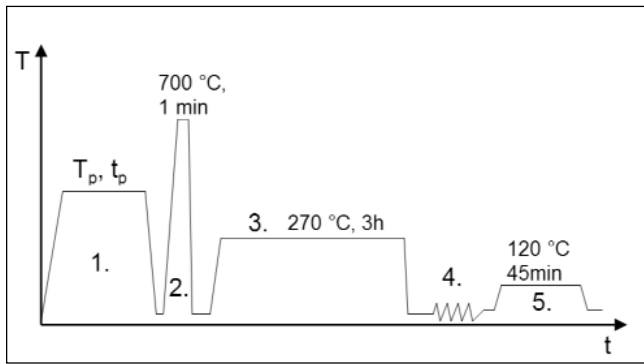
A nitridkiválás folyamatának mérése hidegen hengertelt állapotban

Az oldott nitrogén megtartása a melegen hengertelt tekercsben csupán az egyik feltétele a jól mélyhúzható acél-szalag előállításának. A másik kulcsfontosságú lépés a nitridkiválás előidézése a hideghengertelés utáni lágyító hőkezelés közben. A melegen hengertelt szalagot általában 65-75%-os fogyással hidegen hengertelik, majd a hidegen hengertelt tekercs harangkemencében lágyítják. A lágyító hőkezelés mélyhúzhatóság szempontjából akkor lesz megfelelő, ha a nitridkiválás nagyrészt az újrakristályosodás előtt végbemegy. A jelenség fémtani háttere kettős [5]:

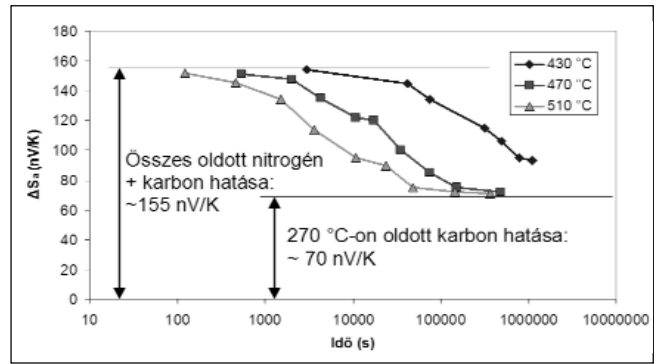
- A hidegalakított szövetszerkezet-



6. ábra. A nitridkiválás mértéke a melegen hengertelt tekercsben különböző csévézési hőmérsékletekről különböző lehűlési sebesség mellett lehűlt próbatestekben, a [2]-es irodalom mérési eredményei alapján Massardier méréseiből kiindulva



■ 7. ábra. Az oldott nitrogén meghatározásának módszere hidegen hengerelt állapotban



■ 8. ábra. A nitridkiválási folyamat hatása a ΔS_a értékekre 75% fogyással hidegen hengerelt lemezben

3. táblázat. A nitridkiválás kinetikájának paraméterei melegen hengerelt acéllemezben [16]

Hőmérséklet	Paraméter			
	n	k (1/s)	A	Q (J/mol)
430 °C	0,8012	$1,689 \times 10^{-6}$	$2,5938 \times 10^{10}$	216571
475 °C	0,6867	$2,441 \times 10^{-5}$		
510 °C	0,6075	$7,2625 \times 10^{-5}$		

ben a nitridek főként a diszlokációk mentén és az elnyújtott szemcsék határán keletkeznek, melynek eredménye az lesz, hogy a rekristallizáció során a növekvő szemcsék akadályokba ütköznek, és emiatt a hengerlés irányában igen nyújtott, viszont lágy szemcseszerkezet keletkezik. Ezt a szemcseszerkezetet pancake-típusú (pancake-type) szövetnek nevezik.

- A nitridkiválás elősegíti az újrakristályosodás során a jó mélyhúzási tulajdonságokkal rendelkező {111} textúra kialakulását.

A nitridkiválás folyamatának mérése tehát hidegen hengerelt állapotban is legalább annyira fontos, mint lágy, melegen hengerelt állapotban. Az előzőekben ismertetett, melegen hengerelt állapotra vonatkozó módszer némi módosítással hidegen hengerelt állapotra is alkalmazható (7. ábra).

A melegen hengerelt kísérleti anyagot 75%-os fogyással hidegen hengereltük. A nitridkiválást előidéző hőkezelést (7. ábra 1. lépés) ebben az esetben megfelelően alacsony hőmérsékleten kell végeznünk azért, hogy a rekristallizáció miatti nukleációs helyek számának csökkenését elkerüljük, ezzel a mérés hibáját csökkentjük. Ez a hőkezelés esetünkben $T_p = 430 \dots 510$ °C-on történt. 510 °C-on a leghosszabb hőntartási időn túl

sem volt érzékelhető keménységváltozás, ami azt jelenti, hogy rekristallizáció illetve megújulás nem befolyásolta mérésünket. A $T_p = 430 \dots 510$ °C-on való hőkezelés után viszont be kell iktatni egy igen gyors rekristallizációs hőkezelést, melynek optimális paraméterei előzetes kísérletek alapján: 700 °C-on 1 perc (7. ábra 2. lépés). A gyors hőkezelés alatt az újrakristályosodás megtörténik, viszont ahogy a későbbi mérési eredmények alapján látni fogjuk, a nitridkiválás mértékét ezen igen rövid idejű hőkezelés észrevehető mértékben nem befolyásolja. Ebben a lágy állapotban már lehetséges a szabad nitrogén mennyiségének mérése a melegen hengerelt állapotra kifejlesztett módszerrel: 3. lépésként 270 °C-on 3 órák hőkezelés a karbon eloszlásának egyensúlyi állapotra hozása céljából, 4. lépésként ismételt hideghengerlés (nagy diszlokációsűrűség létrehozásának céljából), valamint 5. lépésként öregítés következik.

A ΔS_a értékek változása az idő függvényében a 8. ábrán látható. A ΔS_a értékek maximuma kb. 155 nV/K-nek adódott, ami megegyezik a melegen hengerelt állapot maximális ΔS_a értékével. Ez a megállapítás közvetlenül bizonyítja azt, hogy a 700 °C-on 1 percig végzett újrakristályosító hőkezelés (7. ábra 2. lépés) nem, illetve észrevehető mértékben módosítja

a nitrogéntartalom mennyiségét. A kísérleti eredményeink azt mutatják, hogy a 700 °C, 1 perces hőkezelés alatt az újrakristályosodás igen gyorsan végbemegy, miáltal a diszlokációsűrűség, valamint a nukleációs helyek száma lecsökken, így a nitridkiválás nem tud észrevehető mértékben folytatódni.

A mérési eredmények alapján a nitridkiválás mértékét a (6) összefüggéssel számolhatjuk, melyre Avrami-kinetikát (7) illetve a 3. táblázatban látható paramétereket kapjuk.

A hidegen és a melegen hengerelt állapot paramétereit összevetve megállapíthatjuk, hogy a nitridkiválás folyamata sokkal gyorsabb hidegen hengerelt állapotban mint lágy, melegen hengerelt állapotban, és a látszólagos aktiválási energiák összehasonlítása alapján azt mondhatjuk, hogy a hőmérséklet növelése sokkal intenzívebb mértékben növeli a folyamat sebességét hidegen hengerelt állapotban.

Összefoglalás

A cikkben az alumíniummal csillapított acéllemez nitridkiválási folyamatainak mérési módszereit valamint kísérleti eredményeit ismertettük. Megállapítottuk, hogy melegghengerlés közben gyakorlatilag jelentéktelen mennyiségű nitrogén válik ki, és hogy a melegtekercsben jelen lévő nitridek főként a csévelés utáni lehűlés során válnak ki. 560 °C-os csévelési hőmérséklet alatt a kivált nitridhányad kb. 10-30%, amely függ a csévelési hőmérsékletéről való lehűlési sebességtől, azaz a tekercs hossza mentén is változik. Bemutattuk a mérési eredményeken alapuló szimulációk ered-