

BORIDÁLÁS – AZ ELJÁRÁS ELVI ALAPJAI ÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA AZ ISMERTEBB TERMOKÉMIAI ELJÁRÁSOKKAL

Kovács Péter Zoltán 

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metkpz@uni-miskolc.hu

Kocsisné Baán Mária 

ny. egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: m.kocsis.baan@uni-miskolc.hu

Cserjésné Sutyák Ágnes 

mesteroktató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: mechsagi@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán a hőkezeléssel foglalkozó szakemberek évtizedek óta a termokémiai kezelések technológia-fejlesztését tekintik fő kutatási területüknek. Az ipari gyakorlatban széleskörűen alkalmazott nitridálás és cementálás mellett az Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetben a kevéssé elterjedt boridálás területén is rendelkezünk e felületkezelés infrastrukturális feltételeivel és gyakorlatának több évtizedes tapasztalataival. Tervezett cikksorozatunk célja, hogy fokozzuk e technológiai lehetőség ismertségét a hazai hőkezelő szakemberek, illetve az ipari felhasználásban potenciálisan érdekeltek körében. Első lépésként általános képet szeretnénk adni a különböző felületmódosító eljárásokról, közülük is kiemelten foglalkozunk a termokémiai eljárásokkal, s ezen belül a boridálás technológiájával, bemutatva annak sajátosságait a másik két, közismertebb eljáráshoz hasonlítva. A továbbiakban a boridálás technológiai eljárásainak bemutatását, ezek jellemzőinek, berendezéseinek bemutatását tervezzük, kiemelve azok előnyeit és hátrányait, főbb alkalmazási területeit. Külön cikkben kívánunk foglalkozni azokkal a felületvizsgálati módszerekkel, melyekkel a boridálás eredményességét ellenőrizhetjük, illetve folyamatait, befolyásoló tényezőinek hatásait vizsgálhatjuk. Végül saját kutatási eredményeink ismertetését tervezzük, melyekben a boridálás technológiai paramétereinek hatásait elemezzük.

Kulcsszavak: felületmódosítás, termokémiai kezelések, boridálás

Abstract

Specialists in heat treatment at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics of the University of Miskolc have considered the technological development of thermochemical treatments to be their main field of research for decades. In addition to nitriding and cementation, which are widely used in industrial practice, we also have the infrastructural conditions and decades of experience of this surface treatment in the field of boridation, which is not widespread, at the Institute of Materials Structure and Material Technology. The aim of our planned series of articles is to increase the awareness of this technological possibility among Hungarian heat treatment professionals and those potentially interested in industrial use. As a first step, we would like to give a general overview of the different

surface modification processes of which we focus on thermochemical processes, including boridation technology, presenting its features compared to the other two more well-known processes. In the following, we plan to present the technological processes of boridation, their characteristics and equipment, highlighting their advantages and disadvantages, the main areas of application. In a separate article we want to deal with the surface testing methods that can be used to check the effectiveness of boridation and to examine the effects of its processes and factors. Finally, we plan to present our own research results, in which we analyze the effects of the technological parameters of boridation.

Keywords: *surface modification, thermochemical treatments, boridation*

1. Bevezetés

Az anyagtechnológiák körében az elmúlt évtizedekben rendkívül látványos fejlődés volt tapasztalható a felületi, illetve felületközeli rétegek tulajdonságainak megváltoztatására irányuló technológiák fejlesztése terén. Számos mérnöki alkalmazás esetére érvényes, hogy a szerkezetek, gépalkatrészek felületével szemben más elvárásokat támasztunk, mint amilyenek a tömbi anyag tulajdonságai. A káresetek statisztikai elemzése azt mutatják, hogy az ipari termékek döntő többségénél a felületi vagy felületközeli réteg fokozatos minőségromlása miatt következik be a tönkremenetel. Ez is indokolja, hogy a kutatás-fejlesztés kiemelt témakörévé vált a műszaki felülettudomány, a felületi tulajdonságok megismerését és módosítását célzó mérnöki tevékenység.

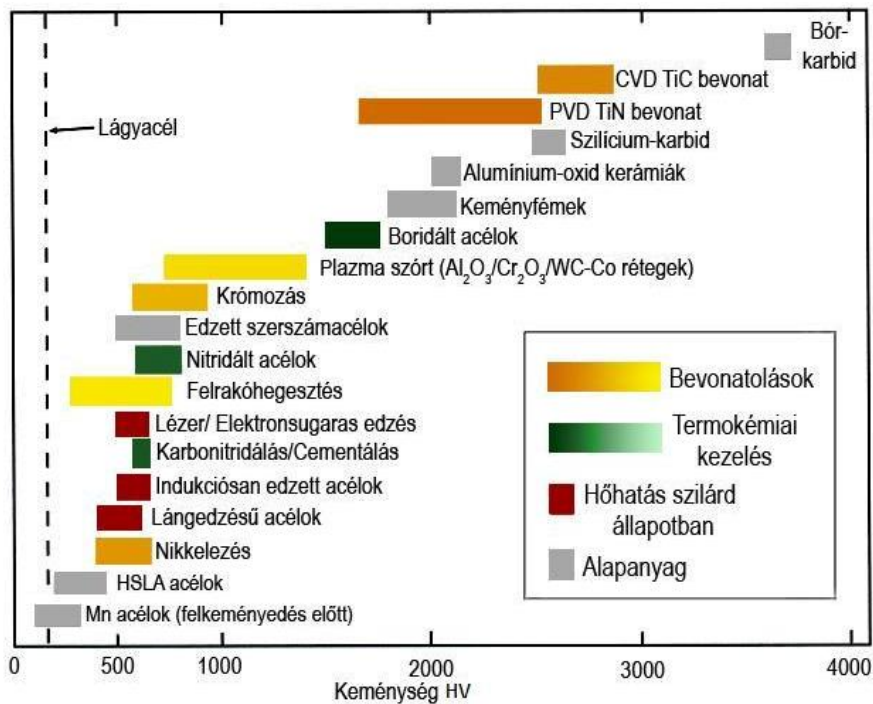
2. Felülettechnológiák jelentősége és osztályozása

A felületi tulajdonságok módosításában a leggyakoribb cél a felület meghatározott mélységű rétegében a keménység, a szilárdság növelése. A felülettechnológiák áttekintése során e két jellemzőt – az egyes eljárásokkal elérhető keménység és rétegvastagság tartományokat – célszerű kiindulási alapkak tekinteni (1. és 2. ábra)

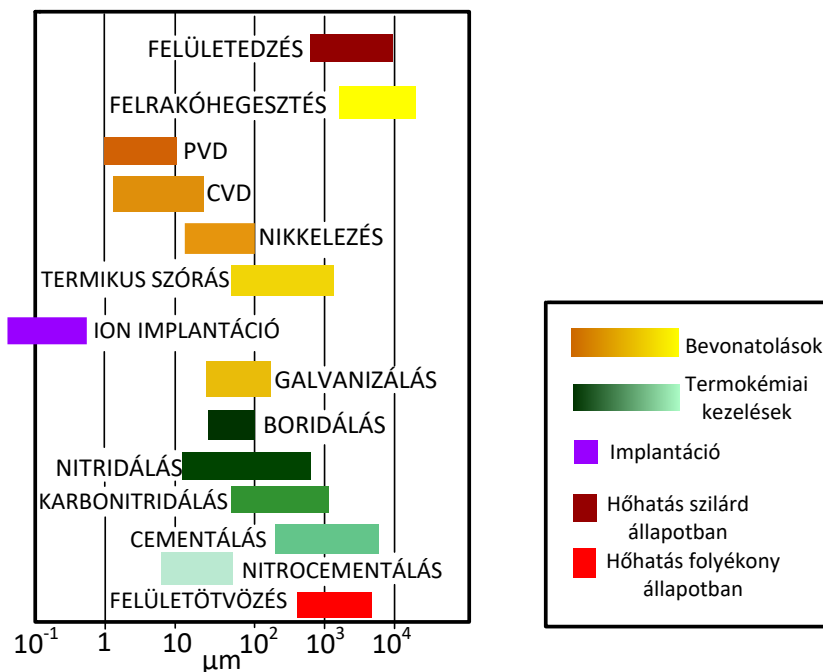
A felülettechnológiák köre az elmúlt évtizedekben jelentősen bővült, egyrészt a fokozott, és összetett követelményeknek való megfelelés igénye, másrészt az új lehetőségek (plazma, lézer, vákuum stb.) kihasználásának kihívásai a felülettechnológiai eljárások és eljárás-változatok sokszínűségét eredményezték. Emiatt fokozódó igény mutatkozik az eljárások megfelelő osztályozásának, csoportosításának kidolgozására, mely sokféle szempont szerint történhet.

- kezelés hőmérséklete / a munkadarab felületén várható maximális hőmérséklet,
- összetétel-változás vagy annak hiánya,
- felületi réteggépzést biztosító alapvető hatás jellege,
- alkalmazott energia-források, illetve energia-sűrűség. (Bagyinszki and Bitay, 2008)

Egy más szemléletmód szerint a felülettechnológiákat két fő csoportra osztjuk aszerint, hogy az alapanyag felületi rétegét módosítjuk, vagy egy attól eltérő anyagi minőségű felületi réteget viszünk fel a felületére. A felületmódosító eljárásokon belül a további csoportosítás (1. táblázat) annak megfelelően javasolt, hogy az eljárás a kémiai összetétel változása nélkül, mindössze a felület anyagszerkezetének módosítására terjed ki, vagy a felületet ötvözzük valamilyen adalékanyag bevitelével. A további csoportosítás az anyagszerkezeti változások jellegét, az alkalmazott hatásmechanizmusokat és fémteni folyamatokat veszi figyelembe. (Kocsisné et al., 2015)



1. ábra. Különböző alapanyagok és felületi rétegek keménységének összehasonlítása. (Kocsisné et al., 2015)



2. ábra. A felületkezelő eljárásokkal elérhető rétegvastagság tartományok. (Kocsisné et al., 2015)

1. táblázat. A felületmódosító eljárások egy lehetséges csoportosítása. (Kocsisné et al., 2015)

HATÁS	KÉMIAI ÖSSZETÉTEL VÁLTOZÁSA NÉLKÜL			KÉMIAI ÖSSZETÉTEL VÁLTOZÁSÁVAL			
	mechanikai	hőhatás		hőhatás		fizikai	
ELV	Alakítási keményedés	Fázis-átalakulás	Átolvastás és kristályosodás	Ötvözés olvadék áll.-ban	Ötvözés szilárd áll.-ban + fázis-átalakulás + fémes vegyület		Ötvözés + módosított rácshibaszervezet
ELJÁRÁS	Felületszilárdító megmunkálások - Felületvasalás - Görgőzés - Sörétezés - Lézer-impulzusos	Felületedzés - Láng- - Indukciós- - Lézeres - Elektron-sugaras	Elektronsugaras vagy lézeres átolvastás	Elektron-sugaras vagy lézeres ötvözés, részecske bevitel	Cementálás -szilárd köz. - sófürdős - gáz - vákuum - plazma(ion)	Nitridálás, Boridálás sófürdős - gáz - sófürdős - vákuum - plazma(ion)	Ion-implantáció
ANYAG-SZERKEZET	Alakított állapot, növelt diszlok. sűrűség, maradófeszültség	Kisebb C-tartalmú martenzit	Finom kristályszerk. vagy amorf réteg	Egyedi, tervezett mikroszerk. – szilárd oldat vagy kompozit réteg	Nagyobb C-tartalmú martenzit	Vegyület réteg + diffúziós zóna (szilárd oldat+ kiválások)	Egyedi összetétel és rácshibaszervezet

Amint az a fenti táblázatban is látható, a kémiai összetétel változásával járó felületi hőkezelések hagyományos változatai az alapanyag szilárd állapotában megvalósuló termokémiai kezelések csoportját alkotják, melyeket termodiffúziós eljárásokként is szokás nevezni, s melyeket évszázadok, sőt évezredek óta alkalmazott technológiákként ismerünk. A további, kémiai összetétel változással járó felületmódosító eljárások csak az utóbbi évtizedek innovációjaként megjelenő nagy energia-sűrűségű eljárások, nevezetesen a lézeres és elektronsugaras kezelések révén, illetve a fizikai hatást alkalmazó ion-implantációval valósíthatók meg.

3. A termokémiai kezelések főbb jellemzői – hasonlóságok és különbségek

A termokémiai kezelések eljárásaira egyöntetűen jellemző, hogy egy bizonyos vastagságú felületi rétegbe diffúzió útján juttatjuk be az ötvöző(ke)t, melyek a legismertebb eljárások esetén a karbon (C), a nitrogén (N) és a bór (B). Az alkatrészeket az ötvöző anyagot leadó közegbe helyezve, az adott eljárás (cementálás, nitridálás, boridálás) technológiai paraméterei által szabályozottan meghatározott fizikai és kémiai folyamatok játszódnak le, aminek eredményeként a felület ötvöző(k)ben dúsul.

A hőkezelés körülményei között mind a három elem – C, N és B – intersztíciósan oldódik a vas kristályrácsában, így nyilvánvalóan jelentős szerepet játszik ezen atomok mérete mind a diffúzió, mind az oldódási viszonyok vonatkozásában. A legkisebb atomtérrel rendelkező a nitrogénatom, míg a bóratom relatíve a legnagyobb átmérőjű, a három elem atomtérrel a vas atomtérrel képest rendre $d_N/d_{Fe}=0,57$; $d_C/d_{Fe}=0,62$; $d_B/d_{Fe}=0,71$.

A 2. táblázatban a három eljárással kapcsolatos elméleti és technológiai adatokat foglaltuk össze. A táblázat a kétalkotós egyensúlyi diagramjaikra és oldhatósági viszonyaikra, vegyületképződési hajlamukra vonatkozóan is tartalmazza a főbb információkat, melyek révén az eljárások közötti hasonlóságok és különbségek jobban megérthetőek.

A termokémiai kezelések főbb technológiai paramétereit közötti különbségeket az adszorpció mellett, az eltérő diffúzió sebesség és az eltérő oldhatósági viszonyok indokolják: magasabb hőmérsékleten, ausztenites (A_3 felett) állapotban a lassúbb diffúzióra képes, nagyobb atomtérű elemekkel (C, B) való ötvözés valósítható meg, a nitrogénnel való felületötvözés alacsonyabb hőmérsékleten, ferrites (A_{c1} alatt) állapotban zajlik.

A boridálás ausztenites állapotban végezhető el, 800-1050 °C hőmérsékleten 1-12 órás izzítással. A bór diffúziós sebessége és oldhatósága jelentősen elmarad a karbonhoz képest, ezért kell magas hőmérsékleten, ausztenites állapotban végezni, ebből a szempontból tehát a cementáláshoz áll közelebb. A kialakuló kéreg szerkezetét tekintve azonban a nitridálással mutat hasonlóságot: vékony, gyakran többfázisú felületi réteget hozunk vele létre, mely növelt keménységet és jó kopásállóságot biztosít, emellett a korrózióval szembeni ellenállás is fokozódik. (Kuzsella et al., 2014)

A kezelés hőmérsékletén a szubsztrát felülete és az azt körülvevő közeg közötti egyensúlyi állapot alakul ki, amely a kezelés hőmérsékletéről való lehűlés, vagy utólagos hőkezelés során természetesen további átalakulásokon mehet keresztül. A cementálást követően minden esetben szükség van utólagos hőkezelésre, mivel a cementálás, a felület karbonban történő dúsítása csak előfeltétele annak, hogy egy edző hatású hűtéssel nagy keménységű martenzitet állítsunk elő. A cementált alkatrészek így végső soron nem egyensúlyi állapotú, épp ezért megeresztődésre, kilágyulásra hajlamos, instabil szövetszerkezetűek, növelt hőmérsékletű üzemi körülmények között nem alkalmazhatók.

A nitridálás és boridálás esetén kialakuló egy- vagy kétfázisú vegyületi réteg termodinamikailag stabil, egyensúlyi állapotú, így kedvező tulajdonságait növelt üzemi hőmérsékleten is megőrzi. A vegyületi réteg alatt ún. diffúziós réteg alakul ki, mely megfelelő alátámasztást nyújthat a vékony vegyületi réteg számára. A nitridálás során létrejött diffúziós zóna jelentős mélységig növelt szilárdságát az oldott nitrogén rácsorzító hatásának, továbbá a ferrites mátrixban kialakuló nitridek – ötvöztelen acélban γ' (Fe_4N), ötvözött acélokban pedig az ötvözők nitridjei – biztosítják, kiváló keményedési mechanizmussal.

A boridált felületek esetében nem jön létre jelentős diffúziós zóna, mivel a bór mind az ausztenitben, mind a ferritben nagyon kismértékben oldódik. Ennek következtében sem az oldott atomok rácsorzító hatása, sem a hűlés során a ferrit mátrixban létrejövő boridok, borokarbidok nem tudnak olyan jelentős keménységnövelő hatást okozni, mint az a nitridálás esetén tapasztalható. Lehetőség van azonban olyan utólagos hőkezelésre, mely kellő megtámasztást biztosít, nagy szilárdságú réteget eredményez a vékony vegyületi réteg alatt. felületi vegyület-fázisok stabilitásának köszönhetően ez az utólagos hőkezelés nem teszi tönkre a megelőző fázisban kialakult boridált réteg tulajdonságait.

2. táblázat. A termokémiai eljárások összehasonlítása

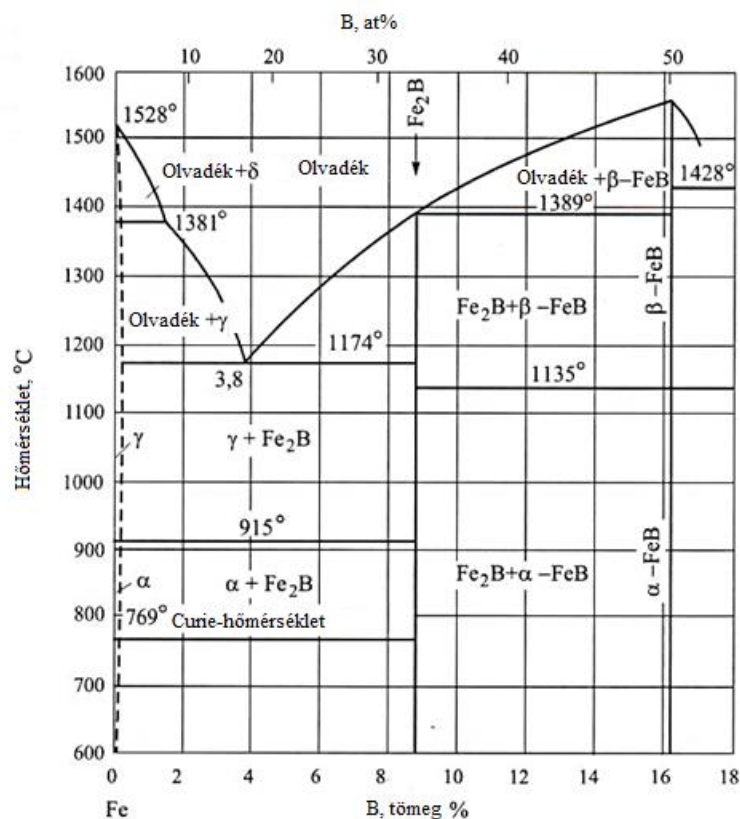
	Nitridálás	Cementálás	Boridálás
	Egyensúlyi viszonyok, vegyületképződés		
Atomátmérő viszonyok	N/Fe: 0,57	C/Fe: 0,62	B/Fe: 0,76
Diffúzió sebessége azonos hőmérsékleten	gyorsabb	lassabb	leglassabb
Oldhatóság α -módszulatban (20 °C)-on	0,004%	0,006%	rendkívül alacsony
Maximális oldhatóság	0,115% (590 °C)	0,025% (723 °C)	<0,005% (900 °C)
- α - módszulatban	2,8% (650 °C)	2,06% (1147 °C)	0,021% (1149 °C)
- γ - módszulatban			
Vassal alkotott vegyületeik	Fe ₄ N, Fe _{2,3} N, Fe ₇ N, Fe ₁₆ N ₂	Fe ₃ C	FeB, Fe ₃ B
Acéltövezőkkel alkotott vegyületeik	nitridek, karbonitridek	karbidok	borokarbidok, bórnitrid
	Technológiai adatok		
Hőmérséklet	500...A _{cl} (723 °C) (ferrites állapotban)	850...950 °C; A ₃ felett (ausztenites állapotban)	850...1000 °C; A ₃ felett (ausztenites állapotban)
Anyagminőség	valamennyi acélminőség, öntött vas, egyéb fémek	kis C-tartalmú, edzhető acélok, öntöttvasak	valamennyi acélminőség, öntött vas, egyéb fémek (Ni, Co, Ti-ötvezetek)
Létrehozott feltétel	stabil, egyensúlyi állapotú vegyületi réteg+ diffúziós zóna	nem egyensúlyi állapotú martenzit (0,7...0,9% C)	stabil, egyensúlyi állapotú vegyületi réteg (+ diffúziós zóna)
Kéreg-szerkezet	nincs szükség rá	edzés+megeresztés= betétedzés	lehetséges, de nem szükséges
Utólagos hőkezelés	jól becsülhető (1...2%)	jelentős torzulások	jól becsülhető, nem jelentős
Térfogatnövekedés	700...1100 HV	670...800 HV	1800...2100 HV
Elérhető feltületi keménység			

4. A boridált réteg szerkezete és tulajdonságai

A boridálás eredményeként elérhető kedvező tulajdonság-módosító hatások elsődlegesen a vegyületi réteg fázisaitól és szerkezetétől függenek.

4.1. A Fe-B kétalkotós rendszer és fázisai

A boridálással létrehozható felületi kéreg szerkezetének megismeréséhez, a vegyületi zóna fázisainak bemutatásához célszerű a Fe-B kétalkotós egyensúlyi diagram 0-18 tömeg% B tartományra vonatkozó részletének tanulmányozásából kiindulni. Amint azt a 3. ábra mutatja, ebben a koncentrációközben kétféle boridvegyület jöhet létre.



3. ábra. Fe-B kétalkotós egyensúlyi diagram.

Az eljárás során kialakuló vegyületi réteget illetően kétféle borid-fázisnak van jelentősége:

- az FeB fázis 16,23% bórt tartalmaz és ortorombos rácsszerkezetű,
- az Fe₂B fázis 8,8%-os bórtartalommal rendelkezik és tetragonális rácsszerkezetű.

A Fe-B rendszer fázisainak stabilitás-területét, oldódási viszonyait illetően sok ellentmondásos állítás és feltételezés található a publikációkban, abban azonban egyre inkább egyetértés mutatkozik, hogy a bór az ausztenitben interstíciós, míg a ferritben szubsztitúciós jelleggel oldódik (Krukovic et al., 2010).

A boridált rétegek egyedi morfológiai sajátossága a jellegzetes fűrészfog mintázat, melyet a 4. ábra szemléltet. Kialakulásának az a magyarázata, hogy a bór-koncentráció növekedésének hatására véletlenszerűen orientációval kialakuló kristálycsírák közül azok, amelyek [001] kristálytani iránya a felületre merőleges, és így a bór diffúziós irányával párhuzamosan helyezkedik el, gyorsabb növekedésre képesek. A növekedés azért intenzívebb ebben az irányban, mert a Fe_2B kristályrácsában ebben az irányban a legnagyobb az atomsűrűség. (Kocsisné et al., 2015)



4. ábra. A boridált réteg kialakulása alacsony karbontartalmú és gyengén ötvözött acélok esetén.

Mint minden termokémiai eljárásnál, a kialakuló rétegvastagságot meghatározó paraméterek a hőntartás hőmérséklete, a kezelési idő, az ötvözőelemet biztosító közeg potenciálja és a kezelt alapanyag kémiai összetétele. A boridálással elérhető, szokásos rétegvastagság 15-500 μm .

Az elvárt rétegvastagság az ipari alkalmazás követelményeitől függően változik: vékony (15–20 μm) rétegeket alkalmazunk adhéziós kopással szembeni védelem céljából, így pl. forgácsoló szerszámok és sajtoló szerszámok felületén, míg vastagabb rétegek ajánlottak abrazív kopással szembeni védelemre.

A boridálás következtében a munkadarabok mérete kismértékben megnövekszik, a teljes boridált rétegvastagság mintegy 20-30%-át kitevő mértékben (Campos-Silva et al., 2012).

4.2. A kétfázisú vegyületi réteg hátrányai, ezek elkerülésének lehetőségei

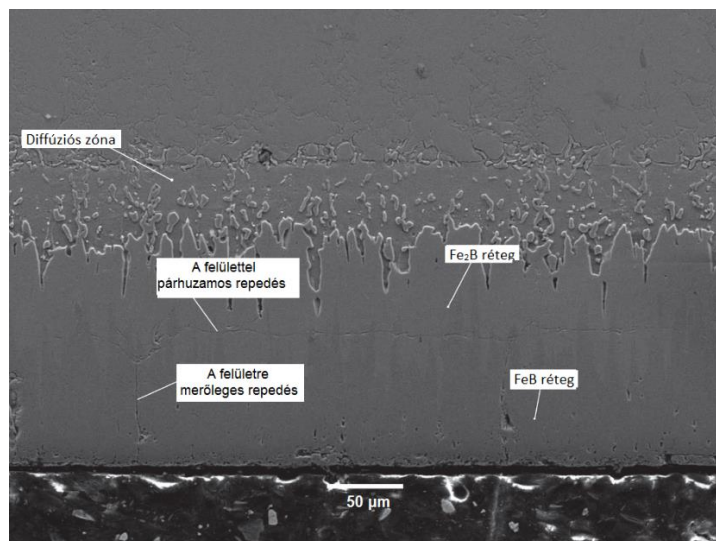
A boridált réteg tulajdonságait jelentősen befolyásolja, hogy az adott technológiai paraméterek között, az alkalmazott boridálószer hatására egyfázisú (Fe_2B) vagy kétfázisú ($\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$) vegyületi réteg keletkezik.

A két fázis keménysége között nincs számottevő különbség, az FeB keménysége 1900-2100 HV 0,1, míg az Fe_2B keménysége: 1800-2000 HV 0,1 tartományba esik. Mivel az FeB fázis sokkal ridegebb, mint az alacsonyabb bórtartalmú Fe_2B fázis, emiatt kedvezőtlen a kétfázisú vegyületi réteg, és lehetőleg egyfázisú réteget kell létrehozni, melyet az Fe_2B fázis alkot.

Kétfázisú vegyületi réteg keletkezése esetén a réteg tartósságát és terhelhetőségét kedvezőtlenül befolyásolja a két vegyület eltérő hőtágulási együtthatója is:

$$\text{Fe}_2\text{B} \quad \alpha = 7,85 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \quad \text{FeB} \quad \alpha = 23,00 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \quad \text{Fe} \quad \alpha = 15,60 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}.$$

Emiatt hűlés közben jelentős mértékű maradó feszültségek jönnek létre, repedések alakulhatnak ki (5. ábra), ez is indokolja, hogy egyfázisú Fe_2B réteg kialakítására törekedjünk.



5. ábra. A felülettel párhuzamos és arra merőleges repedések kialakulása boridált vegyületi rétegben, megalakító szerszámacél SEM felvételén (Campos-Silva and Rodríguez-Castro, 2015)

A kétfázisú boridréteg előzőekben említett káros következményeinek megelőzésére többféle megoldással találkozhatunk a szakirodalomban. Mindenekelőtt a bór-potenciál kis értéken tartásával befolyásolható a vegyületi réteg szerkezete, és hozható létre Fe_2B egyfázisú vegyületi réteg. Kedvező hatást eredményezett a ciklikusan megszakított boridálási eljárás is, miután a borid-réteg morfológiáját befolyásolta, tompítva a fűrészfog-szerű nyúlványok élet, csaknem gömbszerű, finom borokarbidok létrehozását segítve elő, s ezáltal a mechanikai tulajdonságokat illetően a szívósság és alakíthatóság javulása, emellett a korrózióállóság fokozása érhető el (Gopalakrishnan et al., 2002).

A kétfázisú réteg ridegségének, lepattogzási hajlamának csökkentésére számos elő- és utó-kezelési lehetőséget is vizsgáltak a kutatók, így edzéssel, cementálással, lézeres átolvasztással, ion-implantációval és gáznitridálással elért eredményeket publikáltak.

A réteg keménységgradiense, a kéreg és a szubsztrát keménysége közötti különbség csökkenthető előzetes cementálással, és/vagy utólagos edzéssel. A boridált réteg lézeres átolvasztásával a durva, oszlopos szerkezet finom szemcsés szerkezetté alakítható. Kedvező hatást eredményez a nitrogén ionok implatálása, aminek következtében a boridok részben lebomlanak és nitrdek (pl. c-BN, FeN és Fe_{2-3}N vegyületek keletkezhetnek). Utólagos gáz-nitridálással a külső vegyületi réteg (FeB) átalakítható a jóval szívósabb Fe_4N fázissá, míg az alsóbb vegyületi réteg (Fe_2B) vas- és bórnitriddé bomlik, nevezetesen Fe_4N és B_{25}N fázisok jönnek létre (Bejar and Moreno, 2006).

5. Boridálható anyagminőségek

A boridálható anyagok körébe tartozik mindenekelőtt a vasötvözetek széles köre, így a szerkezeti acélok többsége, a betétedzhető és nemesíthető acélok, a szerszámacélok, az öntött acélok, valamint az Armco-vas, a különféle öntöttvasak, többek között a szürke és a gömbgrafitos öntöttvasak, továbbá a szinterelt porkohászati ötvözetek és szinterelt acélok. Kifejezetten boridálásra fejlesztett acéltípust nem találunk az acélok szabványosított kategóriái között. Az alumíniumot tartalmazó acélok azonban nem alkalmasak boridálásra, hasonlóan az 1 tömegszázalék feletti Si tartalmú acélokat sem célszerű boridálni, mivel ezek

az ötvözők nem oldódnak a boridokban. A további fémek és fémötvözetek közül sikeresen alkalmazható a boridálás a nikkel, kobalt és bármely nagy keménységű ötvözetük esetében. Nem boridálható azonban a réz, így sikeresen használják maszkoló anyagként vékony öntapadó fólia vagy lemezek formájában, ha a felület szelektív boridálására van szükség. (Fichtl, 1981)

A szubsztrát anyagok széles körére vonatkozó kísérleti eredményeket találhatunk a közelmúlt szakirodalmi publikációiban, a szerkezeti és szerszámacélok széles köre mellett öntöttvasak boridálására (Ortiz-Domínguez et al., 2014; Meri et al., 2006), illetve $Fe_{64}Ni_{36}$ invar ötvözet boridálására (Ciprian et al., 2009) vonatkozóan.

5.1. Az acélok ötvözőelemeinek hatása a boridálásra

Az ötvözőelemek leginkább szembetűnő hatása, hogy a boridált réteg mikroszkópi vizsgálata során megfigyelhető jellegzetes fogazottság mértéke az ötvözés következtében mérséklődik. Az ötvözők közül a V, Cr, Mo, W koncentrációjának növekedése a bór diffúzióját és a réteg fogazódását csökkenti, kötési szilárdságát rontja.

Az ötvözőelemek hatása a következőkben foglalható össze:

- Az ötvözők általában nehezítik a bór diffúzióját – erősebben ötvözött acélok esetében emiatt kisebb rétegvastagság érhető el. Ötvöztelen és gyengén ötvözött acélok felületén a boridréteg növekedése gyorsabb és a fogazódás mélyebb, a réteg tapadása, kötődése az alapanyaghoz erősebb, mint az ötvözött acéloknál. Alacsony karbontartalmú és gyengén ötvözött acélok esetén az optimális rétegvastagság 50-250 μm , míg erősen ötvözött acélok esetén 25-76 μm (Campos-Silva and Rodríguez-Castro, 2015).
- Néhány ötvöző jelentős hatással van a boridált felületi réteg szerkezetére is. A boridokban nem oldódó ötvözők (pl. C, Si, Al) kiszorúlnak a felületi rétegből, a vegyület-zóna és a diffúziós zóna határán feldúsulnak. Mivel a Si és Al ferritképzők, lágy ferrites réteg jön létre a kemény és rideg, vékony boridréteg alatt. Kellő támasztóréteg hiányában így a felületi réteg lepattogzása még viszonylag kis terhelési szinten is bekövetkezhet.
- A karbon esetében azonban kedvező hatások is tapasztalhatók annak következtében, hogy a karbon nem oldódik a borid-rétegben. A nagy keménységű, vékony borid réteg alatti diffúziós rétegbe kiszorult karbon egyrészt borocementitet ($Fe_3B_{0.67}C_{0.33}$, kb. 4% bór-tartalommal) alkot – kiváló keményedési hatással – másrészt az esetleges utóhőkezelésként alkalmazott edzésnél növeli a martenzit keménységét.
- A karbontartalom növekedésével a boridált réteg vastagsága csökken, a keménysége növekszik (bár egyes szerzők 0,5% C tartalomig először csökkenést, majd ezt követően növekedést tapasztaltak) és többfázisú, karbidokban és borokarbidokban (Fe_3C , $Cr_{23}C_6$, Fe_7C_3 és $Fe_3(B,C)$) gazdag réteg alakul ki a Fe_2B vegyületi réteg és a szubsztrát között. Ez magyarázza, hogy nagy karbontartalmú acélok boridálása esetén a boridált réteg nagyon rideg és kevésbé tapad az alapfém felületére (Bejar and Moreno, 2006).
- A boridokban jól oldódó ötvözők jelenlétében vegyes boridok keletkezhetnek, mivel ezek az atomok (pl. Cr és Mn) helyettesítik az Fe atomot a vegyületekben. Emellett az ötvözők egy része (Cr, V, Mo, Ni) borid-vegyületet is képezhet, így röntgendiffrakciós vizsgálattal CrB, MnB, Cr_2B , B_4V_3 vegyületek azonosításáról számolnak be publikációk (Campos-Silva et al., 2012; Uslu et al., 2007). A króm hatásaként a boridált rétegen belül a FeB fázis mennyiségi növekedését tapasztalták, másrészt a vegyületi rétegben, ezzel összefüggésben növekszik a keménység és a ridegség, továbbá a külső felületi réteg nem eléggé kompakt. A Ni tartalom növekedése a vegyületi réteget vékonyabbá teszi és szabályosságát fokozza (Bejar and Moreno, 2006).

6. Összefoglalás

Intézetünkben több évtizede folyik K+F tevékenység a termokémiai felülettechnológiák területén. Infrastrukturális feltételeink biztosítottak nemcsak az ipari gyakorlatban széleskörűen alkalmazott cementálás és nitridálás megvalósításához, de a kevésbé elterjedt boridálási technológia kivitelezéséhez is. Ez utóbbi felületkezelési eljárás szilárd közegű eljárásváltozata egyszerűen megvalósítható, bár energia és munkaiigényes, és természetesen feltételezi a megfelelő rétegszerkezet kialakításához szükséges anyagszerkezettani és anyagtechnológiai ismereteket. Tervezett cikksorozatunk első tanulmányában az alapelveknek, és az alapanyaggal kapcsolatos ismereteknek a rövid összefoglalására törekedtünk, azzal a céllal, hogy a hőkezelő szakemberek szélesebb köre előtt ismertté váljanak e technológia alkalmazásának lehetőségei és előnyei.

Irodalom

- [1] Kocsisné, B. M., Marosné, B. M., Szilágyiné, B. A., Cserjésné, S. Á., Frigyik, G., Kuzsella, L., Szabó, E. (2015). *Nitridálás – Korszerű eljárások és vizsgálati módszerek*. Miskolci Egyetem, pp. 296. ISBN 978-963-358-080-6
- [2] Bagyinszki, Gy., Bitay, E.: *Felületkezelési eljárások több szempontú rendszerezése*, 2008 XIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka, Kolozsvár, Románia, pp. 5-12. <https://doi.org/10.36243/fmtu-2008.05>
- [3] Kuzsella, L., Frigyik, G., Kocsisné Baán, M., Varga, Zs., Sávolyi, S.: *Plazmanitridálási kísérletek szerszámacélokön*, 2014 XXVI. Hőkezelő és anyagtudomány a gépgyártásban országos konferencia és szakkiállítás külföldi résztvevőkkel, ISBN 978-963-9058-36-1, pp. 246-256.
- [4] Krukovics, M. G., Pruszakov, B. A., Szizov, I. G. (2010). *Plaszticsnoszty borirovannich szlojev*. Moszkva, Fizmatlit, pp. 384., ISBN 978-5-9221-1240-6
- [5] Campos-Silva, I., Ortiz-Dominguez, M. et al. (2012). Kinetics and boron diffusion in the FeB/Fe₂B layers formed at the surface of borided high-alloy steel. *J. Mater. Eng. Perform.*, 21, 1714–1723. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0088-9>
- [6] Campos-Silva, I. E., Rodríguez-Castro, G. A. (2015). 18 - Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. In E. J. Mittemeijer, M. A. J. Somers (Eds.) *Thermochemical Surface Engineering of Steels* (pp. 651–702). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857096524.5.651>
- [7] Gopalakrishnan, P., Shankar, P., Balamurugan; Ramakrishnan, S. S., Thiagi, A. K. (2002). Microstructural and microchemical modifications on interrupted boriding of carbon steels. *J. of Mater.Sci.Technology*, 10(4), 53–65.
- [8] Bejar, M. A., Moreno, E. (2006). Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 173(3), 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.12.006>
- [9] Fichtl, W. (1981). Boronizing and its practical application. *Materials & Design*, 2(6), 276–286. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(81\)90034-0](https://doi.org/10.1016/0261-3069(81)90034-0)
- [10] Ortiz-Domínguez, M., Flores-Rentería, M. Á. et al. (2014). Simulation of growth kinetics of Fe₂B layers formed on gray cast iron during the powder-pack boriding. *Materiali in tehnologije/Materials and Technology*, 48(6), 905–916.

- [11] Meric, C., Sahin, S., Backir, B., Koksál, N. S. (2006). Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons. *Materials and Design*, 27, 751–757. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.01.018>
- [12] Ciprian, R., Palombarini, G., Carbucicchio, M., Sambogna, G. (2009). Formation and characterization of boride coatings thermochemically grown on the Fe₆₄Ni₃₆ alloy. In E. Kuzman, K. Lázár (Eds). *2008 Proc. ISIAME* (Intern. Symposium on the Industrial Applications of the Mössbauer Effect) (pp. 11-22). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01370-6_72
- [13] Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., Binda, C. (2007). Evaluation of borides formed on AISI P20 steel. *Materials and Design*, 28, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.013>