

6. FELÜLETMÓDOSÍTÁS

A szilárdtestek felületének módosítása egyre növekvő szerepet játszik az ipar és kutatás számos területén (surface engineering). A cél a felületi tulajdonságok javítása az összetétel és/vagy a szerkezet megváltoztatása révén. Jellegzetes példák:

- különleges összetételek és mintázatok kialakítása félvezetőkön,
- kemény, kopás-, illetve korrózióálló bevonatok készítés (szerszám- és gépipar, járműipar),
- különleges optikai tulajdonságú és dekoratív bevonatok készítése.

MÓDSZEREK

A gyakorlatban használt nagyszámú módszer két csoportba sorolható:

a) Rétegleváltás (új réteg felvitele a hordozó felületére)

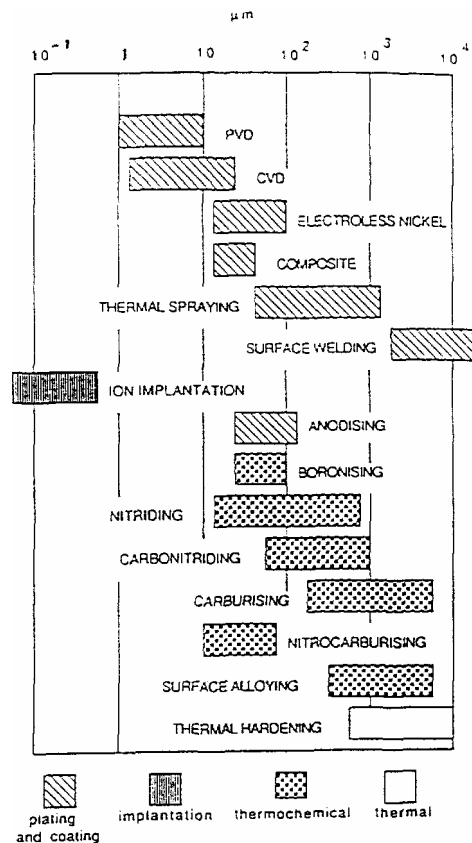
- Bevonatok készítése kémiai és elektrokémiai úton
- Termikus szórás
- PVD
- CVD.

A módszerek egy részét nemcsak bevonatok, hanem „önhordó” lemezek és tömbi anyagok előállítására is használják.

b) Felületmódosítás (a hordozó felületének átalakítása)

- Nem-fémes elemek koncentrációjának növelése heterogén reakciókkal
- Ionimplantáció
- Felületmódosítás nagy energiasűrűségű besugárással
 - Lézerrel
 - Elektronsugárral.

Az egyes módszerekkel készített bevonat vagy a módosított felületi *réteg vastagsága* tág határok ($10^{-1} - 10^3 \mu\text{m}$) között változik. Legnagyobb tradíciója a *fém* felületek módosításának van. A *félvezető* eszközök gyártása nagy lendületet adott az említett felületmódosító eljárások fejlődésének. Számos, eredetileg mikroelektronikai célból kidolgozott eljárás más anyagcsaládok esetében is elterjedt (pl. ionimplantáció). Újabban intenzíven kutatják a *kerámiák* és *polimerek* felületmódosításának lehetőségeit is. A módszerek tökéletesítéséhez hozzájárult a felületi rétegek szerkezetének és összetételének tanulmányozására szolgáló *vizsgáló módszerek* (felületi pásztázó alagút mikroszkópok, téremissziós mikroszkópok, Auger spektrométerek, stb.) rohamos fejlődése.



Typical thickness of engineered surface layers

6.1 RÉTEGLEVÁLASZTÁS

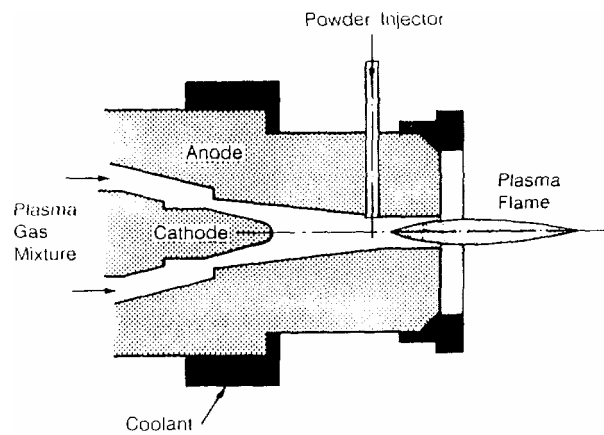
6.1.1 Bevonatok készítés kémiai és elektrokémiai úton

Az ipar régóta használ galvanikus úton készített korrózióálló bevonatokat. A korábbi keménykróm bevonatok mellett újabban megjelentek az *amorf Ni-P* rétegek is. Az arany bevonatok használata ugyancsak elterjedt nemcsak dekoratív célokra, hanem elektromos érintkezőkben is. Az eljárásoknál használt anyagok és melléktermékek (galvánfürdők, galván iszap, stb.) jelentős része veszélyes anyagnak minősül és kezelése fokozott figyelmet követel.

6.1.2 Termikus szórás (thermal spray)

Termikus szórás néven azokat az eljárásokat foglaljuk össze, melyek közös vonása, hogy a készítendő bevonat anyagából finom olvadék cseppeket készítenek, majd ezeket gáz- vagy plazmasugár segítségével, nagy sebességgel a hordozóra ütköztetik. Az olvadékcseppek előállítása történhet lángban, ívben, termikus plazmában vagy robbantó csőben. Az anyagot por vagy huzal alakban adagolják.

Plazmaszórás esetén a vízzel hűtött réz anód és volfrám katód közé kb. 50 V-os egyenfeszültséget kapcsolnak, majd nagyfeszültségű vagy nagyfrekvenciás impulzus segítségével plazmát hoznak létre. Ebbe táplálják be a bevonat anyagát por formájában. A plazma sugárban a porszemcsék megolvadnak és a vivőgázban a hordozó felé repülnek. Ebben az elrendezésben a kialakuló plazma közel 1000-szer sűrűbb, mint egy alacsony nyomású plazma-gázkiszülésben. Az ionok és elektronok gyakori ütközése és rekombinációja nagy entalpiaváltozást eredményez. A plazmasugárban lokálisan 10.000 – 15.000 °C hőmérséklet alakulhat ki. Ezért még a magas olvadáspontú anyagok (pl. kerámiák) szórására is alkalmas.

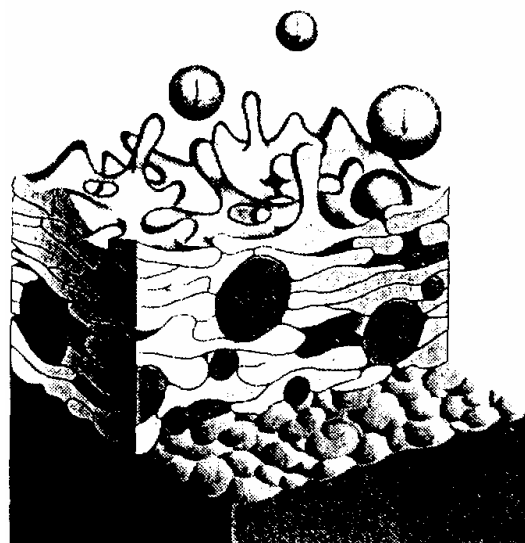


Plazmaszóró pisztoly vázlata

A plazmaszórásnál vivőgázként legtöbbször tiszta argont vagy nitrogént használnak, melyhez egyéb gázt, pl. He-ot vagy H₂-t adnak.

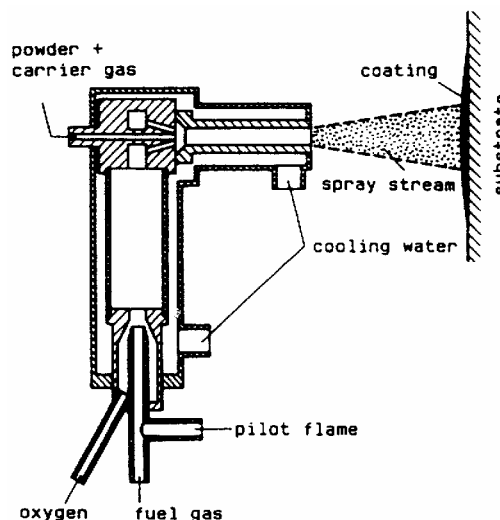
A termikus szórással készített bevonatok jellegzetes réteges *mikroszerkezetet* mutatnak, melyben az ellapult szemcsék mellett jól megfigyelhetők a pórusok, továbbá meg nem-olvadt illetve eloxidálódott részecskék is.

A réteg kialakulásának vázlata termikus szóráskor →



A **lángszórás** esetén a bevonat anyagát magas hőmérsékletű lángba juttatják. Újabban különösen jó minőségű bevonatokat készítenek az ú.n. **nagysebességű oxigén lángszórással (HVOF)**. A láng magas hőmérsékletét olyan gázok elégeése biztosítja, mint az acetilén, vagy a hidrogén. A port külön vivőgázzal adagolják a lángba. A részecskék sebessége elérheti a 400 m/s-ot.

A nagysebességű oxigén lángszórás (HVOF) elve →



A termikus szórás **előnyei**:

- nagyon sokféle anyag szórható (fémek, oxidok, boridok, stb.),
- levegőn is alkalmazható,
- a hordozó nem nagyon melegszik fel, hőmérséklete általában 400 °C alatt marad,
- a bevonat aránylag vastag (több mm) is lehet. Felhasználható kopásnak kitett alkatrészek helyi javítására,
- speciális magra történő szórással, majd a mag utólagos eltávolításával különleges alakú kerámia alkatrészek készíthetők („plazmakerámia”).

Hátrányok:

- a réteg **tapadása** esetenként nem kielégítő, mivel a hordozóra csapódó részecskék és a hordozó között csak „mechanikai” kötés létesül. A tapadás elősegítése érdekében a hordozó felületét előzetesen feldurvítják homokfúvással vagy más módon,
- a réteg porózus jellege esetenként hátrányos lehet,
- számos termikus szórási eljárásnál környezeti ártalmat jelenthetnek a használt gázok, a por, az égéstermékek (pl. ózon), tovább a gázok nagy sebességgel történő áramlását kísérő zaj.

Alkalmazások

- korábban a legtöbb gyakorlati felhasználás **korrózióálló** bevonatok (Zn vagy Al szórása acéllemezre), magas hőmérsékleten is korrózióálló bevonatok (kerámia bevonat készítés turbinalapátokra, melyek magas hőmérsékleten, oxidáló atmoszférában működnek), valamint **kopásálló bevonatok** készítésére irányult.
- Újabban termikus szórást használnak **fém alapú kompozitok**, valamint **funkcionálisan gradiens anyagok** készítésére is. (9. fejezet).

6.1.3 PVD (Physical Vapor Deposition)

Az 5. fejezetben részletesen foglalkoztunk a gőzök fizikai módszerekkel történő leválasztásának (PVD) két alaptípusával, a vákuumgőzöléssel és a katódporlasztással.

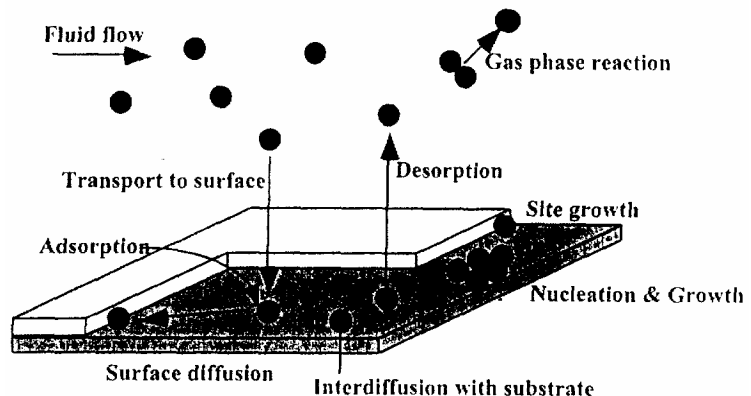
6.1.4 CVD (Chemical Vapor Deposition)

A CVD eljárásoknál a réteg leválasztása a hordozóra heterogén kémiai reakcióval történik, magas hőmérsékleten. Míg a PVD eljárásoknál a szubsztrát hőmérséklete csak ritkán éri el az 500 °C-ot, addig a CVD esetében tipikusan 500 – 1000 °C-os felületre történik a leválasztás.

A heterogén kémiai reakciók mechanizmusa bonyolult, és az esetek zömében az alábbi elemi lépésekre bontható:

- a gázok transzportja a szilárd anyag felületéhez
- adszorpció a felületen
- felületi reakció
- a reakciótermékek egy része bediffundál a szilárd anyagba, a felületen megtörténik az új fázis gócainak képződése és növekedése
- a gáz alakú reakciótermékek deszorpciója és eltávozása a gázfázisba.

A CVD eljárásoknál lejátszódó alapfolyamatok vázlatos ábrája →



A CVD eljárásoknál biztosítani kell a gázelegy kontrollált előállítását, a szubsztrát fűtését (ált. ellenállás-fűtés vagy indukciós hevítés alkalmazásával), és az eltávozó – gyakran veszélyes – gázelegyek kezelését. Az ábrán egy ipari berendezés vázlatát mutatjuk be.

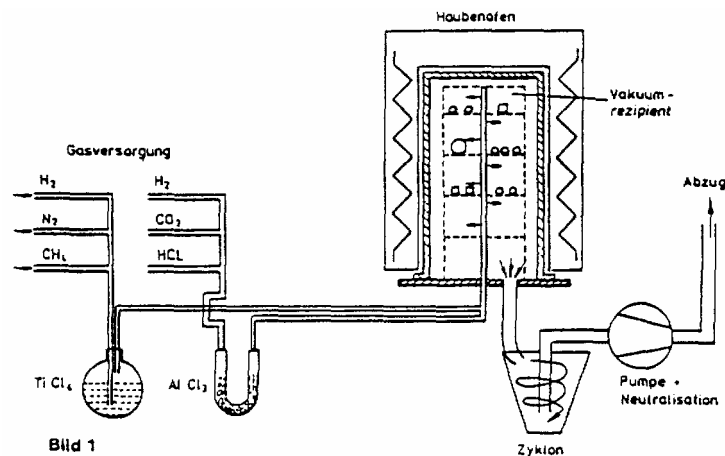


Bild 1

A CVD eljárások *előnyei*:

- tömör, jól tapadó bevonat készíthető (diffúzió),
- jól használható bonyolult alakú és üreges hordozó esetében is,
- epitaxiás növesztés is megvalósítható.

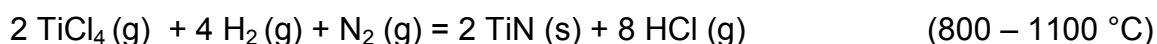
Hátrányok:

- magas hőmérsékleten a szubsztrát deformációja következhet be,
- a reagensek drágák, sokszor agresszívek (pl. kloridok). Ezért gondoskodni kell a reakciótermékek semlegesítéséről,
- ipari méretekben egyes munkadarabok esetében nem gazdaságos.

Alkalmazások

A CVD eljárásokat az ipar számos területén használják. A továbbiakban néhány olyan példát mutatunk be, melyek nem tartoznak a mikroelektronika tárgykörébe. (Az utóbbiakat illetően a doktoranduszok részére összeállított angol nyelvű jegyzetre utalunk).

- a) kemény, kopásálló TiN bevonatok kialakítása keményfém (WC-Co) szerszámokon. A keményfém szerszámok kopásállósága jelentősen fokozható TiN bevonatokkal.



- b) nagytisztaságú fém rétegek (és tömbi anyagok) előállítása

Azokban az esetekben használható, amikor a fém más elemmel pl. jóddal folyékony vegyületet képez. A jodidok termikus bontása tiszta fémeket eredményez. Példák:



- c) mesterséges gyémánt előállítása csökkentett nyomáson

A gyémánt a szén (szobahőmérsékleten és atmoszférikus nyomáson) metastabilis módosulata. Fizikai tulajdonságai egyedülállóak: az elemek között a legnagyobb keménység, legjobb hővezetés és átlátszóság nagyon széles hullámhossz tartományban. A nagytisztaságú gyémánt széles tiltott sávú félvezető. Nem véletlen, hogy jelentős erőfeszítések történtek mesterséges gyémánt előállítására, ipari célokra. A második világháborút követően a General Electric Co. kidolgozott ugyan egy ipari eljárást *szintetikus gyémánt* előállítására, de ez - az extrém körülmények ellenére (50 kbar nyomás, 1200 °C hőmérséklet) is - csak aránylag kis méretű (< 10 mm) gyémánt szemcsék előállítását tette lehetővé.

A múlt század hatvanas éveiben intenzív kutatások kezdődtek mesterséges gyémánt rétegek előállítására, *CVD módszerrel, csökkentett nyomáson*. A több mint egy évtizeden át eredménytelen kutatások végül is sikerre vezettek. A nyolcvanas évek közepére sikerült vékony (~ 10 μm), összefüggő polikristályos gyémánt rétegeket előállítani. A későbbiek folyamán a leválasztás sebességét lényegesen megnövelték, ez az ár drasztikus csökkenését eredményezte. A kilencvenes évek végére 1 karát (= 200 mg) mesterséges gyémánt 5 dollárba került.

Napjainkban kereskedelmi termékként kaphatók gyémánt bevonatú keményfém szerszámok (Al megmunkálásra), optikai ablakok (10 – 30 cm átmérőjű, néhány mm

vastag) és a gyémánt jó hővezetését kihasználó szubsztrátok (nagyteljesítményű diódák ill. lézerek chip tartója).

A CVD gyémánt rétegek előállítására több módszert dolgoztak ki, melyek közül az alábbiak terjedtek el:

- **Izzószállal segített CVD (hot-filament CVD)**

A gyémánt réteget $H_2 - CH_4$ elegyből (99:1) választják le, 40 torr nyomáson, Si szubsztrátra 1000 °C körüli hőmérsékleten. A szubsztrát közelébe izzószálat helyeznek el (~ 2000 °C), melynek a metán termikus bontásában van szerepe.

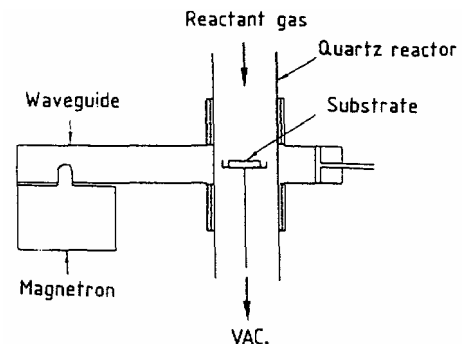
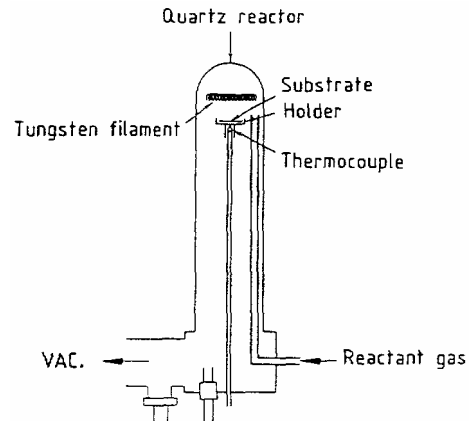
Az izzószállal segített CVD berendezés vázlat →

A réteg növekedési sebessége kb. 1 $\mu m/ó$. A gázfázisban és a felületen lejátszódó folyamat mechanizmusát behatóan tanulmányozták. Egyértelműen kimutatták az atomos H és a metán bomlásakor keletkező néhány gyök (pl. C_2), továbbá a kis mennyiségben adagolt oxigén szerepét.

- **Plazmával segített CVD (plasma assisted CVD)**

A leválasztás itt is $H_2 - CH_4$ elegyből történik, alacsony nyomáson. Ennél a módszernél plazma (gyakran mikrohullámú plazma, tipikusan 2.54 GHz) játssza azt az „aktiváló” szerepet, amit az előbbi esetben az izzószál.

Plazmával segített CVD berendezés vázlat →



Szubsztrátként szintén Si lapkát használnak. A munkakamra: kvarc cső. Ilyen rendszert fejlesztettek ki a BME Fizikai Intézetében is.

A CVD módszerekkel előállított gyémánt réteg *polikristályos* szerkezetű.

További lehetőségek:

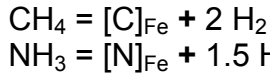
- *Plazmasugár* illetve
- *Acetilén –oxigén láng felhasználása* (lásd a plazmaszórásnál leírtakat).

Az utóbbi módszereknél lényegesen megnövelték a leválasztás sebességét, de a kapott termék minősége gyengébb, mint az izzószállal illetve plazmával segített CVD-vel előállítottaké.

6.2 FELÜLETMÓDOSÍTÓ ELJÁRÁSOK

6.2.1 Nem-fémes elemek koncentrációjának növelése heterogén fém-gáz reakciókkal

Különösen elterjedt vas/acél felületi edzésére. A bevitt nem-fémes elem gyakran intersticiális vegyületet képez (karbidot, nitridet), mely lényegesen keményebb, mint a szubsztrát belseje. Példák: vas izzítása CH_4/H_2 vagy NH_3/H_2 gázelegyenben



karbonizálás
nitridálás

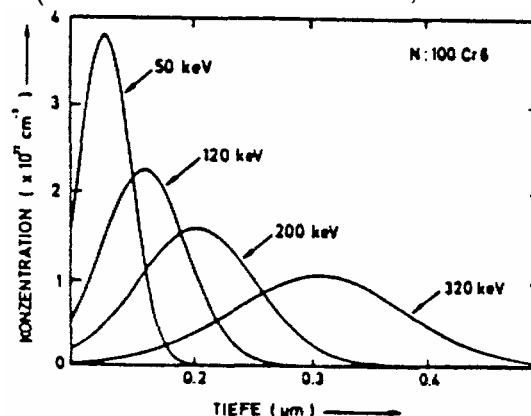
6.2.2 Ionimplantáció

Az ionimplantációnál a szilárd anyag felületének módosítása az anyagba nagy energiával ütköző és beépülő ionok felhasználásával történik. Ezen eljárásnál valamilyen ionforrásban ionokat hoznak létre, ezeket esetleg tömeg szerint szeparálják, majd gyorsítják (20 - 300 kV) és a céltárgyba ütköztetik. Az ionok a felület közelében levő sekély rétegben (ált. $< 1 \mu\text{m}$) veszítik el energiájukat. A beépülő ionok megváltoztatják a szilárd test felületének összetételét és szerkezetét. Mindez bonyolult mechanizmus szerint módosíthatja a szilárd test mechanikai (keménység, kopás stb.), kémiai (korrózió), optikai és egyéb tulajdonságait.

Az implantálás alacsony hőmérsékleteken történik (ált. $300 \text{ }^\circ\text{C}$ alatt), ezért a céltárgy hő hatására történő deformációja elkerülhető. A felületet csak kis mélységben változtatja meg, a tömbi tulajdonság változatlanul megmarad. A felület összetétele tág határok között változtatható, hiszen elvileg bármely ion implantálható. A bevitt anyag mélységbeli eloszlása változtatható.

Az eljárás hátrányai közé sorolható a magas költség (bonyolult berendezés), a céltárgy méretének korlátozottsága (vákuum kamra), esetenként a kis behatolási mélység. A hagyományos implantációval csak a "látható" felületek módosíthatók, bonyolult üregek nem.

Az ionok mélységbeli eloszlása a gyorsító feszültséggel szabályozható, ahogy ez az alábbi ábrából is látható (szubsztrát: Fe8Cr ötvözet, ion: nitrogén, dózis: $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$)



A gyorsító feszültség növelésével a behatolási mélység maximuma a minta belseje felé tolódik el, az adalék koncentrációja a felület közelében kicsi. A profil korrigálható különböző gyorsító feszültségek egymást követő alkalmazásával. Nagy gyorsító feszültségeknél az ionok beépülésén kívül egyéb folyamat – porlasztás is – végbe megy és az elérhető koncentrációt limitálja.

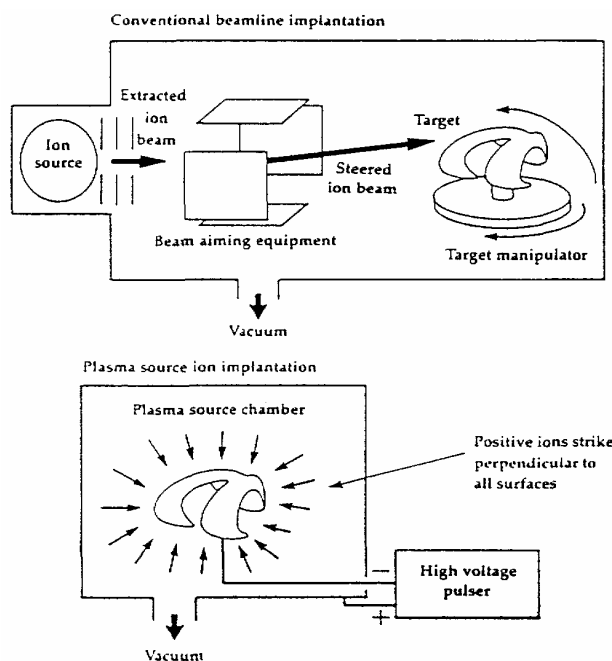
Berendezés:

Egy *hagyományos (beamline) ioninplanter* főbb részei az alábbiak

- ionforrás
- gyorsítás
- pásztázás
- mintakamra, a targettel. Bonyolult alakú felületek implantálásához a targetet mozgatni kell.

Ezt a hátrányt kűszöböli ki a *plazma-immerziós* vagy *plazma forrásos* implanter (plasma source ion implanter), melynél az ionokat nem ionsugárból, hanem plazmából juttatják a felületre, impulzus üzemben.

A kétféle implantációt hasonlítjuk össze az alábbi ábrán:




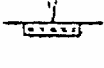
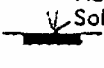
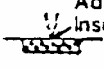
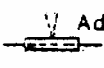
Felhasználás

Az ionimplantáció a hatvanas évek végétől kezdve a félvezető ipar nélkülözhetetlen eljárásává vált. A hetvenes években megkezdődött az ionimplantáció alkalmazása egyéb anyagfajták, főleg fémek felületének módosítása ezzel az eljárással. Jelenleg az ionimplantációt ipari méretekben használják kopás- és korrózióálló felületek kialakítására különféle szerszámoknál és a szervezetbe beültetett egyes izületfajtáknál (főleg csípőprotéziseknél).

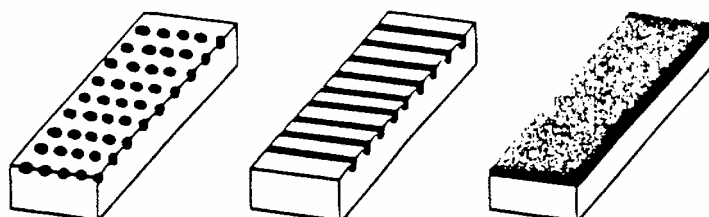
6.2.3 Felület módosítás nagy energiasűrűségű besugárással (elektronsugárral vagy lézerrel)

Eljárások:

- *edzés*: a felület gyors felhevítése majd lehűlése (olvadás nélkül)
- *olvasztás*: a munkadarab felületi rétegének megolvasztása
- *ötvözés*: ötvözőelem beolvasztása a felületi rétegbe
- *beágyazás*: nem elegyedő anyag bevitele a felületi rétegbe
- „*facing*”: a felületről kiemelkedő anyag beágyazása

Solid-phase processes	Liquid-phase processes
 <p>Phase transformation Hardening</p>	 <p>Fusing</p>
	 <p>Added material Soluble in molten base material Alloying</p>
	 <p>Added material Insoluble in molten base material Embedding</p>
	 <p>Added material Facing</p>

A felületmódosítás lehet teljes vagy részleges



Hatás:

- a felületi réteg *kémia/összetétele* változik meg
- a felület *szervezete* változik meg (szemcsefinomodás, kiválások méretének csökkenése, túltelített oldat a gyors megszilárdulás eredményeképpen). Amorf réteg kialakulása is lehetséges (laser glazing).

Módszerek:

- *elektronsugaras olvasztás*, a sugár pásztázásával; a módosított réteg vastagsága aránylag nagy, jellemzően több száz μm
- *lézeres olvasztás*, a Sugár vagy a munkadarab mozgásával (a módosított réteg vastagsága lényegesen kisebb, átl. $< 1 \mu\text{m}$), a hűtési sebesség extrém nagy lehet pl. $10^8 - 10^{11} \text{ K/s}$

6.2.3.1 FELÜLETI OLVASZTÁS LÉZERREL

Alapok

A hatvanas évek második felétől a lézereket az anyagkutató és gyártás egyre újabb területein használják pl. lézeres vágás, hegesztés, felületmódosítás stb.

A lézeres felületi olvasztást legtöbbször fémek esetében alkalmazzák, gyorsan megszilárdult felületi rétegek kialakítása érdekében. A fémolvadékok gyors megszilárdulásához nagy hőmérsékletgradiens (nagy teljesítmény sűrűség) szükséges. Létrehozásának feltételei: nagy teljesítmény, jó fókuszálás és jó elnyelés (abszorpció).

Teljesítmény: a felület módosítás szempontjából legfontosabb lézer típusok műszaki jellemzőit a következő táblázat mutatja.

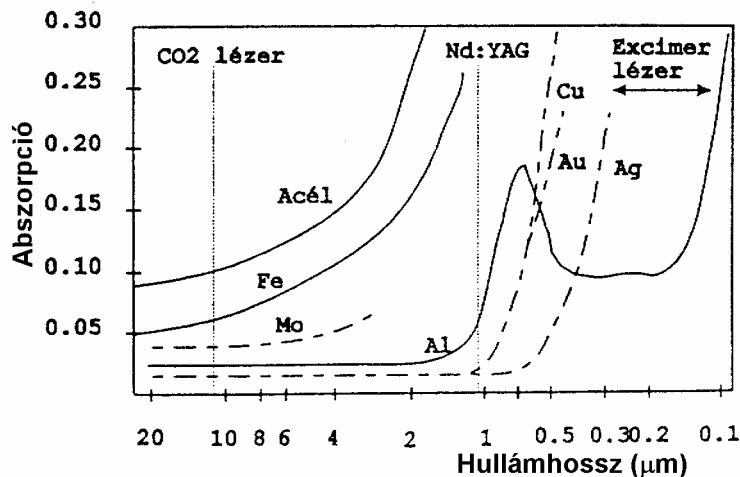
Mean Power of Different Lasers over a Decade

Type	Max. CW or mean power (kW)	Pulse duration heating time	Year	Max. power flux density (W/cm ²)	Quenching rate for pure iron
CW CO ₂	5	1 ms	1980	10 ⁶	1000 K/1 ms
Pulsed CO ₂	50	1 ms	1990	10 ⁷	1000 K/0.1 ms
CW Nd:YAG	0.2	1 ms	1980	10 ⁷	1000 K/0.1 ms
Pulsed Nd:YAG	2	1 ms	1990	10 ⁸	1000 K/10 μs
Excimer	0.08	40 ns	1980	10 ⁹	40K/40 ns
Excimer	0.8	40 ns	1990	10 ¹⁰	400K/40 ns

Quench rates are calculated for the shown pulse durations or, in case of CW lasers, for the given heating times. Maximum power flux density not only depends on maximum power but also on absorption, focusability, and plasma formation during irradiation.

Fókuszálhatóság: a gyakorlatban elérhető foltátmérő tipikusan a hullámhossz tízszerese.

Abszorpció: az energia elnyelés az anyagi minőség függvénye. Fémek esetében a reflexió jelentős, esetenként több mint 90 %. A fémek reflexióját esetenként bevonattal csökkentik, pl. grafittal.



Az abszorpció függ a tárgy hőmérsékletétől és a lézer fény teljesítménysűrűségétől is.

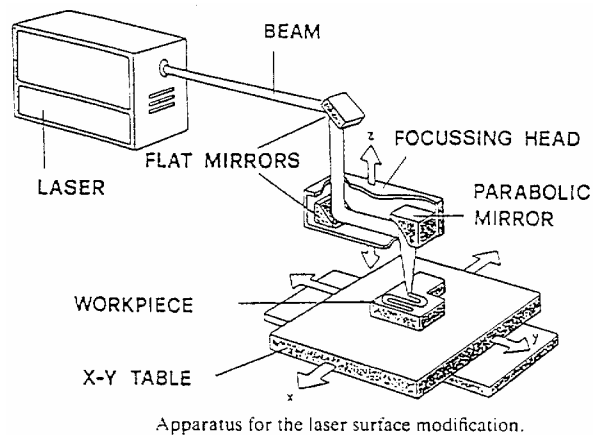
Berendezés

Fő részei:

- teljesítmény lézer a vezérlő és kiszolgáló egységekkel
- a munkadarab vagy a sugár mozgását biztosító egység

Gyakoribb eljárások

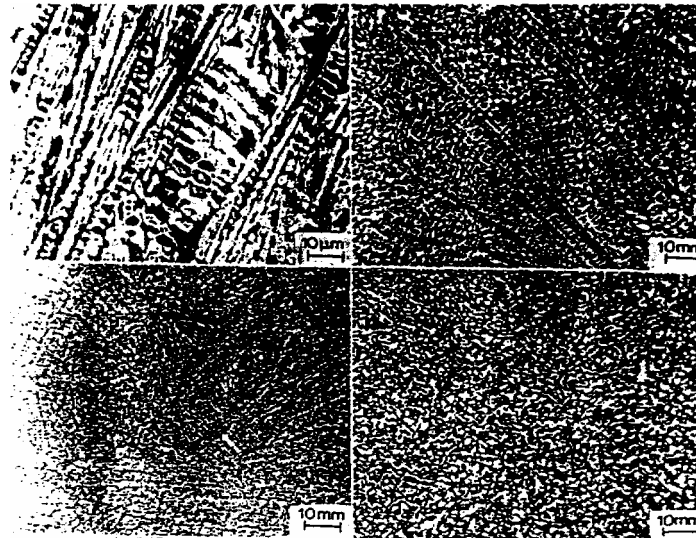
- egyszerű *felületi átolvasztás*, a sugár vagy a minta mozgásával
- *felületi ötvözés* (a felületre helyezett anyag ráolvasztása vagy az ötvöző anyag folyamatos adagolása)



Szerkezet

A megszilárdulás körülményeitől és az összetételtől függően mikrokristályos vagy amorf felületi réteg hozható létre. A nagy megszilárdulási sebesség a mikroszerkezet alkotóinak (a szemcsék, a dendritok, a kiválások) méretének csökkenéséhez vezet. Mindez együttesen a hagyományos metallurgiai módszerekkel előállított anyagokhoz képest nagyobb kémiai homogenitást, kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat (nagyobb szilárdságot) eredményez.

Az alábbi ábrák különböző sebességgel megszilárdult, lézerrel átolvasztott öntöttvas felületek szövetszerkezetét mutatják.



Alkalmazások

- Öntöttvas (Fe-C-Si ill. Fe-O-Cr) továbbá egyes alumínium ötvözetek (Al-Si) felületi átolvasztása lokálisan, kopásálló részek kialakítása céljából.
- Fémolvadékok gyors megszilárdulásának kutatása (eddig ezzel a módszerrel sikerült a legnagyobb hűlési sebességet, 10^{11} K s^{-1} megvalósítani).

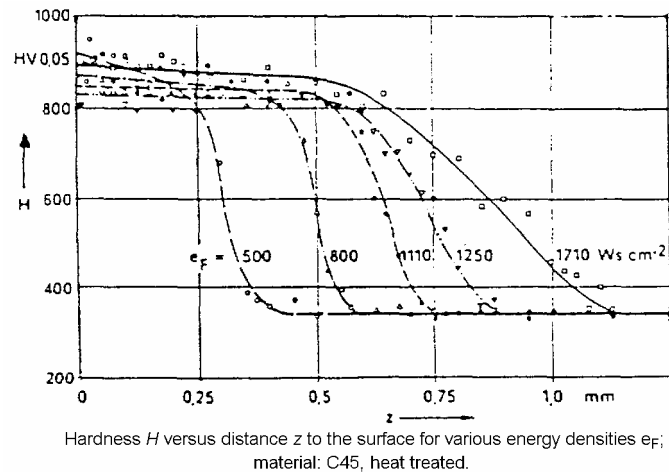
6.2.3.2 FELÜLETI OLVASZTÁS ELEKTRONSUGÁRRAL

A felület átolvasztása elektronsugárral is történhet. Műszaki okokból az elektronsugarat mozgatják (pásztázás).

Főbb jellemzői:

az elektronágyú teljesítménye:	5 - 50 kW
teljesítmény sűrűség:	$10^8 - 10^7 \text{ Wcm}^{-2}$
átadott energia:	néhány száz - néhány ezer Wcm^{-2}
módosított réteg vastagsága:	0.3 - 1 mm

A következő ábra különböző energiasűrűséggel átolvasztott öntött vas felület keménységét ábrázolja a mélység függvényében.



Az elektronsugaras felületi olvasztás előnyei: az elektronsugár mozgatása egyszerű. Az energiaátadás nem függ a felület fényvisszaverésétől, mint a lézerek esetén.

Az elektronsugaras felületi átolvasztás mégsem terjedt el, mivel költséges berendezést igényel és a munkadarab méretét a vákuumkamra nagysága korlátozza.

IRODALOM

Tankönyvek, összefoglaló művek

- Takács J.(szerk.): Korszerű technológiák a felületi tulajdonságok alakításában, Műegyetemi Kiadó, Bp., 2004, azonosító: 75016
- Giber J. és szerzőtársai: Szilárdtestek felületfizikája, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987
- Hahn E., Szikora B., Szilágyi M.: Fizikai technológiák, Tankönyvkiadó, Budapest, 1986 (BME egyetemi jegyzet)
- Mojzes I. (főszerk.): Mikroelektronika és elektronikai technológia, Műszaki Kiadó, Budapest, 1995
- R.W. Cahn, P. Haasen, E.J. Kramer (eds.): Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment, vol.15, R.W. Cahn (vol. ed.): Processing of Metals and Alloys, VCH, Weinheim, 1991
- K.N. Strafford, R.St.C. Smart, I. Sare, Ch. Subramanian: Surface Engineering: Processes and Applications, Technomic Publ., Basel, 1995
- J.P. Dan: Hard coatings. J. de Physique IV. 07, vol.3, Nov. 1993 pp. 933-941

Speciális területek

- Búza G., Bakondi K., Kiss Gy., Takács J.: A plazma porszórás alapjai, lehetőségei. Gép 43. (11-12) 413-417 (1991)
- H. Herman: Sprayed metallic coatings. In: Encyclopedia of Materials Science and Engineering (ed. M.B. Bever), Pergamon Press, Oxford, 1986, pp. 4554-4557
- J.H. Zaat: A quarter of century of plasma spraying, Annual Rev. Mater. Sci. 13, 9-42

- E.A. Brandes, G.B. Brook (eds.): Smithells Metals Reference Book, 7th ed. Butterworth, Oxford, 1992, (Vapour deposited coatings 35-1 ... 11)
- R.J.Nemanich: Growth and characterization of diamond thin films. Annual Rev. Mater. Sci. 21 535-558 (1991)
- J.C. Angus et al.: Metastable growth of diamond and diamond-like phases. *ibid.* 21, 221-248 (1991)
- Giber J. (szerk.): Diffúzió és implantáció szilárdtestekben (A technológia alapjai 1.), Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997
- O. Auciello, R. Kelly (eds.): Ion Bombardment Modification of Surfaces: Fundamentals and Applications, Elsevier, Amsterdam, 1984
- J.F. Ziegler (ed.): Handbook of Ion Implantation Technology, North Holland, Amsterdam, 1992
- E. Schubert, H.W. Bergmann: Rapidly solidified surface layers by laser melting, pp. 195-230. In: H.H. Liebermann (ed.): Rapidly Solidified Alloys: Processes, Structures, Properties, Applications, Marcel Dekker Inc., 1993
- S. Schiller, S. Panzer: Thermal surface modification by electron beam high speed scanning. Annual Rev. Mater. Sci. 18, 121-140 (1988)