

INNOVÁCIÓS TRENDEK A NITRIDÁLÁSBAN

INNOVATION TRENDS IN NITRIDING

Szilágyiné Biró Andrea*

ABSTRACT

Nitriding is a well established process among the so-called thermo-chemical surface engineering technologies, and has many successful applications in the areas of wear, corrosion and improved fatigue performance. This overview shortly discusses two conventional methods of nitriding (gas nitriding and plasma nitriding). The novel trends of nitriding, i.e. active screen plasma nitriding and complex treatments are discussed in details.

1. BEVEZETÉS

E cikk célja a nitridálás technológiájának rövid bemutatása mellett áttekintést adni a nitridálás kutatásának legfőbb irányairól.

1.1. Termokémiai kezelések helye a gépgyártásban

A nitridálás a felülettechnológiák, azon belül a termokémiai hőkezelések közé sorolható. A felülettechnológiák célja, olyan komplex igénybevételeknek is megfelelő alkatrészek előállítása, amelyek egyaránt ellenállnak az alkatrész egészére ható statikus igénybevételnek, valamint a felületen ható koptató, fárasztó igénybevételnek.

A termokémiai eljárások a felülettechnológiáknál megfogalmazott célt ötvözőelem (karbon, nitrogén, bór) felületbe való diffúziójával érik el. Míg a karbon-diffúzióval járó betétedzés csak a kis (<0,2%) karbontartalmú acélok esetében alkalmazható, addig a nitrogén bejuttatásával járó nitridálás (és a boridálás) gyakorlatilag bármilyen acélon alkalmazható.

Ezek a technológiák az alkatrész műveleti sorrendjében a lehető legkésőbb kell, hogy elhelyezkedjenek, mivel a kialakított kopásálló réteg megmunkálása igen nagy költséggel jár.

1.2. A nitridálás jelentősége

A nitridálás széles körben elterjedt termokémiai eljárás. Alkalmazásának legfontosabb indokai:

- nagy felületi keménység,
- a kopásállóság növekedése,
- a fáradási élettartam és a korróziós ellenállás növelése,
- az alkatrész felületi rétege magasabb hőmérsékleten stabil (mint betétedzésnél).

1.3. A nitridált réteg szerkezete

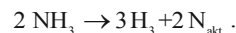
A nitridált réteg többrétegű. A legkülső felület ϵ és γ' fázisokból áll és vegyületi, vagy fehér rétegeknek nevezik. Nagy a hajlam a porozításra a fázisok között, és emellett jelentős különbség van a hőtágulási tényezőjük között, ami maradó feszültségekhez vezethet, ez pedig mikro-repedésekhez. A vegyületi zóna alatt van a felkeményedett szilárd oldat (a nitrogén interstíciósan helyezkedik el), amelyet diffúziós zónának neveznek. A nitridált réteg mélysége az idő, a hőmérséklet, és az alapanyag valamint a gáz összetételének függvénye. A vegyületi zóna vastagsága a teljes nitridálási mélységnek mintegy 10%-a.

2. A NITRIDÁLÁS HAGYOMÁNYOS TECH- NOLÓGIÁI

A nitridálás ma már széles körben elterjedt az iparban is. Technológiaváltozatai közül ebben a cikkben a gáz és plazmanitridálást ismertetem röviden.

2.1. Gáznitridálás

Az alkatrészeket kemencébe helyezik, amelyből eltávolították a levegőt a kamra felfűtés előtt. Fontos, hogy az oxigént eltávolítsák, mert az a kezelt alkatrészek oxidációját okozná. A N_2 forrása a kemencében az ammónia gázból származik, amelyet a kemencébe vezetnek. A forró alkatrészekkel való érintkezéskor, ez a gáz termodinamikailag instabil állapotba kerül és disszociál az alábbi egyenlet szerint:



A gáznitridálás egyik alternatív módja a többlépcsős eljárás, amely során először 'aktiválják' a felületet nagyobb nitridálási potenciállal (hogy vasnitrideket képezzenek a felületen), aztán pedig alacsonyabb

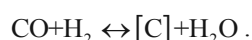
* tanársegéd, Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék

nitridálási potenciál mellett biztosítják a rétegnövekedést. Ily módon nagyobb rétegmélység érhető el csökkentett vegyületi réteg vastagsággal, vagy egyes esetekben annak kialakulása nélkül.

2.2. Gáz karbonitridálás

Karbo-nitridálás során a nitrogén mellett karbon is diffundál a felületbe és növeli az ε rétegben a karbon tartalmat [2][6]. Gáz közegű eljárás során például az ammónia-nitrogén keverékhez valamilyen karbon tartalmú gázt, általában széndioxidot adagolnak, azonban csak igen kis mennyiségben (5-10%). Egyes esetekben a bevezetett gázkeverék ammónia és endoterm gáz 50-50%-os keveréke, amely nagyobb karbon kínálatot biztosít a magasabb CO-tartalom miatt.

A gáztérben diffúzióképes karbon atom képződik az alábbi egyenlet szerint:

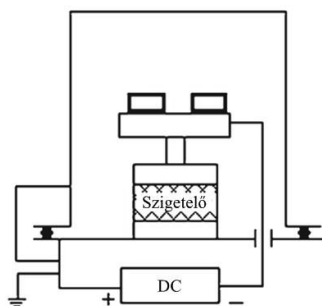


A karbo-nitridálásnál problémát jelent, hogy a réteg karbon és nitrogéntartalma nem szabályozható egymástól függetlenül: a karbon diffúzió megnő a hidrogéntartalom növekedésével, viszont a nitridálási potenciál ekkor csökken.

2.3. Plazma nitridálás

A plazmanitridálást (direct current plasma nitriding - DCPN) az 1920-as években vezették be, mint a hagyományos gáznitridálás alternatíváját: első ipari alkalmazásai az 1970-es években jelentek meg [8]. A plazmanitridálás lényege, hogy a munkadarab és a munkatér között elektromos feszültség van: a kezelendő darabot katódként, a kemence falát anódként kapcsolják. A kemencetérben lévő vákuumba bevezetett nitrogén molekulák ionizálódnak, majd a próbadarab felületébe becsapódva vas atomokat választanak le, azokkal vasnitridet képeznek. Az így képződött molekula megtapad a munkadarab felületén, és a nitrogén a felületről a munkadarab belseje felé diffundál.

A technológiának többféle változata van. Egyes esetekben a kemencetert külső hőforrással hevítik – ez az úgynevezett melegfalú technológiaváltozat. A hidegfalú technológia lényege, hogy a becsapódó ionok biztosítják a munkadarabok felmelegedését.



1. ábra A plazmanitridálás sematikus ábrája [4]

A plazmanitridálás legfontosabb előnyei, hogy a folyamat könnyen vezérelhető és ellenőrizhető. A technológia pontosabb szabályozhatósága miatt egyszerűbb vegyületi réteg nélküli felületet előállítani, vagy ha szükséges egyfázisú vegyületi réteget létrehozni. A kezelési hőmérséklet egyrészt alacsonyabb, valamint, ha hidegfalú technológiát alkalmazunk, akkor nincs is szükség külső hőforrásra, ami jelentősen lecsökkenti a technológia költségeit. A technológia reprodukálhatósága nagyon jó, ami igen fontos szempont, valamint nem elhanyagolható az sem, hogy az eljárás rendkívül környezetbarát [4].

Azonban vannak nehézségek is a technológia alkalmazásánál [1][2][3], amelyek felismerése némi csökkenést eredményezett a múlt század 70-es, 80-as éveiben tapasztalt rendkívül dinamikus növekedéshez képest [8]. Ezek között a legjelentősebbek a következők:

- ívképződés,
- üreg-katód hatás (Hollow Catode Effect – HCE),
- katódporlasztás,
- élhatás (edge effect),
- nem egyenletes hőmérséklet-eloszlás a darabon.

Az ívképződés, amely például szerves lerakódást okoz lokálisan az alkatrész felületén, okozhat extrém nagy helyi hőmérsékletet. Emiatt bekövetkezhet helyi olvadás és/vagy anyagkifröccsenés. Egy jelentősebb ívképződés az alkatrészen azt is jelentheti, hogy le kell selejtezni. Az olyan alkatrész esetében, amely egészen csekély mértékben szenvedte ezt el, is szükség lehet időigényes és költséges utómunkálatokra. Az ívképződést okozhatja nemfémes zárványok jelenléte is.

Üreg-katód hatás akkor következik be, amikor bonyolult alakú tárgyakat plazmanitridálnak mély furatokkal, különösen zsákfuratokkal, amelyek megakadályozzák az átmenő gázáramlást. Ez túl-ionizációhoz, és emiatt ellenőrizetlen hevüléshez vezethet a furaton belül. Az elért hőmérséklet rendszerint nem elég magas, hogy megolvassa az anyagot, de okozhat lokalizált szerkezet- és/vagy tulajdonság változást, ami hatással van az alkatrész teljesítményére az alkalmazás során. Ezért az üregkatód hatások reprodukálhatósági kérdéseket vetnek fel és az ipari alkalmazásokban nagy gondot jelentenek. A furat mérete, a nyomás és a plazma áramsűrűsége mind befolyással vannak az üregkatód hatásra.

A katódporlasztás a plazmanitridálás első fázisában hasznos jelenség, mivel ezáltal megtisztul a felület. Azonban a nitridálás folyamatában már nemkívánatos.

Bonyolult alkatrészek esetén problémát okoz, hogy a réteg növekedési sebessége nem egyforma az alkatrész felületén és annak szélein. A széleken az alkatrész több irányból is vesz fel nitrogént, amelyek összeadódnak és az alkatrész helyi deformációjához vezetnek. Ez helyi keménység-növekedéshez, a sarkok, élek letöréséhez vezethet.

Az általánosan használt plazmanitridáló kemencékben, az alkatrészeket körülvevő plazmát használják közvetlenül azok felmelegítésre. Azonban, a

nagy ipari méretű kemencékben, főleg ha teljesen meg vannak töltve, majdnem lehetetlen biztosítani azt, hogy a hőmérséklet ugyanaz legyen a betétben kívül és annak közepén. Ez azért probléma, mivel az eljárás hőmérsékletének precíz felügyelete kell ahhoz, hogy biztosítsák az eljárás megbízhatóságát és megismételhetőségét. E hatás csökkentésére, számos segédhőforrással rendelkező kemencét fejlesztettek ki és használnak.

2.4. Utóoxidálás

A nitridált felületek oxidációjának eljárását a gépjárműiparban néhány éve alkalmazzák, s ily módon növelik a felület korrózióállóságát. Az eljárás során a szabad vas és vasnitrid átalakul stabil vasoxid réteggé, úgy hogy egy megközelítőleg 1 μm vastagságú kémiaiilag ellenálló védőréteg adódik a fehér felületi réteghöz. Az utóoxidáció a nitridáló eljárás részeként is kivitelezhető. Az eredményül kapott felületnek esztétikus fekete színe van és jó kopási ellenállása [8].

Ez a kezelés közvetlenül a nitridálás után is alkalmazható, vízgőz vagy hidrogén és oxigéngáz keverékének bevezetésével, függetlenül attól, hogy gáz vagy plazmanitridálásról van szó.

3. A NITRIDÁLÁS FEJLESZTÉSI IRÁNYZATAI

3.1. Aktív ernyős plazmanitridálás

A plazmanitridálásnál említett problémák megoldására többféle fejlesztés is történt a plazmatechnológiában [8]. A plazmagenerálásban számos fejlesztés valósult meg:

- impulzus áram (microsecundumnyi rövid impulzusok)
- változó frekvencia a néhány Hertz-től a néhány kiloHertz-ig
- a kieső idők rövidítése
- ívképződés esetére vészleállás

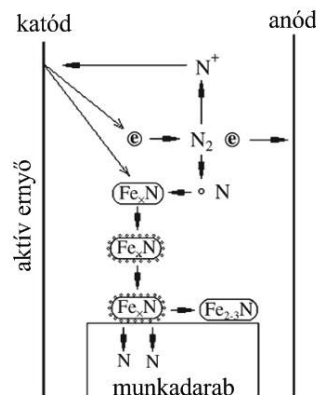
A reaktorok is fejlesztéseken estek át:

- konvektív fűtésű kemencék
- további sugárzásos hevítés
- melegfalú eljárás

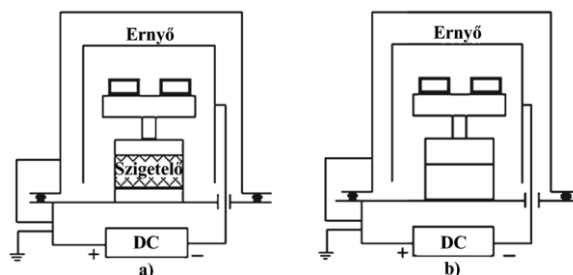
Az igazi áttörést az aktív ernyős plazmanitridálás kidolgozása hozta meg, (active screen plasma nitriding – ASPN), amelynek megjelenése a kilencvenes évek végére tehető. Az eljárás lényege, hogy a munkadarabok köré egy ernyőt/hálót helyeznek, és erre kapcsolják a plazmát kiváltó katód feszültséget (a kemence fala továbbra is anódként van kapcsolva). Az ernyőn furatok vannak, amelyekben helyileg kialakul az üregkátód jelenség. Ennek köszönhetően az ernyő hőmérséklete gyorsan emelkedik, biztosítva a darabok felmelegedését.

Egyes esetekben a kezelendő darabokra egyáltalán nincs feszültség kapcsolva, más esetekben azonban kisebb értékű negatív feszültséget (BIAS power) kapcsolnak a darabokra. A darabokra azért szükséges

feszültséget kapcsolni, amely biztosítja a darab felmelegedését – mivel a hálóról sugárzással átadódó hő önmagában nem képes erre (különösen, ha nagy a távolság a háló és a munkadarabok között vagy nagyon különböző méretűek és geometriájúak) [8]. A munkadarabokra kapcsolt feszültség nem olyan nagy, hogy a plazmaképződés a darabokon jöjjön létre, azonban a rájuk kapcsolt feszültségnek köszönhetően a darabok gyorsabban és egyenletesebben hevülnek, mint ha „lebegő” potenciálban lennének. Ipari méretekben a munkadarabokra kapcsolt feszültség alkalmazása elengedhetetlen [12][13].



2. ábra Az aktív ernyő nitridálási mechanizmusának modellje [4]



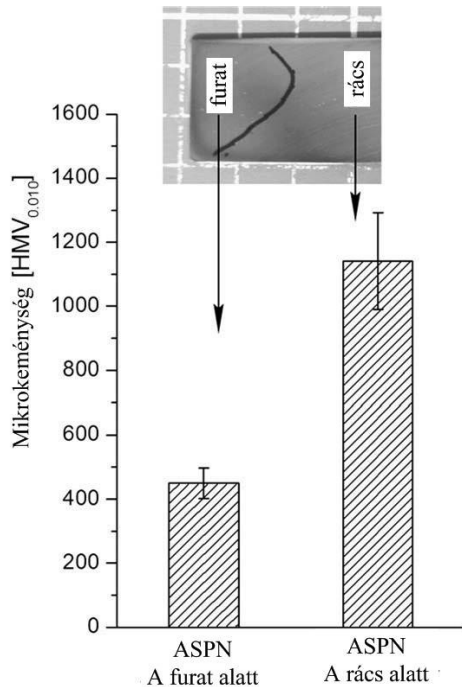
3. ábra Az aktív ernyős plazmanitridálás elvi vázlatja [4] a) lebegő potenciál, b) BIAS feszültség

Az előzők értelmében az aktív ernyőnek kettős szerepe van [4][8]. Egyrészt biztosítja a munkadarab felmelegedését sugárzás révén. Az alkalmazott feszültséggel szabályozható a munkadarabok hőmérséklete. Ily módon a munkadarabok felmelegedése egyenletes. Ez abban az esetben is igaz, ha a kemencetérben lévő töltet nem hasonló geometriájú alkatrészekből áll. A plazmaképződés ernyőre való áthelyezésének köszönhetően nem lép fel üregkátód hatás, élhatás [9], helyi ívképződés vagy túlhevülés. Az ernyő másik fontos szerepe, hogy biztosítja a nitrogénionokat a munkadarab nitridálásához.

Az aktív ernyős nitridálásnál több, az ernyőhöz kötődő befolyásoló tényező is megnevezhető [11]:

- az ernyőn lévő furatok mérete,
- az ernyő geometriája,

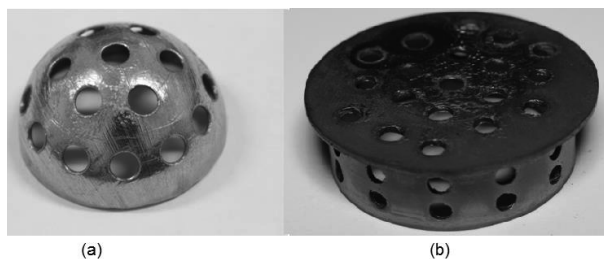
- a távolság az ernyő és a darabok között,
- az ernyő anyaga,
- a kemenceméret,
- a kemencetér nyomása,
- a munkadarabra kapcsolt feszültség nagysága,
- a kezelendő felület helyzete az ernyőhöz képest.



4. ábra Keménység a furatok alatt és között [9]

Ha az ernyőn lévő furatok túl nagyméretűek, akkor a munkadarabok felületén nem lesz egyenletes a réteg. Ahol a háló fedi a munkadarabot, ott szignifikánsan nagyobb lesz a keménység.

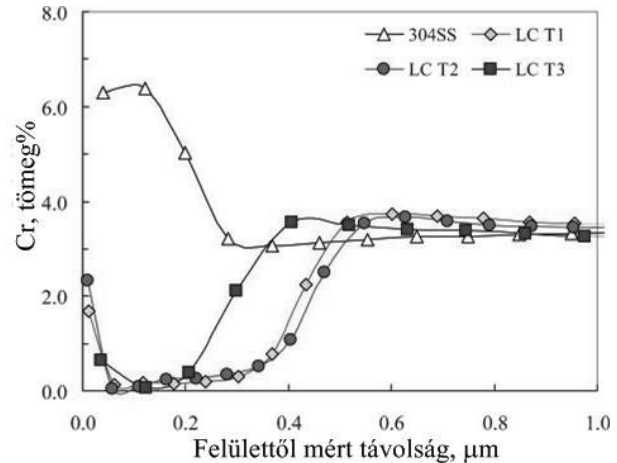
Általánosan elterjedt, hogy a háló hengeres geometriájú, azonban folytak kísérletek félgömb alakú ernyő alkalmazásával is. Az eredmények azt mutatják, hogy a félgömb geometriájú ernyő alkalmazásával nagyobb keménység érhető el [10].



5. ábra Félgömb alakú (a) és hengeres (b) aktív ernyő [10]

Az ernyő töltettől mért távolsága jelentős szerepet tölt be a réteg kialakulásában. Ha a darabokra nincs feszültség kapcsolva, akkor a távolság növekedésének hatása fokozottabb [12].

Fontos azt is figyelembe venni a technológia alkalmazásánál, hogy a kemence méretének hatása (amely valamelyest összekapcsolódik az ernyő-töltet távolsággal is) sem hanyagolható el. Ipari alkalmazásokban a munkadarabokra kapcsolt feszültség alkalmazása szükséges.



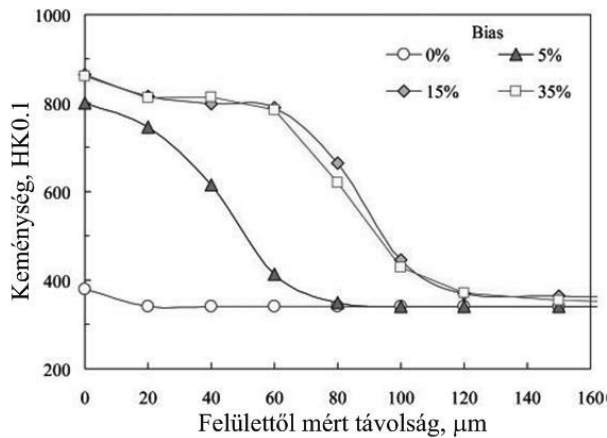
6. ábra Króm-eloszlás 3%-os Cr-Mo acélban korrózióálló (304SS) és alacsony karbontartalmú ötvözten acél ernyővel végzett plazmanitridálás után

Az aktív ernyő anyagának megválasztása nagyon fontos. Alapvetően meghatározza a nitridálás hatását, mivel ott játszódik le a plazmaképződés, a munkadarab felületén adszorbeálódott molekulák ott képződnek. Ha az ernyő anyaga nem acél, hanem réz vagy titán nem érhető el keménységnövekedés az acél felületén [12]. Egyes esetekben az ernyőről nemcsak vasatom válik le, hanem más ötvöző is. Például magas króm tartalmú ernyővel végzett aktív ernyős nitridálás után a munkadarab felületén a nitrogén mellett megnő a króm koncentrációja is (6. ábra). Ez a jelenség igen hasznos lehet gyengén ötvözött acéloknál, hiszen javulnak a felületi réteg tulajdonságai. Azonban krómmal erősen ötvözött munkadarab esetében krómot nem tartalmazó háló alkalmazásakor a felületi króm tartalom csökkenésével kell számolni (6. ábra).

A kemencetérben lévő nyomás növelésével nő az elérhető keménység.

Ha az ernyő mellett a munkadarabra is kapcsolunk feszültséget, nagyon fontos, hogy annak nagyságát helyesen válasszuk meg. Kutatások alapján ennek optimális nagysága az ernyőre kapcsolt feszültség 10-15%-a [12]. A darabokra kapcsolt feszültség hatására (a már korábban említett gyorsabb hevítés mellett) több nitrogén jut el a darabok felszínére. Ez a hatás különösen fontos, ha nagy a távolság a darabok és a háló között.

A munkadarab ernyő felé eső és azzal ellentétes oldalon lévő felülete nem egy formán nitridálódik. Egyes tapasztalatok szerint a különbség csökkenthető a kemencetér nyomásának növelésével.



7. ábra Mélységirányú keménységprofil 722M24, aktív ernyő, 500°C, 5 óra [12]

Az aktív ernyő esetében azonban egyes esetekben nem megfelelő az adhézió a felületi rétegben a hagyományos plazmanitridálással készült réteghez képest [10].

Az aktív ernyős technológia nemcsak nitridálásra, hanem karbonitridálásra, és cementálásra, nitrocementálásra is alkalmas.

Az aktív ernyős nitridálás elsősorban kiküszöböli a hagyományos plazmanitridálás során fellépő nehézségeket, azonban van még egy eddig nem említett előnye is: a feszültség ernyőre való áthelyezése lehetővé teszi a valamilyen okból nem vezető munkadarabok kezelését is. A felületi oxidréteg az acélokon megakadályozta, hogy ezeket az alkatrészeket plazmanitridálni lehessen, azonban az aktív ernyő megteremti ennek lehetőségét. Oxidréteg képződhet a különféle gyártás közben alkalmazott technológiák (öntés, kovácsolás, hőkezelés) során is. Hagományos plazmanitridálás előtt ezt a réteget le kell munkálni, amely növeli a gyártás költségeit és időszükségletét, valamint bonyolultabb geometriánál nem mindig egyszerűen megoldható feladat. Ezen kívül a felületi szennyeződések (olajok, zsírok jelenléte, festék) tartalmazó acélokon a szennyeződések megakadályozták a nitridálást. Aktív ernyő alkalmazásával ezek az elektromosan nem vezető felületi rétegek nem okoznak problémát a hőkezelés során, sőt egyes esetekben a vasoxidból vasnitrid képződik, és a felületi réteg hasonló lesz, mintha az oxidréteg lemunkálásra került volna. Egy erősen oxidálódott felületű fogaskerék esetében például a felületen vörösesbarna oxidréteg volt megfigyelhető, míg nitridálás után a felület a nitridálásnál szokásos sötétszürkére változott [12].

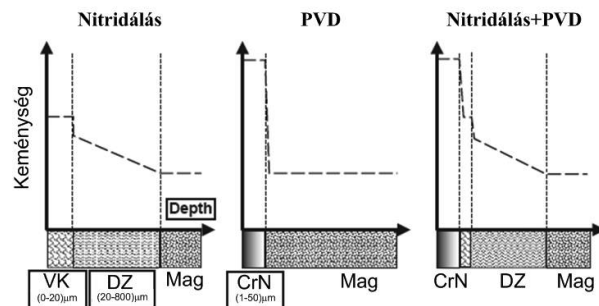
Az aktív ernyő alkalmazása egy teljesen új alkalmazási lehetőséget is megnyit a technológia számára, úgy mint a műanyagok nitridálása. Kísérletek folytak UHMWPE (ultra nagy molekula súlyú polietilén), PP (polipropilén) és POM (polioximetilén) felületkezelésére is. Az ily módon kezelt polimereknek megnő a felületi keménysége, rugalmassági modulusa, kúszási, karc és kopási ellenállása [12].

3.2. Komplex kezelések

A nitridálás technológiájának egy további fejlesztési iránya túlmutat a technológia határain. Fejlesztés alatt állnak olyan technológiák, amelyek során a nitridálás után még valamilyen bevonatot visznek fel az alkatrész felületére.

E technológiák alkalmazásának fő előnye, hogy olyan anyagminőségek alkalmazása válik lehetővé, amelyeket csak az egyik technológia alkalmazásával nem lehetne az adott terhelési körülmények között használni. Ennek oka lehet az alapanyag nem megfelelő szilárdsági, korróziós, vagy fáradási tulajdonságkombinációja. A bevonat technológiák önmagukban nem javítják a fáradási tulajdonságokat, míg a termokémiai kezelések nem minden esetben biztosítanak megfelelő felületi keménységet, vagy korrózióállóságot [14].

A nitridálás vagy karbonitridálás után felvitt bevonat többféle lehet. Egyik változata, amikor a plazmanitridálással készült felületi rétegre PVD bevonatot visznek fel [5][15]. Bár a plazmanitridálás önmagában is kopásálló felületet eredményez, a PVD bevonatnak jobb az ellenállása az adhéziós és az oxidációs kopással szemben. Az ilyen esetekben a kopásálló bevonat és nitridált kéreg alatt egy viszonylag nagy keménységű diffúziós zóna helyezkedik el, amely megfelelő alátámasztást biztosít a kéregnek.



8. ábra Keménység alakulása plazmanitridáláskor (a), PVD bevonatoláskor (b), komplex kezeléskor (c) [5]

Ha a nitridálás után TiN, CrN vagy TiN/CrN bevonatot viszünk fel a felületre, akkor egy nagyon kemény kopás-, hő- és korrózióálló réteget kapunk [6][7][16].

Az így képzett komplex felületi rétegek elsősorban a felületre közvetlenül ható igénybevételeknek való megfelelést biztosítják. A felület kifáradással szembeni ellenállást a nitridálással növelni lehet. Ha a nitridált réteg 0,4-0,5 mm mélységet elér, akkor az már megfelelő [7][17].

Minden esetben nagyon fontos a bevonat megfelelő tapadása. Ezért lényeges, hogy a bevonat felvitele előtt a felületről el kell távolítani a porózus réteget, amennyiben képződött ilyen. A nitridált réteg szerkezete nagymértékben meghatározza az adhéziót. Ma már egyes esetekben megoldott a nitridálás és a bevonat egy

térben való felvitele, amely nemcsak költségcsökkenést, de megfelelő tervezés mellett jobb bevonat tulajdonságokat is biztosít [14].

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A hőkezelés napról napra fejlődik. Ennek oka egyrészt az alkalmazott anyagminőségek fejlődése, másrészt az ipari igények változása. A nitridálás jelentősége elsősorban a kopásnak kitett alkatrészek kezelésében van. Ma már hagyományosnak mondható a gáz és a plazmanitridálás. Azonban a plazmanitridálás során olyan nehézségek merülnek fel, amelyek szükségessé tették a technológia továbbfejlesztését. A felmerülő problémák megoldására fejlesztették ki az aktív ernyős plazma nitridálást, amellyel kiküszöbölhetők a hagyományos eljárás során fellépő nehézségek. Az aktív ernyős plazmanitridálás technológiája a legmodernebb nitridáló eljárás, és így kutatása is még a kezdeteknél tart.

A nitridálási technológia egy további, jelentős fejlesztési lehetősége a komplex bevonatok alkalmazásában van. Ekkor a nitridált felületre valamilyen bevonatot visznek fel. Az ily módon kialakított réteg kopási ellenállása javul. Ennek egyik oka, hogy a bevonat jóval keményebb, mint a nitridált réteg. Azonban a nitridált réteg alátámasztást nyújt a bevonatnak a lepattogzás ellen, így a kettős réteg együttesen növeli az alkatrész élettartamát.

5. IRODALOM

- [1] David Pye: Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, ASM International, December 1, 2003., ISBN: 978-0871707918
- [2] G. Krauss: Steels: Heat Treatment and Processing Principles, ASM International, 1997. ISBN: 0-87170-370-X, p. 305-315
- [3] Dr. Kolozsváry Zoltán: Plazmanitridálás aktív ernyő alkalmazásával, XXII. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás 2008.
- [4] C. Zhao, C.X. Li, H. Dong, T. Bell: Study on the active screen plasma nitriding and its nitriding mechanism, Surface & Coatings Technology 201 (2006) 2320–2325
- [5] J. Vetter, G. Barbezat, J. Crummenauer, J. Avissar: Surface treatment selections for automotive applications, Surface & Coatings Technology 200 (2005) 1962–1968
- [6] Winfried Gräfen, Bernd Edenhofer, New developments in thermo-chemical diffusion processes, Surface & Coatings Technology 200 (2005) 1830–1836
- [7] H.-J. Spies, B. Larisch, K. Höck, E. Broszeit, H.-J. Schröder: Adhesion and wear resistance of

- nitrided and TiN coated low alloy steels, Surface and Coatings Technology 74 75 (1995) 178-182
- [8] Jean Georges, Jules Georges, Jean-Paul Lebrun: Plasma-nitriding and postoxidising: An innovative and eco-friendly solution with strong reduced consumption of gas and energy, Conference Proceedings, Nitriding an Nitrocarburising, 29 – 30 April 2010, Aachen, Germany
- [9] Santiago Corujeira Gallo, Hanshan Dong: On the fundamental mechanisms of active screen plasma nitriding, Vacuum 84 (2010) 321–325
- [10] Luiz F. R. Venturini, Flávia B. Artuso, Inácio da F. Limberger, Cristiane de S. C. X. Li: Differences on the Nitrided Layer Between Classic Active Screen Plasma Nitriding and Active Screen Plasma Nitriding with a Semispherical Cathodic Cage, International Federation of Heat Treating and Surface Engineering 19th Congress, 17-20 October 2011
- [11] Igor Burlacov, Heinz-Joachim Spies, Horst Biermann, Stephan Köhler, Hoang Le Thien, Investigation on the active screen plasma nitriding, Conference Proceedings, Nitriding an Nitrocarburising, 29 – 30 April 2010, Aachen, Germany
- [12] C. X. Li : Active screen plasma nitriding – an overview, Surface Engineering 2010 VOL 26 NO 1–2 135-141
- [13] E.D. Doyle, P. Hubbard: Innovation in nitriding, 1st Mediterranean Conference on Heat Treatment and Surface Engineering, Dec. 1-3, 2009; Sharm El-Sheikh; EGYPT
- [14] Helmut Kaufmann: Industrial applications of plasma and ion surface engineering, Surface and Coatings Technology 74-75 (1995) 23-28
- [15] Jerzy Smolik, Jan Walkowicz, Jan Tacikowski: Influence of the structure of the composite: 'nitrided layer/PVD coating' on the durability of tools for hot working, Surface and Coatings Technology 125 (2000) 134–140
- [16] SangYul Lee: Mechanical properties of TiN_x/Cr_{1-x}N thin films on plasma nitriding-assisted AISI H13 steel, Surface & Coatings Technology 193 (2005) 55– 59
- [17] M. Bader, H.-J. Spies, K. Höck, E. Broszeit, H.-J. Schröder: Properties of duplex treated (gas-nitriding and PVD -TiN, -Cr₂N) low alloy steel, Surface and Coatings Technology 98 (1998) 891-896.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„Az ismertett kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.”